Gerenciamento OEE na Indústria Farmacêutica

SENAI

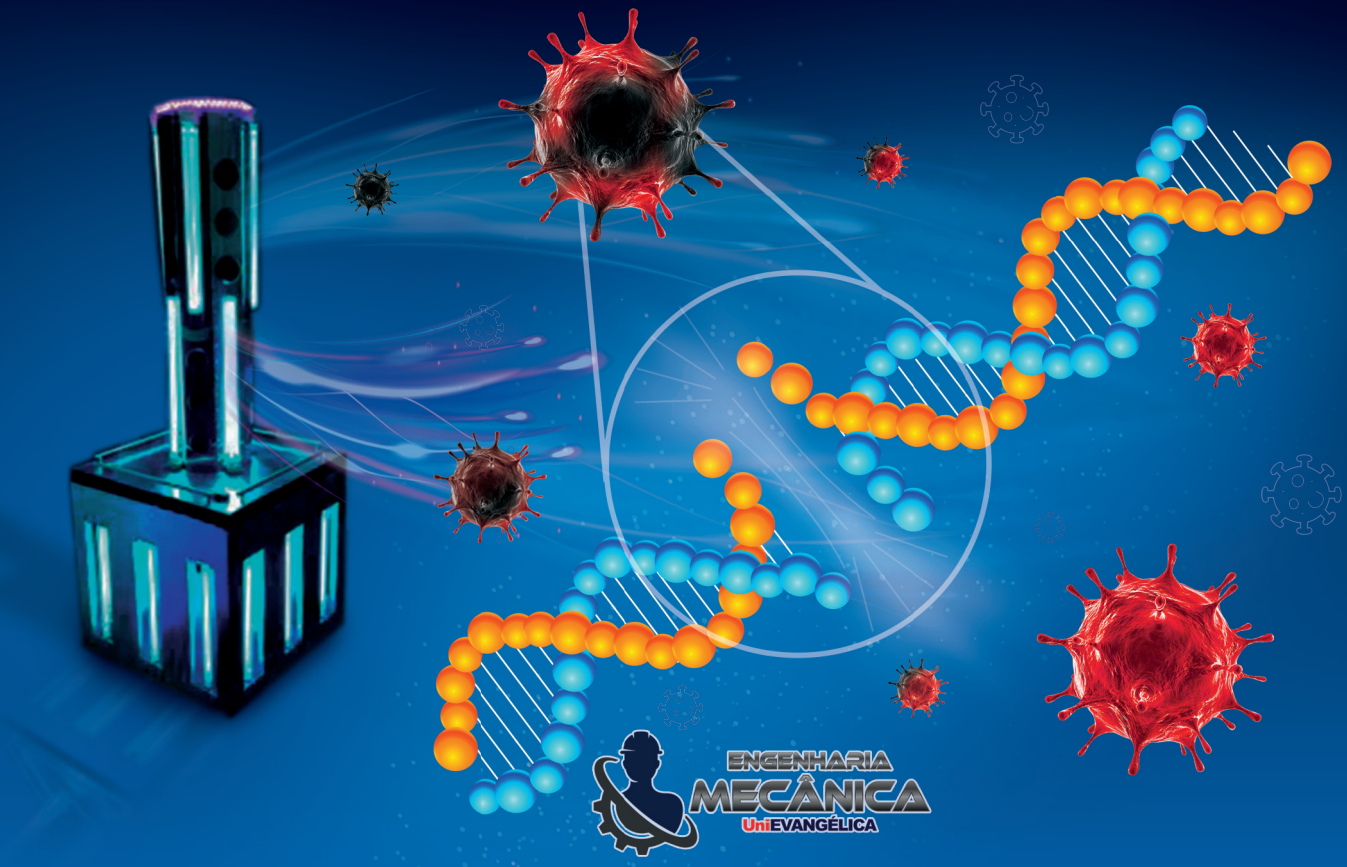
# REVISTA Processos Químicos

Revista Científica da Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange

Ano 14
nº 28
Jul/Dez
2020

www.rpqsenai.org.br

## Far-UVC e Ozônio no Combate à Covid-19



ENGENHARIA MECÂNICA UniEVANGÉLICA

ISSN 1981-8521

# REVISTA Processos Químicos

Revista Científica da Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange

SENAI

Goiânia, v.14, n.28, ano14, jul/dez 2020.

REVISTA Processos Químicos

Ano 14
nº 28
Jul/Dez
2020

**Sandro Mabel**
Presidente do Conselho Regional do SENAI

**Paulo Vargas**
Diretor Regional do SENAI

**Claudemir José Bonatto**
Diretor de Educação e Tecnologia

**Weysller Matuzinhos de Moura**
Gerente de Educação Profissional

**Misclay Marjorie Correia da Silva**
Diretora da Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange

**Diego Freire Vieira**
Supervisor Técnico

**Kenia Francisca Barboza de Carvalho**
Coordenadora da Área de Química

## Corpo Editorial

Ademir João Camargo
Andre Luiz Simoes
Anselmo Eucana de Oliveira
Eurípedes de Almeida Ribeiro Júnior
Gilberto Lúcio Benedito Aquino
Guilherme Roberto de Oliveira
Hamilton Barbosa Napolitano
Kleber Carlos Mundim
Marcia Cibele Martins Castoldi
Maria Assima Bittar Gonçalves
Roberta Signini
Solemar Silva Oliveira
Valter Henrique Carvalho Silva

SENAI

Revista Processos Químicos / SENAI.
Departamento Regional de Goiás - v.14, n.28 (jul/dez 2020). Goiânia: SENAI/DR/GO. Gerência de Educação Profissional / Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange, 2020.
v.: il.

Semestral
Gerência de Educação Profissional do SENAI/DR/GO
Capa e Diagramação: Leandro Rodrigues
Revisão Linguística: Fernanda Marques

ISSN 1981-8521

1. Educação Profissional - Periódicos. 2. Processos Químicos.
I. SENAI. Departamento Regional de Goiás

CDD - 540

Tiragem: 1.500 exemplares

**Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange**
Av. Engenheiro Roberto Mange, n° 239
Bairro Jundiaí - CEP 75113-630 - Anápolis-GO
Fone: (62) 3902-6200 - Fax: (62) 3902-6226
e-mail: revistapq.senai@sistemafieg.org.br

# Sumário

## ARTIGOS CONVIDADOS


9 ***Quantification of Calcium Titanate ($CaTiO_3$) by the Rietvield Method in Different Molar Proportions***
Guilherme Gralik

15 ***Modificação do Método de Dosagem de Fosfato de Heinonen & Lahti (1981)***
Laíce S. Rabelo, Anelise S. Mendonça, Milton V. Coelho, Saulo G. Pereira & Hugo C. S. Melo

20 ***Revisão Sistemática do Estudo da Dinâmica de Estados Excitados da Tetraazaporfirina de Cobalto usando Surface Hopping***
Igor C. Morais, João L. P. Lisboa, José A. S. Neto, Karolina S. Gonçalves, Oliver A. J. S. Filho & Rosemberg F. N. Rodrigues


## ARTIGOS GERAIS


32 ***Revisão Sistemática da Utilização de Far-UVC e Ozônio no Combate à Covid-19 e demais Patógenos***
Guilherme V. L. Silva, Gustavo M. Camargo, José A. S. Neto, Igor D. Borges, Cláudio F. Oliveira & Rosemberg R. F. Nunes

49 ***Estudo do Potencial de Geração de Energia Eólica no Estado de Goiás***
Thomas E. G. F. Kohler, Luís G. Moreira, Sérgio M. Brandão, Rosemberg F. N. Rodrigues & Márcio J. Dias

61 ***Comparação das Características Físico-Químicas do Fluido de Corte Aplicado no Torno CNC Utilizado em Laboratório Didático – Estudo de Caso***
Filipe Y. G. Luz, Bruno S. Miranda, João V. M. Torres, Marcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Adriano P. Ramiro

75 ***Aplicação de Tratamento Estatístico Utilizando o Método de Tukey para Análise de Ruído e Vibração de Veículos SUV***
Lays E. Cunha, Paulo Zavala & Fábio S. Gomes

83 ***Determinação de Parâmetros Otimizados na Soldagem a Ponto por Resistência Utilizando 2 e 3 Chapas em uma Indústria Automobilística***
Kennedy R. Rosario, João C. R. Costa, Sérgio M. Brandão, Márcio J. Dias, Rosemberg F. N. Rodrigues & Wilson P. Silva

94 ***Termografia para Determinação do Limite de Fadiga em Aço de Médio Carbono***
João V. C. G. Alves, Felipe A. V. Araújo, Gabriel A. Honorato, Marcio José Dias, Rosemberg F. N. Rodrigues & Hélio S. Queiroz

108 ***Análise de Eficiência Solar em Painéis Fotovoltaicos***
Gabriel V. Barbosa, Matheus F. S. Alcântara, Matheus R. G. Araújo, Tiago T. Fonseca, Rosemberg F. N. Rodrigues & Márcio J. Dias

116 ***Condensação da Água Atmosférica com Peltier***
Igor T. B. Medeiros, Matheus S. Oliveira & Victor E. N. A. Pericoli

125 ***Análise Comparativa do Desempenho e das Propriedades Mecânicas de Diferentes Materiais Utilizados em Hastes Sulcadoras de Semeadoras de Plantio Direto***
Gabriella A. Martins, Mikael H. Morais, Rosemberg F. N. Rodrigues, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Aline A. Monteiro.

139 ***Veículos Elétricos e Híbridos: História e Perspectivas para o Brasil***
José P. Ferreira & Márcio J. Dias

148 ***Análise das Propriedades Mecânicas e Microestrutural da Solda Híbrida TIG-MAG em Aço SAE 1020***
Vitor D. Borges, José M. C. Silva, Victor M. F. Luz & Wilson de Paula

157 ***Determinação de Parâmetros de uma Máquina de Relutância Variável***
Murillo V. Santos, Célio C. L. Filho, Jan A. R. Ribeiro, Camila D. Jesus & Márcio J. Dias

163 ***Readequação de um Vaso de Pressão Conforme a Norma Regulamentadora NR 13***
Eduardo S. Fernandes, Fernando C. S. Rocha, Luiz G. S. Fernandes, Fábio S. Gomes & Rosemberg F. N. Rodrigues

174 ***Revisão Sistemática Sobre Alternativas de Reciclagem de Alumínio e suas Ligas***
Juliano L. Navarro, Leonardo A. Lopes, André P. Silva, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão, Rosemberg F. N. Rodrigues

189 ***Viabilidade da Aplicação do Aço Inoxidável AISI 420 Tratado Termicamente***
Alexander S. Duarte, Rodrigo L. Almeida & Gino B. Colherinhas

202 ***Otimização Paramétrica Veicular Via Algoritmos Genéticos***
Vinícius Pontes Lemes, Gino Bertollucci Colherinhas

210 ***Avaliação do Projeto de Substituição de Gás Liquefeito de Petróleo para Gás Natural Liquefeito em uma Empresa Automobilística***
Gino B. Colherinhas & Thâmara F. R. Araújo

## RESUMOS ESTENDIDOS

221 ***Estudos da Implementação da Técnica de Gerenciamento OEE em uma Indústria Farmacêutica***
Adriano R. Silva, Jaques J. L. Silva, Roberto C. B. Farias, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Sonimar R. M. Dias

232 ***Estruturação do Planejamento e Controle da Manutenção de uma Indústria Farmacêutica***
Gustavo G. F. Camps, Humbertt C. Souza, Pedro A. A. Lima, Romário R. Amorim & Sérgio M. Brandão

# Apresentação

A pandemia de 2020 mostrou a importância do desenvolvimento da ciência e tecnologia para um país, e ainda a necessidade de colaboração entre instituições de pesquisa no Brasil e no exterior. Existe um esforço conjunto para estudar, entender e apresentar soluções para enfrentar a Covid-19. Superamos os tempos tradicionais para desenvolver testes e vacinas. Avançamos nas pesquisas nas áreas de biologia, Biologia Molecular, Química, Biotecnologia, Nanotecnologia, entre outras. Percebemos que o Brasil não pode ficar dependente tecnologicamente de outros países, estamos correndo contra o tempo, mas estamos avançando. Dias incertos estão vindo – novas cepas e novas doenças são uma ameaça real e devemos nos estruturar para conviver e enfrentar esses novos desafios. Uma forma de nos preparar é incentivando nossos pesquisadores em áreas estratégicas. A Revista Processos Químicos (RPQ) tem como objetivos promover a difusão da inovação tecnológica, estimular o desenvolvimento de novos produtos e processos tecnológicos, incentivar a transferência de tecnologia para a indústria brasileira, contribuindo assim para a sua competitividade.

Neste vigésimo oitavo volume da revista RPQ, apresentamos importantes trabalhos nas áreas tecnológicas afins aos Processos Químicos, como o artigo intitulado "*Revisão Sistemática da Utilização de Far-UVC e Ozônio no Combate à Covid-19 e demais Patógenos"* que descreve o estado da arte em relação à utilização de radiação UVC e Ozônio como agentes germicidas no combate à pandemia Covid-19. O artigo convidado "*Quantification of Calcium Titanate (CaTiO3) by the Rietvield Method in Different Molar Proportions"* descreve a produção do titanato de cálcio com estrutura perovskita ABO3 a partir de rutilo comercial TiO2 e carbonato de cálcio comercial. Há ainda o resumo estendido intitulado "*Estudos da Implementação da Técnica de Gerenciamento OEE em uma Indústria Farmacêutica"*, que apresenta metodologias de gestão voltadas para o cotidiano industrial do setor farmacêutico.

Desejamos a vocês uma boa leitura.

Rolando Vargas Vallejos
Gerente de Tecnologia e Inovação do SENAI GO

# Quantification of Calcium Titanate ($CaTiO_3$) by the Rietvield Method in Different Molar Proportions

Guilherme Gralik

O objetivo do presente estudo é produzir titanato de cálcio (CT) com estrutura perovskita ($ABO_3$) a partir de rutilo comercial ($TiO_2$) e carbonato de cálcio comercial ($CaCO_3$). As matérias-primas foram caracterizadas por difração de raios X (DRX). Diferentes composições foram formuladas, as amostras foram comprimidas a 150 MPa e sinterizadas em forno resistivo a temperaturas de 1300 °C por 3h. As amostras foram analisadas por DRX após o processo de sinterização e as fases foram quantificadas de acordo com o método de Rietveld. As imagens foram representadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de mostrar as características das microestruturas formadas. A densidade dos pellets sinterizados foi medida usando o método de Arquimedes. De acordo com os resultados, a formação do CT depende da razão molar entre os cátions cálcio e titânio nas composições analisadas.

**Palavras-chave:** *titanato de cálcio; método rietvield.*

The aim of the current study is to produce calcium titanate (CT) with perovskite structure ($ABO_3$) from commercial rutile ($TiO_2$) and commercial calcium carbonate ($CaCO_3$). The raw materials were characterized through X-ray diffraction (XRD). Different compositions were formulated, the samples were compressed at 150 MPa and sintered in resistive furnace at temperatures at 1300 °C for 3h. The samples were analyzed through XRD after the sintering process and the phases were quantified according to the Rietveld method. The images were depicted through scanning electron microscopy (SEM) in order to show the features of the formed microstructures. The density of the sintered pellets was measured using the Archimedes method. According to the results, the CT formation depends the molar ratio between calcium and titanium cations in the analyzed compositions.

**Keywords:** *calcium titanate; rietveld method.*

# Introduction

The perovskite structure presents the ABX3 type formula and due to its excellent electrical and magnetic properties is extensively used in sensors and electronic devices[1-3]. The perovskite structure is represented as a cube with cations A and B located in its vertices and the anion X located in its centers of the face. It is a quite flexible structure, so a variety of foreign cations can be placed in its lattice, in different degrees. Thus, it lets a great co-substitution scope to the tailor properties of many ferroelectric and piezoelectric materials used for different applications[4].

The CT perovskite structure is more easily seen in the tetragonal or orthorhombic structures, due to the distortion in the octahedron structure ($TiO^6$). The CT transition temperature may be found in four different space groups depending on the phase, namely: the orthorhombic (Pbnm), orthorhombic (Cmcm), tetragonal (I4/mcm) and cubic (Pm3m) groups. Among these groups there are the cubic phase, at high temperatures (above 1306°C) and the orthorhombic (Pbnm)[5,6] one, which is stable at room temperature. Kennedy *et al* (6) suggest that the orthorhombic structure (Cmcm) is an intermediate stage; however, Ali *et al*[7] disagree with such theory, therefore, the existence of these four stages is controversial.

CT is a material with substantial interest to areas such as geology, metallurgy and ceramics, since it is a promising material to be used in sensors and electronic devices[8]. Some other CT applications such as that of biomaterial used to coat titanium prosthesis[9] have been developed. CT is also used as a resistor element with thermal sensitivity, due to its negative temperature coefficient (NTC)[10], another application for particulate CT is its use for the separation of hydrogen and oxygen from distilled water during light energy conversion[11]. The structurally disordered CT photoluminescent properties are reported in the literature[12,13]. Moreover, this material can be used in communication systems operated by microwave frequencies (UHF and SHF)[14,16] because of its high dielectric constant, low dielectric loss and large temperature coefficient of resonant frequency[17,19].

The traditional process of synthesizing CT is by a solid-state reaction based on calcining the mixed oxide or carbonate powders. Other techniques such as organometallic[20], liquid mix[21], plasma spray[22] and mechanochemical[23,25] processes have also been reported. Reaction-sintering process is a simple and effective route to syntheses ceramics.

Therefore, the aim of the present study is synthesis $CaTiO_3$ ceramics by a reaction-sintering process and quantification of phases formed in different proportions between the oxides $TiO^2$ and CaO.

# Materials and Methods

A commercial calcium carbonate ($CaCO_3$, 99%, Merck) was used as calcium source, and commercial rutile was used as titanium source ($TiO^2$, 99%, Brazil Crystal). The raw materials were characterized through X-ray diffraction (Shimadzu XDR 6000) under 2θ diffraction conditions ranging from 10° to 80°, at scanning speed 2°/min, in order to verify the chemical and mineralogical composition of the raw materials.

The power mixing method was used to formulate the compositions, which were weighed in an analytical scale (Metler Toledo AX 504). The proper molar ratio between the oxides titanium/calcium analyzed was: 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5, 1.6. The mixtures were manually homogenized for 15 min., with the aid of high gassing ethyl alcohol and a pestle, after they were weighed; all the compositions were prepared according to table 1.

The samples were compressed in a manual hydraulic press at 150 MPa into a disc-like shape after the milling process. Each disc was approximately 10 mm diameter and 2 mm thick. The samples were sintered in resistive furnace (Jung J200) under oxidizing atmosphere at temperatures that ranged at 1300°C, for 3 h (in air) at heating rate of 10°C/min and naturally cooled to room temperature. The samples were named according to the Table 1.

**Table 1.** Compositions analyzed, molar ratios, proportions used

| Sample | Relation $TiO_2$/CaO | $TiO_2$ (g) | CaO (g) |
|---|---|---|---|
| C1 | 1.1 | 52.20 | 47.20 |
| C2 | 1.2 | 54.70 | 45.51 |
| C3 | 1.3 | 56.58 | 43.42 |
| C4 | 1.4 | 58.40 | 41.71 |
| C5 | 1.5 | 60.00 | 40.00 |
| C5 | 1.6 | 61.51 | 38.55 |

After the sintering process, the compositions were characterized through X-ray diffraction (XRD, Rigaku Geigaku Geigerflex) for 2θ from 15° to 80°. The goniometer-scanning rate was 2°/min. The compositions were milled and sieved through 200 Tyler mesh.

The phases were quantified according to the Rietveld method using the GSAS/EXPGUI[26,27] software. The quantification combined alumina ($Al_2O_3$), as the internal standard (30%) under zero offset correction condition, and amorphous phase quantification. The cell unit and background parameters were used in the space group Pbnb, and the orthorhombic perovskite structure was performed after the work offset. The background was corrected using the Chebyschev polynomial of the first kind, the diffraction peak profiles were fitted through pseudo-Voigt function. The quality of the least squares refinement was assessed according to quality indices of optimal range between 2 and 4%, as well as to residual graphic analysis[28].

Microstructures were analyzed using scanning electron microscopy (SEM). The samples were manually fractured, ultrasound-cleaned for 15 min and oven dried for 60 min at 105 °C, for scanning electron microscope (SEM) analysis. The samples were subjected to porosimeter (NANNETI) - using the ASTM standard ISO 10545 as reference, weighed in analytical scale (Gilbertini E42, accuracy 0.001 g), dried in an oven at 110 °C/4h and cooled at room temperature to determine the apparent density (hydrostatic); then, they were weighed again in order to determine the dry mass.

# Results and Discussion

The calcium carbonate (Sigma-Aldrich) used in the solid state reaction for CT obtainment is a commercial product mainly featured by its high purity (≥99.0%) and 47.8% loss on fire. The used anatase is a white titanium pigment commercially named TIONA (≥99.0%) and manufactured by Crystal Brazil S.A. The XRD patterns of used raw materials are show in Figure 1.

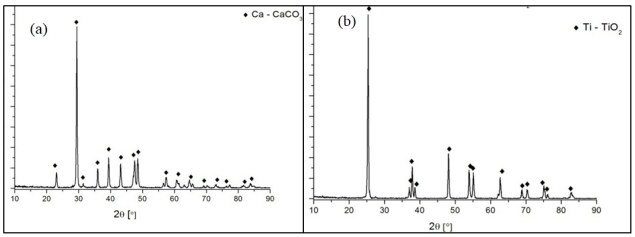



**Figure 1:** XRD patterns of the used raw materials. (a) XRD patterns of calcium carbonate, (b) XRD patterns of titanium dioxide.

The XRD pattern of calcium carbonate Figure 1a just shows the peaks related to calcium carbonate (ICSD - 73446) itself - which is a high-purity commercial material free of different phases and the most intense peak happens at 29°. The XRD pattern of titanium dioxide Figure 1b just shows peaks related to rutile (ICSD - 94566), TiO2 is a high-purity commercial material and its most intense peak takes place at 27°. The XRD patterns of ceramics sintered are show in Figure 2.

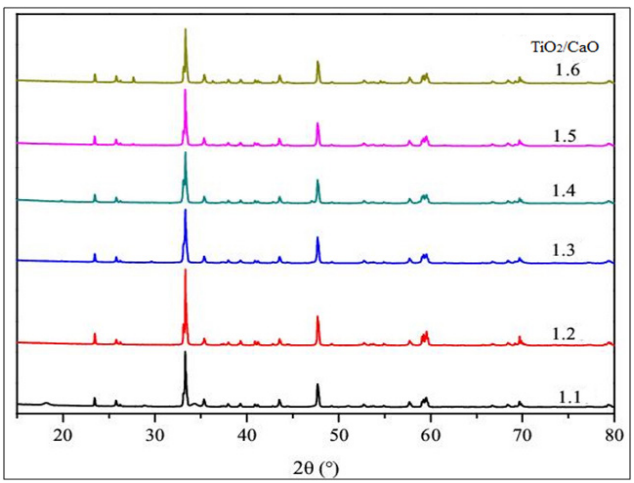



**Figure 2:** XRD patterns of the analyzed compositions in different molar proportions.

The phase composition of sintered ceramic samples was studied through XRD analysis; the CT orthorhombic phase formation is seen in all the samples and is confirmed as the XRD patterns are matched with the crystallography information file (ICSD - 82487) with (Pbnm) space group, the rutile phase matched with the crystallography information file (ICSD - 94566) and Portlandite is matched with the crystallography information file (ICSD - 20224). Table 2 shows the samples and phases formed and their quantifications.

**Table 2.** Phases formed and their quantifications in compositions C1, C2, C3, C4, C5, and C6.

| Sample | CT ($CaTiO_3$) (%) | Rutile ($TiO_2$) (%) | Amorphous phase (%) | Portlandite ($Ca(OH)_2$) (%) |
|---|---|---|---|---|
| C1 | 68.36 | 0.63 | 15.79 | 15,22 |
| C2 | 95.19 | 0.19 | 4.62 | - |
| C3 | 86.05 | 1.26 | 12.69 | - |
| C4 | 85.06 | 0.69 | 14.25 | - |
| C5 | 67.77 | 1.43 | 30.80 | - |
| C6 | 60.27 | 4.06 | 35.67 | - |

In Figure 3 can observe the refinements of the compositions $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$, $C_5$ and $C_6$.

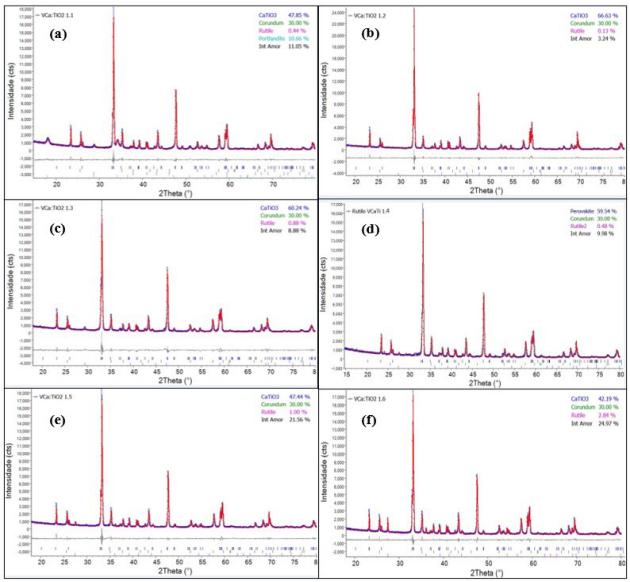



**Figure 3:** Refinements of the compositions: (a) sample $C_1$, (b) sample $C_2$, (c) sample $C_3$, (d) sample $C_4$, (e) sample $C_5$, (f) sample $C_6$

The composition $C_1$ presented formation of calcium titanate with the perovskite structure in amount of 68.36%, with a remanescent of $TiO_2$ in 0.63% with a remanescent of $Ca(OH)_2$ in 15.22% and amorphous phase in 15.79%. The composition C2 presented the formation of calcium titanate in amount of 95.19%, with a remanescent of $TiO_2$ in 0.19% and amorphous phase in 4.62%. The composition $C_3$ presented the formation of calcium titanate in amount of 86.05%, with a remanescent of $TiO_2$ in 1.26% and amorphous phase in 12.69%. The composition C4 presented the formation of calcium titanate in amount of 85.06%, with a remanescent of $TiO_2$ in 0.69% and amorphous phase in 14.25%. The composition $C_5$ presented the formation of calcium titanate in amount of 67.77%, with a remanescent of $TiO_2$ in 1.43% and amorphous phase in 30.80%. The composition C6 presented the formation of calcium titanate in amount of 60.27%, with a remanescent of $TiO_2$ in 4.06% and amorphous phase in 35.67%.

The SEM photographs of as-fired CT ceramics sintered are illustrated in Figure 4. Porous pellets with grain size 1 – 5 µm formed at $C_1$ and $C_2$ samples. The grain growth increase clearly at $C_3$, $C_4$, $C_5$ and $C_6$.

The apparently density of CT ceramics sintered increase with relation $TiO_2$/CaO. The maximum apparently density 3.71 g/cm3 is obtained in a relation 1,6 between $TiO_2$ and CaO (sample $C_6$), and the minimum density 2.04 g/cm$^3$ is obtained in a relation 1,1 between $TiO_2$ and CaO (sample $C_1$). Therefore, the densification in CT can be improved by adding $TiO_2$ due to the liquid phase sintering and the increased diffusivity of grain boundary produced a dense microstructure with large grains.

Phase relations in the Ca-Ti-O system have been studied extensively and are widely reported[29,34]. The eutectic point in the CaO-$TiO_2$ system occurs at about 1450°C. Perovskite ($CaTiO_3$) is the typical phase melting or crystallizing at these temperatures[30,34]. However reported the crystallization of an additional phase with the composition $4CaO._3TiO_2$ at low $TiO_2$ concentrations than the stoichiometric requirement for $CaTiO_3$ crystallization is reported[32,33].

In some recent work[29] studied the Ca-Ti-O system at 1200 K in pure oxygen and Ar. In this testwork, four ternary oxides without detectable range were identified:

$CaTiO_3$, $4CaO._3TiO_2$, $3CaO._2TiO_2$ and $CaO.Ti_2O_3$. It is important to note that $CaO.Ti_2O_3$ contains trivalent titanium. Thus, in the system Ca-Ti-O, a combination of trivalent and tetravalent titanium species can co-exist under reducing conditions, in the present study, these intermediate phases mentioned were not found/ quantified due thermodynamic equilibrium under normal operating conditions is normally not reached.

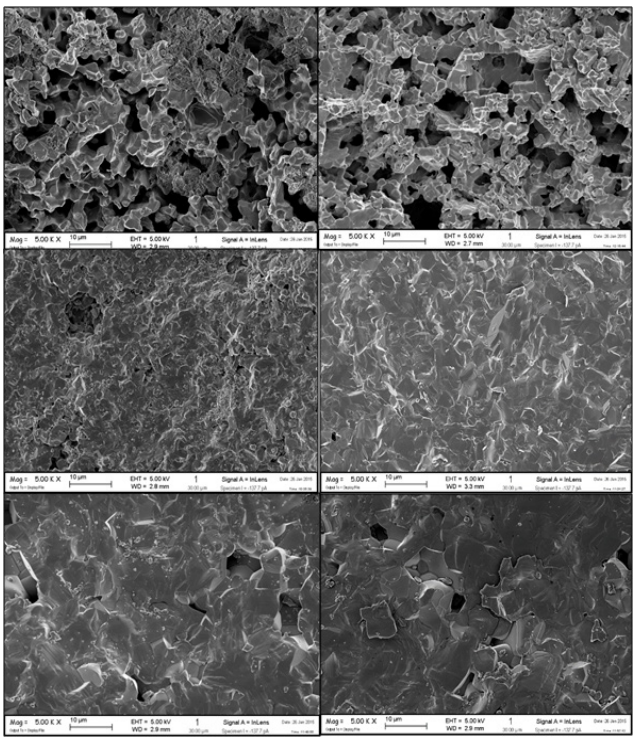


**Figure 4:** SEM photographs of CT ceramics: (a) sample C1, (b) sample C2, (c) sample C3, (d) sample C4, (e) sample C5, (f) sample C6.

# Conclusions

The Perovskite $CaTiO_3$ ceramics could be obtained by a simple and effective reaction-sintering process successfully and its Rietveld refinement revealed that it was crystallized in orthorhombic symmetry at room temperature with Pbnm space group from all samples. The maximum apparently density (3.71 g/cm3) was obtained in sample $C_6$ whose $TiO_2$/CaO ratio is 1.6. The highest amount of CT (95.19%) was obtained in sample $C_2$ whose $TiO_2$/CaO ratio is 1.2, intermediate compounds were not found in the analyzed compositions.

# Referências


1. A. J. Moulsonn, J. M. Herbert, Electroceramics: Materials, Properties and Applications, Wiley, New York, **2003**.
2. J. W. Kim, D. C. Yoon, M. S. Jeon, J. W. Kang, J. W. Kim, H. S. Lee, "Degradation behaviors and failure analysis of Ni–$BaTiO_3$ base-metal electrode multilayer ceramic capacitors under highly accelerated life test." Current Applied Physics.10 **(2010)** 1297.
3. A. J. Bell, "Ferroelectrics: The role of ceramic science and engineering", Journal of the European Ceramic Society, 28, n. 7, pp. 1307-1317, Jan. **2008**.
4. V. V. Lemanov, A. V. Sotnikov, E. P. Smirnova, M. Weihnacht, R. Kunze, "Perovskite $CaTiO_3$ as an incipient ferroelectric", Solid State Communications, 110, n. 11, pp. 611-614, Abr. **1999**.
5. B. J. Kennedy, C. J. Howard, B. C. Chakoumakos, "High-temperature phase transistions in $SrZrO^3$", Physical Review. B 59 (6), **1999**, pp. 4023-4027.
6. B. J. Kennedy, C. J. Howard, B. C. Chakouma, "Phase transitions in perovskite at elevated temperatures – a powder neutron diffraction study", Journal of Physics Condensed Matter. 11, n. 6, pp. 1479-1488, Out. **1999**.
7. R. Ali, M. Yashima, "Space group and crystal structure of perovskite $CaTiO_3$ from 296 to 1720 K.", Journal Solid State Chemistry. 178 pp. 2867-2872 **(2005)**.
8. J. Hao, W. Si, X. X. Xi, R. A. S. Guo, L. E. Bhalla, "Dieletric properties of pulsed-laser- deposited calcium titanate thin films". Applied Physics Letter, 76, n. 21, pp.3100-3102, May **2000**.
9. T. J. Webster, *et al*. "Increased osteoblast adhesion on titanium-coated hydroxylapatite that forms $CaTiO_3$". Journal of Biomedical Materials Research Part A, 67, n. 3, p. 975-980, **2003**.
10. G. M. Mi, Y. Murakami, D. Shindo, F. Saito, "Microstructural investigation of $CaTiO_3$ formed mechanochemically by grinding of a $CaO$-$TiO_2$ mixture". Powder Technology, n. 104, 1, **1999**. p.75.
11. H. Mizogughi, *et al*. "Decomposition of water by a $CaTiO_3$ photocatalyst under UV light irradiation". Materials Research Bulletin, 37, n. 15, p. 2401-2406, **2002**.
12. A. T. Figueiredo, V. M. Longo, S. Lazaro, and *et al*. "Blue-green and red photoluminescence in $CaTiO_3$:Sm". Journal of Luminescence, 126, n. 2, p. 403-407, **2007**.
13. A. T. Figueiredo, and *et al*. "Correlation among order-disorder, electronic levels, and photoluminescence in amorphous CT:Sm". Chemistry of Materials, 18, n. 12, p. 2904-2911, **2006**.

14. D. Suvorov, *et al*. "Microstructural characterization of $CaTiO_3$-$NdA_1O_3$ based ceramics". Korean Journal Crystallography, 11, n. 4, p. 195-199, **2000**.

15. J. S. Kim, *et al*. "Crystal structure and microwave dielectric properties of $CaTiO_3$- (Li1/2)$TiO_3$-(Ln1/3Nd1/3) $TiO_3$ (Ln = La, Dy) ceramics". Japanese Journal of Applied Physics, 38, p. 5633-5673, **1999**.

16. D. Suvorov, *et al*. "$CaTiO_3$ – based ceramics: microstructural development and dielectric properties". Acta Chimica Slovenica, 48, p. 87-99, **2001**.

17. G. PFAFF, "Synthesis of calcium titanate powders by the sol-gel process". Chemistry of Materials, **1994**, 6: 58-62.

18. L. S. CAVALCANTE, V. S. MARQUES, J. C. Sczancoski, *et al*. "Synthesis, structural refinement and optical behavior of $CaTiO_3$ powders: A comparative study of processing in different furnaces". Chemical Engineering Journal **2008**, 143: 299-307.

19. L. S. Cavalcante, A. Z. Simões, L. P. S Santos, *et al*. "Dieletric properties of Ca (Zr0.05 Ti0.95) $O_3$ thin films prepared by chemical solution deposition". Journal of Solid State Chemistry, **2006**, 179: 3739-3743.

20. Z. Z. Yang, T. Fujii, K. Suwa, H. Iwahara, Solid State Ionics 40/41 **(1990)** 544.

21. U. Balachandran, B. Odekirk, N.G. Eror, "Defect structure of acceptor-doped calcium titanate at elevated temperatures." Journal of Materials Science 17, pp. 1656–1662 **(1982)**.

22. K. Neufuss, A. Rudajevová, "Thermal properties of the plasma-sprayed $MgTiO_3$ – $CaTiO_3$ and $CaTiO_3$". Ceramic International 28 (1): pp.93–97. December **2002**.

23. G. Mi, F. Saito, S. Suzuki, Y. Waseda. "Formation of $CaTiO_3$ by grinding from mixtures of CaO or Ca(OH)2 with anatase or rutile at room temperature", Powder Technology. 97, 15 June **1998**, Pages 178-182.

24. I. R. Evans, J. A. K. Howard, T. Sreckovic, M. M. Ristic, "Variable temperature in situ X-ray diffraction study of mechanically activated synthesis of calcium titanate, $CaTiO_3$.", Materials Research Bulletin, 38 **(2003)** 1203–1213.

25. G. Mi, Y. Murakami, D. Shindo, F. Saito, "Microstructural investigation of $CaTiO_3$ formed mechanochemically by dry grinding of a CaO – $TiO_2$ mixture". Powder Technology. 104 **(1999)** 75.

26. A. C. Larson, Dreele R. B. B., GSAS, https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanlrepo/lareport/LA-UR-86-0748_REV, acessado em outubro de 2019.Los Alamos National Laboratory ReportLAUR **(2000)** 86.

27. B. H. TOBY, "EXPGUI, a graphical user interface for GSAS" Journal Applied Crystallography, **2001**. 34, 210-213.

28. M. D. Graff, M. E. Mchenry, Structure of Materials, Cambridge University Press, **2007**.

29. Jacob, K. T., and Gupta, S., **2009**. "Phase diagram of the system Ca-Ti-O at 1200 K". Bulletin of Materials Science, 32 (6), pp. 611-616.

30. H. E. Tulgar, "Solid state relationships in the system calcium oxide-titanium dioxide", Istanbul Technical. University Bulletin, 29 (1), pp. 111-129, **1976**.

31. R. L. Shultz, **1973**. "Effects of titanium oxide on equilibria among refractory phases in the system CaO-MgO-iron oxide", Journal American Ceramic Society, 56 (1), pp. 33-36.

32. A. Jongejan, A. L. Wilkins, **1970**. "A re-examination of the system CaO-$TiO_2$ at liquidus temperatures", Journal of the Less-Common Metals, 20 (4), pp. 273-279.

33. R. S. Roth, **1958**. "Revision of the phase equilibrium diagram of the binary system calcia titania, showing the compound $Ca_4Ti_3O_{10}$". Journal of Research of the National Bureau of Standard, RP 2913, 61(5), pp. 437-440

34. R. C. DeVries, R. Roy, E. F. Osborn, **1954**. "The system $TiO_2$-SiO2". Transactions and journal of the British Ceramic Society, 53(9), pp. 525-540.



## Guilherme Gralik*

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial/SENAI-PR, Ponta Grossa, PR, Brazil.

*E-mail: guilherme_gralik@y ahoo.com.br

# Modificação do Método de Dosagem de Fosfato de Heinonen & Lahti (1981)

Laíce S. Rabelo, Anelise S. Mendonça, Milton V. Coelho, Saulo G. Pereira & Hugo C. S. Melo

Heinonen & Lahti (1981)[1,2] publicaram um método colorimétrico para dosagem de fosfato inorgânico que é até hoje padrão para estudos de enzimas que realizam a hidrólise de ATP, como ATPases, por exemplo. O método consiste em uma solução de acetona P.A, ácido sulfúrico 5N e molibdato de amônio 10 mM numa proporção de 2:1:1. A aquisição de acetona P.A., mesmo para instituições de ensino e pesquisa, é controlada pela polícia federal, uma vez que pode ser utilizado no refino de cocaína. Sendo assim, este trabalho buscou analisar a substituição da acetona P.A. por álcool etílico P.A., uma vez que se trata de um reagente de fácil aquisição. A solução de álcool etílico P.A., ácido sulfúrico 5N e molibdato de amônio 10 mM na proporção de 7:2:1 foi mais sensível que a solução do método original, mostrou linearidade para concentrações de fosfato inorgânico de até 400mM, produziu uma cor estável por cerca de 2 horas e não sofreu influência estatisticamente significante por outros reagentes utilizados em análises bioquímicas, como Triton X-100 1%, Tween 1%, EDTA 5mM, EGTA 5 mM, Imidazol 20 mM, Triz 20 mM, CAPS 20 mM, HEPES 18,75 mM, BSA 0,5 mg/mL, KCl 1M e NaCl 1M. Assim, o método de Heinonen e Lahti (1981)[1,2] modificado para o uso de álcool etílico na proporção de 7:2:1 se mostrou capaz de substituir com eficácia o método original, proporcionando resultados tão confiáveis quanto o método original com a facilidade da compra do reagente.

**Palavras-chave:** *fosfato inorgânico; quantificação; ATPases; colorimetria.*

Heinonen & Lahti (1981)[1,2] published a colorimetric method for inorganic phosphate dosage, that still standard for studies of enzymes that perform ATP hydrolysis, such as ATPases. The method consists of using a solution of acetone P.A, 5N sulfuric acid and 10 mM ammonium molybdate in a ratio of 2: 1: 1. The acquisition of acetone P.A., even for educational and research purposes, is controlled by the Brazilian federal police, since it can be used in cocaine refining. Thus, this work sought to analyze the substitution of acetone P.A. for ethyl alcohol P.A., since it is a readily available reagent. The solution of ethyl alcohol PA, 5N sulfuric acid and 10 mM ammonium molybdate in the 7: 2: 1 ratio was more sensitive than the solution of the original method, showed linearity for concentrations of inorganic phosphate of up to 400 mM, produced a stable color by about 2 hours and did not undergo statistically significant influence by other comon reagents used in biochemical analyzes such as 1% Triton X-100, 1% Tween, 5 mM EDTA, 5 mM EGTA, 20 mM Imidazole, 20 mM Triz, 20 mM CAPS, HEPES 18.75 mM, 0.5 mg / mL BSA, 1M KCl, and 1M NaCl. Thus, the method of Heinonen e Lahti (1981) modified for the use of ethyl alcohol in the proportion of 7: 2: 1 proved capable of effectively replacing the original method, providing results as reliable as the original method with ease of purchase of the reagent.

**Keywords:** *inorganic phosphate; quantification; ATPases; colorimetry.*

# Introdução

Heinonen & Lahti (1981)[1,2] descreveram um método simples, para a determinação de fosfato inorgânico (Pi) e que até hoje está intimamente envolvido com pesquisas que envolvem a dosagem de Pi em sistemas biológicos, como atividade ATPásica por exemplo (Soares Melo e Coelho, 2007; Soares Melo *et al*., 2018; Soares Melo e Coelho, 2018)[1-7]. Este método consiste na utilização de uma solução de acetona P.A, ácido sulfúrico 5N e molibdato de amônio 10 mM numa proporção de 2:1:1 para permitir a formação do complexo fosfomolibdato e a solubilização desse complexo com acetona em meio ácido. Este complexo possui uma cor amarela brilhante que pode ser quantificada colorimetricamente em espectrofotômetro a 355nm, tão eficiente quanto o método de Fiske-SubbaRow(Lindberg & Enster, 1956; Peterson, 1978)[3,4], tem como vantagem a não hidrolise de ésteres de fosfato e anidridos pelo ácido durante o desenvolvimento e a medição da cor.

A obtenção de acetona com alto grau de pureza para os laboratórios de pesquisa ou análise é burocrática, uma vez que se trata de um produto sujeito ao controle e à fiscalização da Polícia Federal em quantidade acima de 2 litros por mês, por se tratar de um dos produtos utilizados no refino de cocaína (Brasil, 2018)[1]. Dessa forma, buscou-se avaliar a substituição da acetona por álcool etílico no método de Heinonen&Lahti (1981)[2] para dosagem de fosfato inorgânico, uma vez que a obtenção de álcool é mais simples e possui custo menor.

# Materiais e Métodos

Baseado no método de Heinonen & Lahti (1981)[2], comparou-se a solução formada pela mistura de acetona P.A. (ou propanona - $CH_3(CO)CH_3$), ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) 5N e molibdato de amônio ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}\bullet_4H_2O$) 10 mM na proporção de 2:1:1 e em volume final de 3 mL, respectivamente, com a solução em que a acetona foi substituída por álcool etílico (ou etanol - C2H5OH) P.A. em diferentes proporções. O conteúdo final foi misturado em vórtex. Esse método gera um complexo de cor amarela, o fosfomolibdato de amônio ($(NH_4)_3PMo_{12}O_{40}$), que é solubilizado por acetona em meio ácido para que possa ser quantificado colorimetricamente.

A dosagem de fosfato inorgânico gerado em sistemas biológicos, envolve a adição de ácido cítrico 1M ao final da reação de interesse para cessar a formação do produto e, assim, prosseguir com a dosagem conforme o método. Nesse experimento, não utilizou-se ácido cítrico, pois as dosagens foram realizadas com adição de fosfato diácido de potássio ($KH_2PO_4$) em concentrações pré-definidas. Ao volume final, foram adicionado 200 µL de $H_2O$ Milli-Q correspondente ao volume do ensaio biológico (amostra biológica e adenosina trifosfato).

Utilizaram-se etanol P.A., ácido sulfúrico 5N e molibdato de amônio 10 mM nas proporções de 2:1:1, 3:1:1, 1:1:1, 4:3:1, 6:3:1 e 7:2:1, respectivamente, para comparar com a solução proposta por Heinonen & Lahti (1981)[2], em termos de sensibilidade, linearidade, estabilidade e interferência por substâncias comumente utilizadas em laboratório. Todas as dosagens foram realizadas em triplicatas e foi utilizado espectrômetro HITACHI U-2000 na frequência de 355 nm, e cubetas de quartzo. As análises estatísticas foram procedidas com o software GraphpadPrism 8.0.2.263.

# Resultados e Discussão

Segundo Heinonen & Lahti (1981)[2], a concentração de molibdato final deve ser alta o suficiente para formar a cor amarela instantaneamente, assim que complexado com o fosfato inorgânico. Além disso, a concentração final de ácido sulfúrico deve ser pelo menos 0,2N para prevenir a cor amarela de surgir sem a presença de fosfato inorgânico. Por fim, a quantidade de acetona deve ser de, pelo menos, um terço do volume final da solução para dissolver todos componentes da mistura. Uma vez que acetona e etanol são solventes diferentes.

Dessa maneira, o presente trabalho não se constituiu apenas na substituição da acetona por etanol, e sim na avaliação de diferentes proporções dos componentes da solução para comparação da sensibilidade com o método original Figura 1.

A Figura 1 mostra que, com exceção da proporção de 1:1:1 (etanol:molibdato de amônio:ácido sulfúrico), todas as outras proporções testadas apresentaram similaridade aos resultados com acetona, com potencial de substituição, inclusive a proporção de 7:2:1 foi mais sensível ao fosfato inorgânico que a solução de acetona.

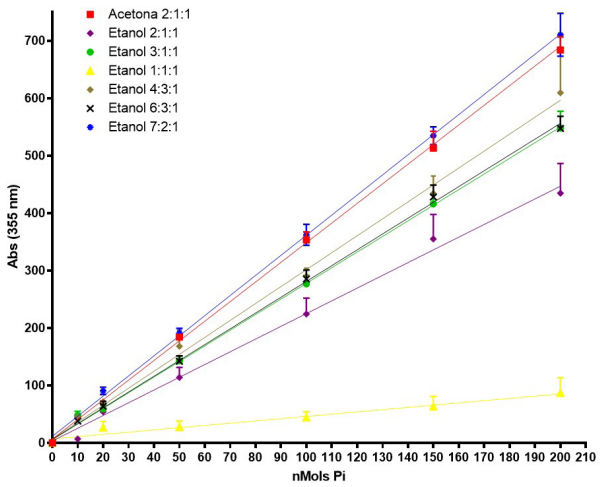



**Figura 1:** Curva de dosagem de Pi com acetona e etanol em diferentes proporções. Todos os pontos de dosagem de Pi, com a respectiva proporção da solução de dosagem, foram realizados em triplicatas, agitados em vórtex e analisadas com cubetas de quartzo em espectrofotômetro.

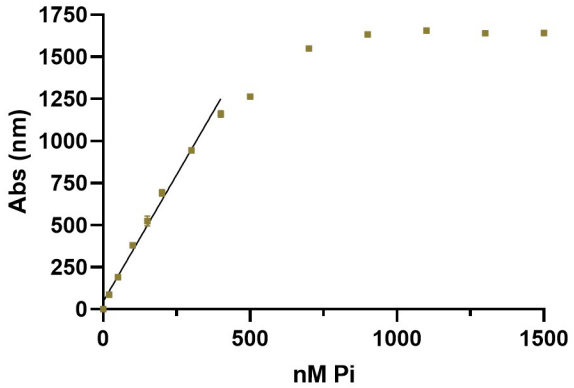



**Figura 2:** Linearidade da intensidade de cor do fosfomolibdato. Em todos os pontos de dosagem de Pi foram utilizados etanol, molibdato de amônio e ácido sulfúrico na proporção de 7:2:1, foram feitos em triplicatas, agitados em vórtex e analisadas com cubetas de quartzo em espectrofotômetro. A linha mostra a faixa de linearidade até 400 nM de Pi, com coeficiente de linearidade de 0,9830 e a equação da reta Y = 3,501*X + 11,54

Diferente do método original com acetona, a utilização de etanol na proporção de 7:2:1 foi linear para dosagem de Pi de 50 nM somente até cerca de 400 nM, apresentando coeficiente de linearidade (R2) de 0,9786 (Figura 2). Apesar de o método com acetona apresentar linearidade até cerca de 1200 nM de Pi, o método com etanol com mais de 400 nM de Pia presentou uma queda do coeficiente de linearidade para 0,8065, apresentando então uma estabilização não proporcional da cor até 1500 nM de Pi.

Nas duas situações do método, com acetona ou etanol, o aparecimento da cor se desenvolve imediatamente após a mistura dos reagentes (cerca de 15s). No entanto, o método original com acetona se manteve estável por até 6 horas, enquanto que, com a utilização de álcool a estabilidade foi mantida por pouco mais de 2 horas sem perda significativa da cor do complexo (Figura 3). Ainda que haja uma diferença clara na estabilidade da cor, 2 horas continua sendo suficiente para a medição da maioria dos testes em espectrofotômetro.

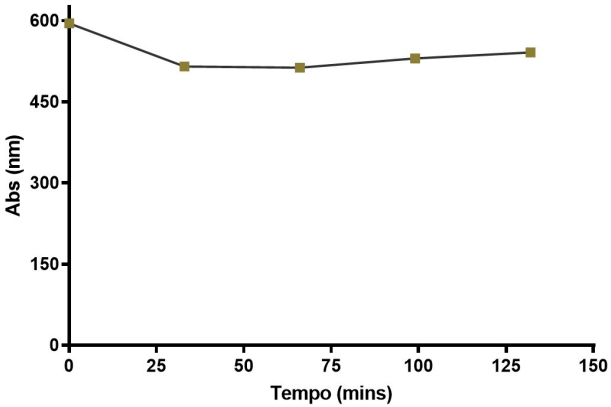



**Figura 3:** Estabilidade da cor do fosfomolibdato. 100 nMols de fosfato diácido de potássio (KH2PO4) foram dosados com etanol, molibdato de amônio e ácido sulfúrico na proporção de 7:2:1, em triplicatas, agitados em vórtex e analisadas com cubetas de quartzo em espectrofotômetro.

Foi também avaliada a interferência de diversas substâncias comumente utilizadas em bioquímicano método de dosagem de Pi de Heinonen & Lahti (1981)[2], substituindo acetona por álcool. Compostos que complexam

com molibdato, como Pirofosfato (PPi) e ATP, podem atrasar a formação da cor, porém na concentração final de molibdato utilizada no método modificado não apresentou diferença estatística significante ($p<0,05$).

Outras substâncias também não demonstraram alterações estatisticamente significantes em relação ao controle. Foram realizados os testes de Análise de Variância tradicional (ANOVA) e Kruskal-Wallis, e em nenhum deles foi verificada diferença estatisticamente significante entre o controle e as substancias de interferência, como Triton X-100 1%, Tween 1%, EDTA 5mM, EGTA 5 mM, Imidazol 20 mM, Triz 20 mM, CAPS 20 mM, HEPES 18,75 mM, BSA 0,5 mg/mL, KCl 1M e NaCl 1M ((Figura 4).

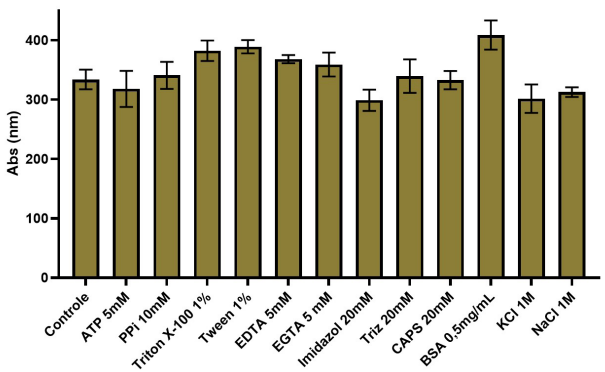



**Figura 4:** Análise da interferência de alguns reagentes na cor do fosfomolibdato. 100 nMols de fosfato diácido de potássio (KH2PO4) foram adicionados aos tubos com os reagentes nas concentrações indicadas, e no volume final de 200 µL acertado com H2O Milli-Q. Em seguida, foram adicionados 2 mL da solução de dosagem (Etanol P.A., Molibidato de amônio 10 mM e Ác. Sulfúrico 5 N na proporção 7:2:1) ao tubo e foi agitado vigorosamente por 15 segundos. 200 µL de Ác. Cítrico 1 M foram adicionados na sequência com mais 10 segundos de vigorosa agitação. Os ensaios foram analisados a 355 nm em espectrofotômetro.

Similar ao método original, compostos que absorvem luz no comprimento de luz entre 390-420nm (como vitaminas, flavoproteínas, hemoproteínas, interferem nos resultados do teste, porém esta interferência pode ser diminuída pela diminuição da concentração dessas substâncias ou pela precipitação das mesmas a priori da dosagem de Pi (Heinonen & Lahti, 1981)[2].

# Considerações Finais

O método de dosagem de fosfato inorgânico de Heinonen & Lahti (1981)[2] é comumente utilizado por laboratórios de todo mundo, especialmente, quando se trata do estudo de ATPases e sua atividade enzimática. A aquisição de acetona para realização do método é burocrática, e nem sempre os laboratórios podem permitir-se a espera da compra. Assim, a substituição da acetona por álcool etílico é uma opção de baixo custo e fácil aquisição para laboratórios, além de evitar que a pesquisa tenha atrasos desnecessários enquanto espera a compra do material em questão. O método modificado neste trabalho mostrou uma excelente sensibilidade, uma boa estabilidade da cor e não sofre interferência por vários reagentes comumente utilizados em laboratórios de bioquímica, apontando que a solução de etanol, molibdato de amônio e ácido sulfúrico na proporção de 7:2:1 podem substituir de forma eficaz a solução proposta pelo método original de Heinonen&Lahti (1981)[2], sem prejuízos para a análise.

# Suporte

Esta pesquisa foi desenvolvida com suporte da Universidade Federal de Uberlandia (UFU), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

# Referências

1. BRASIL. Ministério da Segurança Pública. Gabinete do Ministro. Portaria nº 256, de 26 de dezembro de 2018. Estabelece procedimentos para o controle e a fiscalização de produtos químicos e define os produtos químicos sujeitos a controle pela Polícia Federal. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 27 dez. **2018**. Seção 1, p. 169.
2. Heinonen, J. K.; Lahti, R. J. Anal Biochem. **1981**, 113, 313.
3. Lindberg, O.; Enster, L. MethodsBiochem. Anal. **1956**, 3, 1.
4. Peterson, G. L. Anal Biochem. **1978**, 84, 1, 164.
5. Soares Melo, H. C.; Coelho, M. V. Acta Biochim Pol. **2007**, 54, 3, 575.
6. Soares Melo, H. C.; Coelho, M. V. Revista NBC. **2018**, 8, 15, 70.
7. Soares Melo, H. C.; Cruz, G. C. N. D.; Sousa, M. V. D.; Coelho, M. V. InternationalJournalofRecentScientificResearch. **2018**, 9, 8, 28417.

Laíce S. Rabelo[1], Anelise S. Mendonça[1], Milton V. Coelho[1], Saulo G. Pereira[2] & Hugo C. S. Melo*[2]

[1] Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Instituto de Genética e Bioquímica (INGEB). Av. Para, 1720 - Campus Umuarama – Bloco 2E – Sala 39b – Uberlândia – MG - CEP 38405-320

[2] Faculdade Patos de Minas. Av. Juscelino Kubitschek de Oliveira, nº1220, Bairro Cristo Redentor, Patos de Minas, MG, Brasil - CEP 38706-401.

*E-mail: hugo.some@gmail.com

# Revisão Sistemática do Estudo da Dinâmica de Estados Excitados da Tetraazaporfirina de Cobalto usando Surface Hopping

Igor C. Morais, João L. P. Lisboa, José A. S. Neto, Karolina S. Gonçalves, Oliver A. J. S. Filho & Rosemberg F. N. Rodrigues

A terapia fotodinâmica (TFD) é uma reação fotoquímica que atua diretamente em tecidos tumorais com intuito de destruí-los, quando aplicada de maneira ideal, sem afetar o tecido saudável. Caso um sensibilizador localize um tecido tumoral por este é anulado, devido à produção de espécies tóxicas como resultado da transferência de energia da molécula para o tecido tumoral, destruindo a anomalia de forma segura. Em sistemas naturais, a biossíntese do óxido de nitrogênio (NO) e suas várias reações biológicas e fisiológicas ocorrem através da interação com metaloproteínas de ferro, rutênio, cobre, cobalto, dentre outros metais de transição. Assim, as reações de NO através de sua coordenação com centros de metal de transição possuem grande potencial e são principais candidatos para cumprir essa função, podem ser citados porfirinas e seus derivados como a tetraazaporfirina.

**Palavras-chave:** *tetrazaporfirina; surface hopping; estados excitados.*

Photodynamic therapy (PDT) is a photochemical reaction that acts directly on tumor tissues in order to destroy them, when applied in ideal ways, without affecting healthy tissue. If a sensitizer finds a tumor tissue, it is canceled, due to the production of toxic species as a result of the energy transfer of the molecule to the tumor tissue, safely destroying the anomaly. In natural systems, nitrogen oxide NO biosynthesis and its various biological and physiological reactions occur through the interaction with iron, ruthenium, copper, cobalt metalloproteins, among other transition metals. Thus, the reactions of NO through its coordination with transition metal centers have great potential and are the main candidates to fulfill this function, being able to mention porphyrins and their derivatives such as tetraazaporphyrin.

**Keywords:** *tetraazoporphyrin; surface hopping; excited states.*

# Introdução

A terapia fotodinâmica (TFD) atua diretamente em tecidos tumorais com intuito de destruí-los, quando aplicada de maneira ideal, mas sem prejudicar o tecido saudável, deixando-o natural, sem danificá-lo. Dessa forma, o fotossensibilizador não causa danos em tecidos vigorosos, pois não tem efeito tóxico ou anormal na falta de luz. Caso um sensibilizador localize um tecido tumoral por este é anulado, devido à produção de espécies tóxicas com resultado da transferência de energia, assim, o tecido é destruído[1].

Visando a aplicações na área de fotodinâmica, a estrutura do óxido de nitrogênio (NO) também chamado de óxido nítrico ou monóxido de nitrogênio, é bastante conhecida por desempenhar papéis diversos em processos biológicos descrita na literatura, como reguladores primários do tônus vascular, está relacionada na transdução de sinal no sistema nervoso central e periférico. A estrutura do óxido de nitrogênio (NO) é ainda parte integrante do sistema de resposta imunológica associada à ativação de macrófagos e neutrófilos, dentre outros processos[2,3].

Em sistemas naturais, a biossíntese de NO e suas várias reações biológicas e fisiológicas ocorrem através da interação com metaloproteínas de ferro, rutênio, cobre, cobalto, dentre outros metais de transição. Assim, as reações de NO, através de sua coordenação com centros de metal de transição que possuem grande potencial e são principais candidatos para cumprir essa função, podendo citar porfirinas e seus derivados como a tetraazaporfirina[4,5,6].

A característica fundamental das porfirinas é a sua formação estrutural constituída por quatro anéis pirrólicos ligados por carbonos, cuja disposição é altamente conjugada. Esse trabalho visa ao estudo de um de seus derivados, a tetraazaporfirina, conhecida também como TAPs, Figura 1 (a), no qual substituem-se quatro nitrogênios nas posições meso. Existem outros derivados como as fitalocianinas, no qual são acrescentados anéis benzênicos ligados aos anéis pirrólicos da tetraazaporfirinas, entre outros derivados devido à inclusão de ligantes na estrutura base da porfirina, conhecidos como metaloporfirinas, podendo ser citada a inclusão de um metal no sítio central como ferro, rutênio, cobre, cobalto, mostrado na Figura 1 (b), dentre outros. Sensores químicos ou até possíveis tratamentos contra o câncer ou HIV apresentam grande potencial tecnológico e farmacológico dessas estruturas e o real interesse do meio científico em estudá-las, levando ao aumento de pesquisas desenvolvidas[7,8].

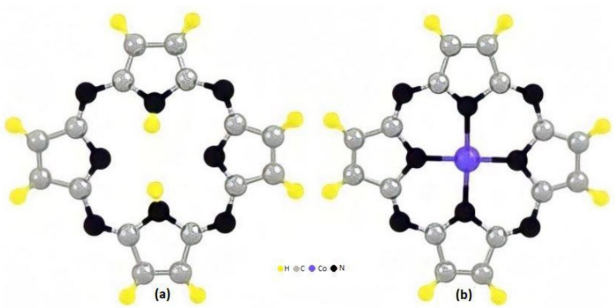



**Figura 1:** (a) - Estrutura da Tetraazaporfirina; (b) – Estrutura da Tetraazaporfirina de Cobalto. **Fonte:** Autores.

Tetraazaporfirinas possuem características que despertam interesse em aplicação como sensitizadores em terapia fotodinâmica, através da interação com a radiação com comprimento de onda e frequência bem definidos com intuito de promover a morte do tecido tumoral. Essas particularidades, como baixa toxicidade, estabilidade térmica, facilidade de síntese, podem atuar como transportadores de NO como mostra a Figura 2 (a), de tal forma a atuar em regiões específicas e agindo conforme exposição à radiação eletromagnética, pois espécies tóxicas geradas com resultado da transferência de energia podem resultar em tecidos tumorais destruídos. Outra peculiaridade das TAPs é a possibilidade de alterar o potencial de redução devido à troca de substituinte, assim controla-se a labilidade da ligação Metal-NO, em certo estado de oxidação, dependendo do ligante interagindo com o metal. Dessa forma é possível aplicar algumas variações para o ligante R na Tetraazaporfirina de Cobalto

(Figura 2 (b)) ou realizar a variação do estado de oxidação. Lima e colaboradores desenvolveram um trabalho sobre a Tetraazaporfirina de Rutênio em 2013 e relataram que os parâmetros geométricos e eletrônicos da ligação Ru-NO são altamente dependentes do estado de oxidação do Ru e da natureza química do ligante L na posição axial. Os resultados também mostraram que RuTAP e Ru (L) TAP são bons candidatos potenciais para serem usados como portadores de NO em organismos vivos[9].

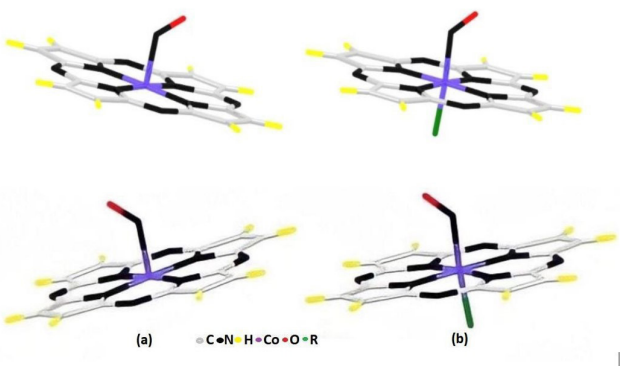



**Figura 2:** (a) Estrutura da Tetraazaporfirina de Cobalto com óxido nítrico. (b) Estrutura da Tetraazaporfirina de Cobalto com óxido nítrico e ligante a ser definido. **Fonte:** Autores.

Com aplicação da Tetraazaporfirina de Cobalto em fotodinâmica surge o questionamento de como essa estrutura se comporta perante a absorção dessa energia, emitida com frequência e comprimento de onda bem definidos em determinada região do organismo. Essa resposta pode surgir através da mecânica quântica proveniente de cálculos teóricos e computacionais (Teoria de Estados Excitados). Motivada pelos avanços algoritmos, a pesquisa computacional sobre simulações dinâmicas de sistemas moleculares eletronicamente excitados vem se desenvolvendo rapidamente nas últimas décadas, como mostra a Figura 3 (a), no qual a quantidade de publicações X ano evidencia o aumento considerável, quando comparado ao ano anterior. Sistemas maiores e mais complexos são exibidos diariamente em todo o mundo Figura 3 (b) e por grupos de pesquisa em diversas áreas, Figura 3 (c), proporcionando informações fundamentais para interpretar fenômenos de estados excitados. São revelados por técnicas espectroscópicas avançadas, para explicar processos fotoquímicos diversos.

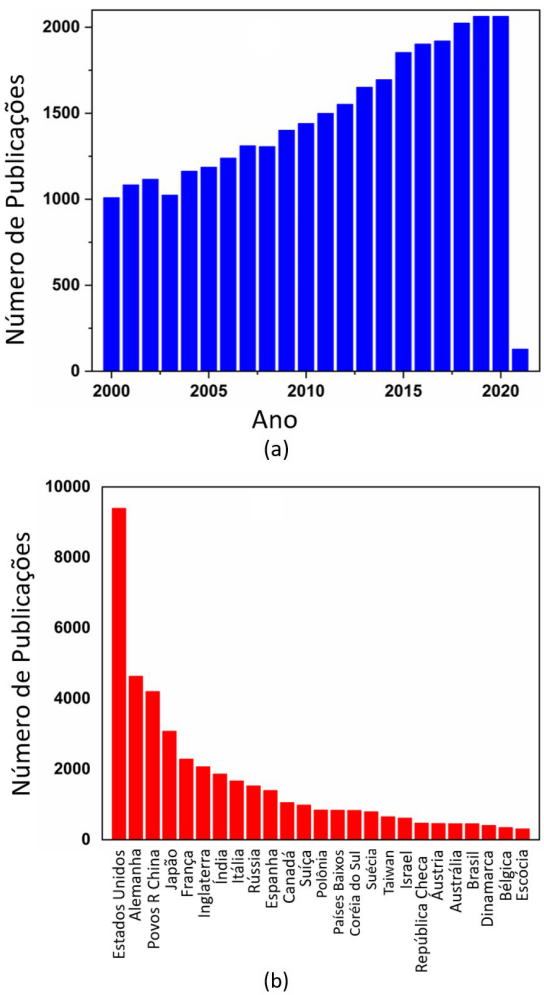
Vários métodos estão disponíveis para simulações da dinâmica de estado excitado não adiabático, a partir da propagação completa das funções de ondas eletrônicas[10], que requer predefinição de superfícies de energia potencial multidimensional, para aproximações semi-clássicas, que reduzem a propagação da função de onda para ensembles de trajetórias independentes baseadas apenas em propriedades locais[11].

Do ponto de vista das simulações semi-clássicas não dinâmicas da dinâmica do estado excitado, o método ideal para cálculos de estrutura eletrônica deve satisfazer aos seguintes critérios: seja computacionalmente rápido; forneça energias para estados excitados de diferentes naturezas com precisão similar; forneça gradientes confiáveis (preferencialmente analíticos) para estados excitados; permita o cálculo de estruturas eletrônicas perto da interseção com o estado fundamental; permita o cálculo de estruturas eletrônicas no limite da interseção entre estados excitados; seja independente da intervenção humana para executar grandes conjuntos de diferentes geometrias.

Com precisões diferentes, os métodos para cálculo de estados excitados baseados em DFT cumprem a maioria desses critérios, especialmente a eficiência computacional. Contudo, esses métodos, geralmente, falham para o critério de descrição perto da interseção com o estado fundamental. No entanto, ainda considerando os prós e os contras, o Surface Hopping com base nas excitações de DFT (SH/DFT) é uma boa alternativa para simulações não adiabáticas, sob a condição de ser aplicada criticamente, tendo em mente todas essas restrições e limitações.

No Surface Hopping, a propagação do tempo do pacote de ondas quânticas é aproximada por um gama de trajetórias semi-clássicas que evoluem nas superfícies de Born-Oppenheimer de múltiplos estados eletrônicos. Eventos não adiabáticos (transferência de densidade de pacotes de ondas entre os estados)[12], são simulados por um algoritmo estocástico que permite que cada trajetória salte para outros estados durante a propagação. Assim, espera-

se que as estatísticas sobre o conjunto de trajetórias em termos de fração de trajetórias em cada estado eletrônico em cada etapa do tempo sejam uma representação aproximada da distribuição da densidade de pacotes de onda entre os estados excitados em função do tempo. O método foi proposto conceitualmente por Nikitin[13] e teve suas primeiras implementações feitas por Tully e Preston[14]. Foi revisado recentemente por Curchod e colaboradores[15] e Akimov e colaboradores[16]. Portanto, definiu-se inicialmente o objetivo geral do trabalho para ser usado como solução da indagação apresentada e como base de análise dos artigos encontrados nas buscas.



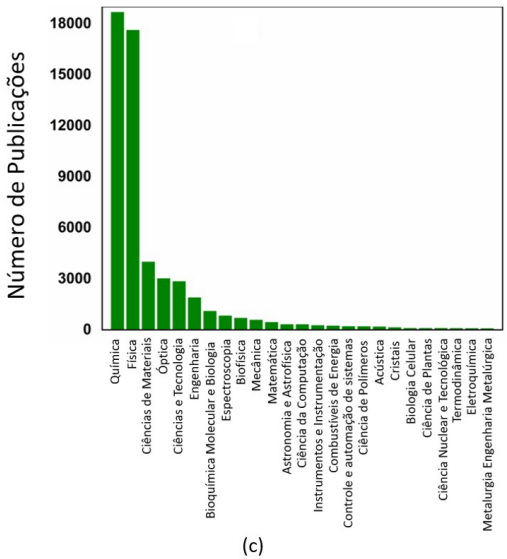




**Figura 3:** (a) Gráfico da evolução da produção científica sobre dinâmica de estados excitados no mundo nas últimas décadas. (b) Gráfico da produção científica por países sobre dinâmica de estados excitados no mundo nas últimas décadas. (c) Gráfico da produção científica por áreas de atuação sobre dinâmica de estados excitados no mundo nas últimas décadas. **Fonte:** Autores.

# Metodologia

Para esta revisão bibliográfica sistemática, definiu-se inicialmente o objetivo geral do trabalho para ser usado como solução da indagação apresentada na introdução e como base de análise dos artigos encontrados nas buscas. Desta forma, as buscas por trabalhos que correlacionaram com o tema proposto por este artigo foram realizadas nas bases de dados Web of Science, Springer, Science Direct, PubMed e Google Academic, por apresentarem em suas estruturas de pesquisa mecanismos que destacam e filtram publicações relevantes ao tema. Essa busca teve o intuito de verificar as principais palavras-chave utilizadas pelos autores, assim este processo ajuda a aprimorar a pesquisa diminuindo a quantidade de trabalhos, mas concentrando os mais relevantes para o tema. Durante o processo, utilizaram-se formulações de termos e operadores, como: “cobalt; tetraazaporphyrin; excited state dynamics; surface hopping; photodynamic”, “excited state dynamics AND photodynamic AND tetraazaporphyrin” e “surface hopping

AND excited state dynamics AND tetraazaporphyrin AND photodynamic". Assim, definiu-se a string de busca, na qual funciona corretamente com o operador lógico AND, além de ser aplicável em todas as bases. Esta string se limitou a apresentar termos como, cobalto (cobalt), tetraazaporfirina (tetraazaporphyrin), salto de superfície (surface hopping), "dinâmica dos estados excitados" ("excited state dynamics") e fotodinâmica (photodynamic). Tendo em vista que para pesquisa por publicações, filtraram-se somente artigos científicos de língua inglesa, além de limitar o período de busca em 50 anos.

A Figura 4 apresenta a etapa de seleção dos artigos por meio do uso do programa StArt, sendo que este fluxograma foi desenvolvido com cunho educativo exibindo as principais seções da ferramenta.

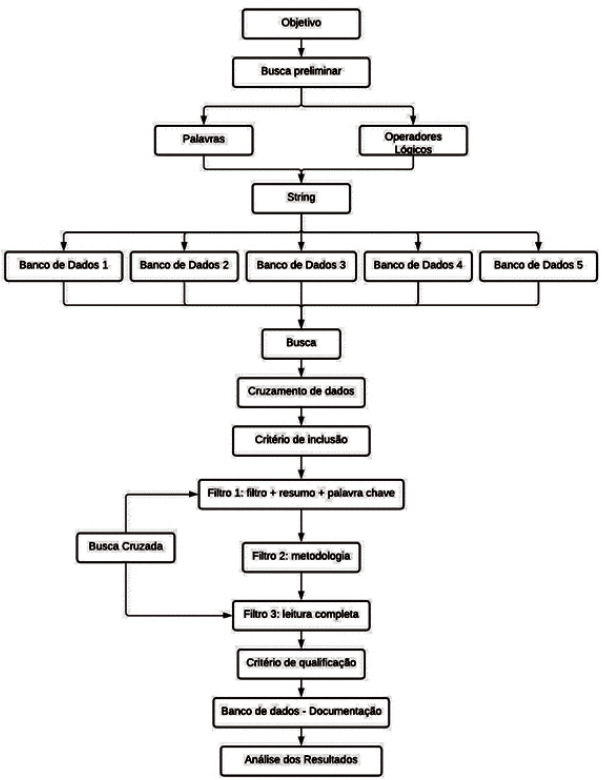



**Figura 4:** Fluxograma da metodologia. **Fonte:** Autores.

Abordagens mistas quânticas-clássicas são provavelmente a classe de métodos mais empregada para realizar simulações de dinâmica molecular em estado excitado, incluindo efeitos não-adiabáticos. Nessas abordagens, que incluem o salto de superfície e os métodos de Ehrenfest, a evolução do tempo nuclear é tratada classicamente, enquanto a evolução do tempo da população de cada estado eletrônico é tratada separadamente. No salto de superfície, a evolução temporal da população é obtida em duas etapas: primeiro, a probabilidade de transição não-adiabática entre cada par de estados é calculada e um algoritmo estocástico é aplicado para decidir em qual estado a trajetória clássica é propagada na próxima etapa de tempo. Em segundo lugar, as estatísticas sobre um grande conjunto de trajetórias computadas independentemente permitem obter a fração das trajetórias (ocupação) em cada estado em função do tempo. A principal hipótese subjacente à abordagem de salto de superfície é que a ocupação e a população quântica de cada estado eletrônico são as mesmas se um número infinito de trajetórias forem calculadas.

Após a busca, com a ajuda da ferramenta, realizou-se um cruzamento de dados de ambas bases com o propósito de verificar a possível duplicação de trabalhos, para então diminuir a quantidade de publicações analisadas durante a aplicação dos critérios de inclusão.

Nesse sentido, como critério de inclusão, buscou-se filtrar as publicações por 3 filtros distintos, conforme apresentados no fluxograma da Figura 4. No primeiro filtro, executou-se a leitura do título, resumo e palavras-chave, com o intuito de identificar semelhança entre o objetivo da revisão sistemática e o apresentado no artigo. No segundo, realizou-se a leitura da metodologia dos artigos selecionados, objetivando escolher produções científicas que demonstrassem uma parte experimental mais elaborada, dando ênfase aos trabalhos que abordassem análise de dados econômicos do processo. Por fim, no terceiro filtro, verificaram-se os artigos selecionados por meio de uma leitura completa com o propósito de analisar os resultados e conclusões, as quais se interligam à proposta da metodologia definida pelo autor. Além disso, durante esta etapa estudaram-se os critérios de qualificação como

a quantidade de citações, qualidade do periódico, ano de publicação, variabilidade de amostragem do experimento e H-Index da autoria. Para a aplicação de ambos os critérios utilizou-se a ferramenta StArt, na qual facilita a separação dos artigos em cada fase, além de proporcionar uma melhor análise dos trabalhos finais desta revisão. Nesse sentido, esta ferramenta, conforme exibe a Figura 5, é dividida em 5 seções, o: planejamento, execução, seleção, extração e sumarização. O planejamento define a base estrutural da revisão sistemática, na qual são determinado as bases de dados e os critérios de inclusão.

Já a execução é a etapa de importação de dados de cada base, apresentando o resultado bruto. Por outro lado, a seleção e a extração representam a primeira e última etapa de

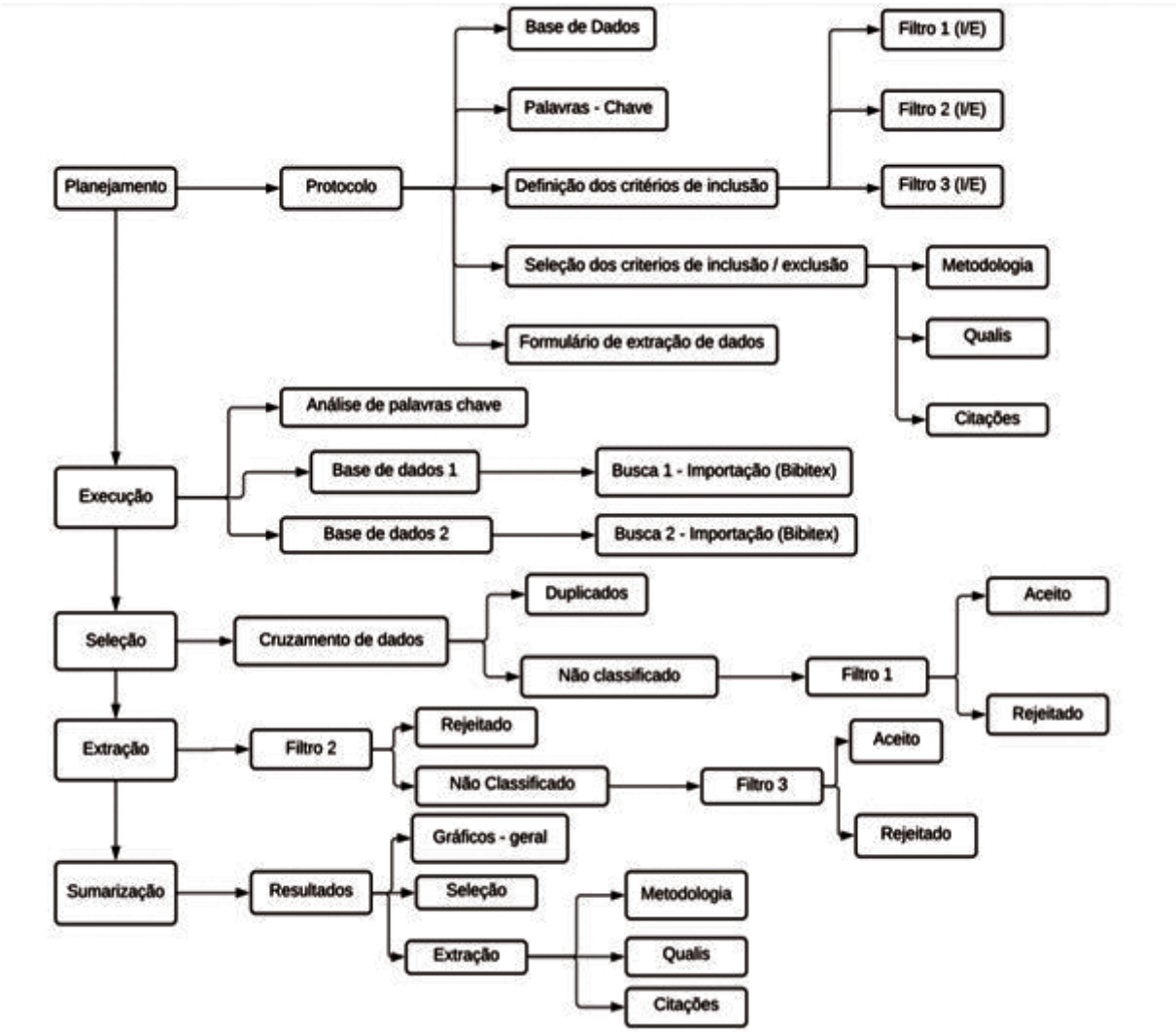



**Figura 5:** Fluxograma do procedimento. **Fonte:** Autores.

aplicação dos critérios de inclusão, respectivamente. Por fim, a sumarização exibe o resumo gráfico em formato de mapas mentais, dos resultados da seleção dos artigos de cada etapa.

Assim, ao final do processo de inclusão, realizou-se nos artigos selecionados uma busca cruzada, na qual objetivou-se identificar no referencial bibliográfico, de cada trabalho, possíveis materiais que passaram despercebidos pelos procedimentos de busca. Nesse sentido, analisou-se cada referência de acordo com os filtros determinados nesta metodologia.

Logo, foi elaborado um modelo ilustrado na Tabela 1 com o objetivo de identificar e limitar o número de artigos excluídos e a taxa de aproveitamento de cada artigo após o cruzamento de dados. Com o auxílio do Mendeley, foi registrado o material aprovado no primeiro filtro, otimizando assim a leitura das publicações necessárias para os próximos filtros, dito isso, para cada filtro eram retirados os artigos rejeitados. Finalizado o processo de busca, análise e documentação, desenvolveu-se uma síntese dos resultados obtidos do processo de seleção, expondo os dados da seguinte forma: quantidade de publicações por ano de cada base, artigos relevantes para o tema proposto deste trabalho, principais autores, países que mais publicaram sobre o tema, principais metodologias utilizadas, dando ênfase nos resultados das pesquisas científicas selecionadas, por fim realizando a análise econômica dos procedimentos utilizados pelos autores, buscando identificar se estes processos apresentam viabilidade econômica como um novo método da utilização dos estados excitados da tetraazaporfirina de cobalto, através do método surface.

# Resultados

O projeto de pesquisa sofreu alterações devido à revisão sistemática realizada no início do trabalho. Inicialmente, o objetivo era a investigação do papel do taquisterol na regulação fotofísica/fotoquímica da fotossíntese da vitamina D, através de dinâmica de estados excitados abordando suas propriedades de absorção eletrônica com abordagem via DFT e possivelmente outros níveis de teoria. Cecília Cisneros e colaboradores publicaram em 2017[17] um artigo cujo objetivo era investigar a influência do taquisterol na produção de vitamina D fotoquímica, visto que poucas pesquisas foram feitas para avaliar essa estrutura. Em particular, sua dinâmica de estado excitado nunca havia sido investigada por experimentos ou simulações. O taquisterol é formado principalmente pela excitação de ultravioleta de pré vitamina D.

Os cálculos deste trabalho foram realizados com o pacote de química quântica da TURBOMOLE. O estado de menor energia, o fundamental, foi calculado via teoria do funcional da densidade (DFT), no qual foram executados usando o módulo dscf. Para níveis mais altos de energia, ou seja, estado excitado, foi empregado a implementação da Teoria do Funcional da Densidade Dependente do Tempo (TDDFT). Os cálculos da dinâmica molecular foram realizados usando o algoritmo Verlet e a dinâmica não adiabática foi realizada usando o método de Surface-Hopping (TDDFT-SH).

Neste trabalho, foram analisadas 87907 estruturas do conjunto de 300 K obtidas a partir da simulação de REMD (Replica Exchange Molecular Dynamics) e classificadas

**Tabela 1:** Formulário para banco de dados. **Fonte:** Autores.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Filtro | | Quantidade de artigos selecionados | | Quantidade de artigos excluídos | | |
| Data de busca | | Quantidade de artigos selecionados | | Taxa de aproveitamento | | |

| | Encontrados | Filtro 1 | Filtro 2 | Filtro 3 |
|---|---|---|---|---|
| Ano | Quantidade de artigos | Selecionados | Selecionados | Selecionados |

de acordo com a sua conformação em ângulo diedro em quatro diferentes rotâmeros: tEt, cEt, tEc e cEc (Figura 6). Os rotâmeros tEc estão presentes com o maior peso estatístico de 46%, seguido pelos rotâmeros tEt (26%). Os rotâmeros cEc e cEt representam 15% e 13% das estruturas, respectivamente.

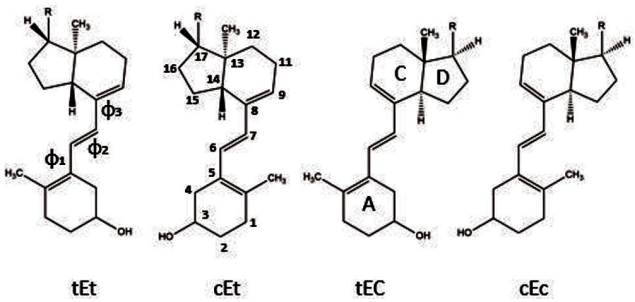



**Figura 6:** Rotâmeros de taquisterol. **Fonte:** The role of tachysterol in vitamin D photosynthesis–a non-adiabatic molecular dynamics study.

Cecília ainda afirma em caráter conclusivo que devido ao seu grande coeficiente de extinção e comportamento predominantemente não-reativo, o taquisterol age principalmente como um escudo solar suprimindo a formação de pré vitamina D de Pro e Lumi, uma vez que absorve na mesma região espectral. O taquisterol apresenta uma formação mais forte de toxisterol do que a pré vitamina D e pode ser visto como a principal rota de degradação da vitamina D. Apesar de ser pouco reativo, uma pequena quantidade de taquisterol reage à pré vitamina D, que é favorecida pelos rotâmeros cEc no lado vermelho do pico de absorção de taquicardia máximo e pode, portanto, constituir um reservatório de pré vitamina D para os tempos em que apenas a radiação UV de baixa energia está presente.

Esses resultados mostram que a pesquisa que seria desenvolvida já estava publicada, dessa forma foi necessário a alteração do tema e isso ocorreu devido a revisão sistemática inicial. Dessa maneira iniciou-se uma nova revisão no qual foram encontrados 52 trabalhos utilizando as strings descritas na seção anterior. No qual 2 artigos estavam duplicados devido a busca em bases diferentes, 41 artigos foram rejeitados após a leitura de título e resumo por terem focos diferentes ou abordagem distintas. Após esse refinamento, restaram 9 artigos selecionados para leitura completa por estarem dentro do viés da pesquisa estabelecida. Finalizada a busca dos trabalhos ainda adicionou-se um artigo manualmente, pois este não foi relacionado a partir das strings selecionadas, mas de extrema importância devido à semelhança de compostos estudados, no qual refere-se a Tetraazaporfirina de Rutênio publicado por Lima e colaboradores em 2013[9].

A importância da interação entre o óxido nítrico e Tetraazaporfirina de Rutênio despertou o interesse desses pesquisadores para realizarem um estudo teórico para os estados de oxidação +1, +2 e +3 de Ru para verificar se Ru (NO) TAP e Ru (NO) (L) TAP (L0Cl$^{-}$, NH3 ou Py) podem ser usados como portadores de NO em sistemas biológicos. O trabalho foi realizado aplicando a teoria do funcional de densidade de Kohn-Sham (DFT) com troca híbrida de três parâmetros de Beck, funcional de correlação, conhecida como B3LYP e o conjunto de bases 6-31 + G (d) / LANL2DZ. Os mínimos locais da hipersuperfície de energia potencial foram caracterizados pelo cálculo das frequências harmônicas vibracionais no mesmo nível de teoria usado nas otimizações de geometria com as representações de todas imagens trabalhadas na Figura 7.

Os resultados do cálculo realizado nos complexos RuTAP, [(NO) RuTAP], [(NO) Ru (L) TAP] (L0Cl$^{-}$, NH3, Py) para os estados de oxidação +1, +2 e +3 de Ru no nível B3LYP / 6-31 + G (d) / LANL2DZ mostram que a ligação Ru-NO é energeticamente estável e as energias de ligação são altamente dependentes do estado de oxidação de Ru e da natureza química do ligante L. Um fato interessante é que os parâmetros geométricos do ligante TAP não dependem dos estados de oxidação +1, +2 e +3 dos ligantes Ru e L estudados. Isso significa que o ligante TAP deve manter sua estabilidade química característica nos complexos. Estes resultados teóricos mostram que os complexos [(NO) RuTAP], [(NO) Ru (L) TAP] são bons candidatos para uso como portadores de óxido nítrico em organismos vivos.

Buddhadev Maiti e colaboradores[18] publicaram em 2016 um artigo, no qual abordaram a clivagem fotoinduzida da ligação entre o átomo de Si central em macrociclos de porfirina e o átomo de carbono vizinho de um ligante de

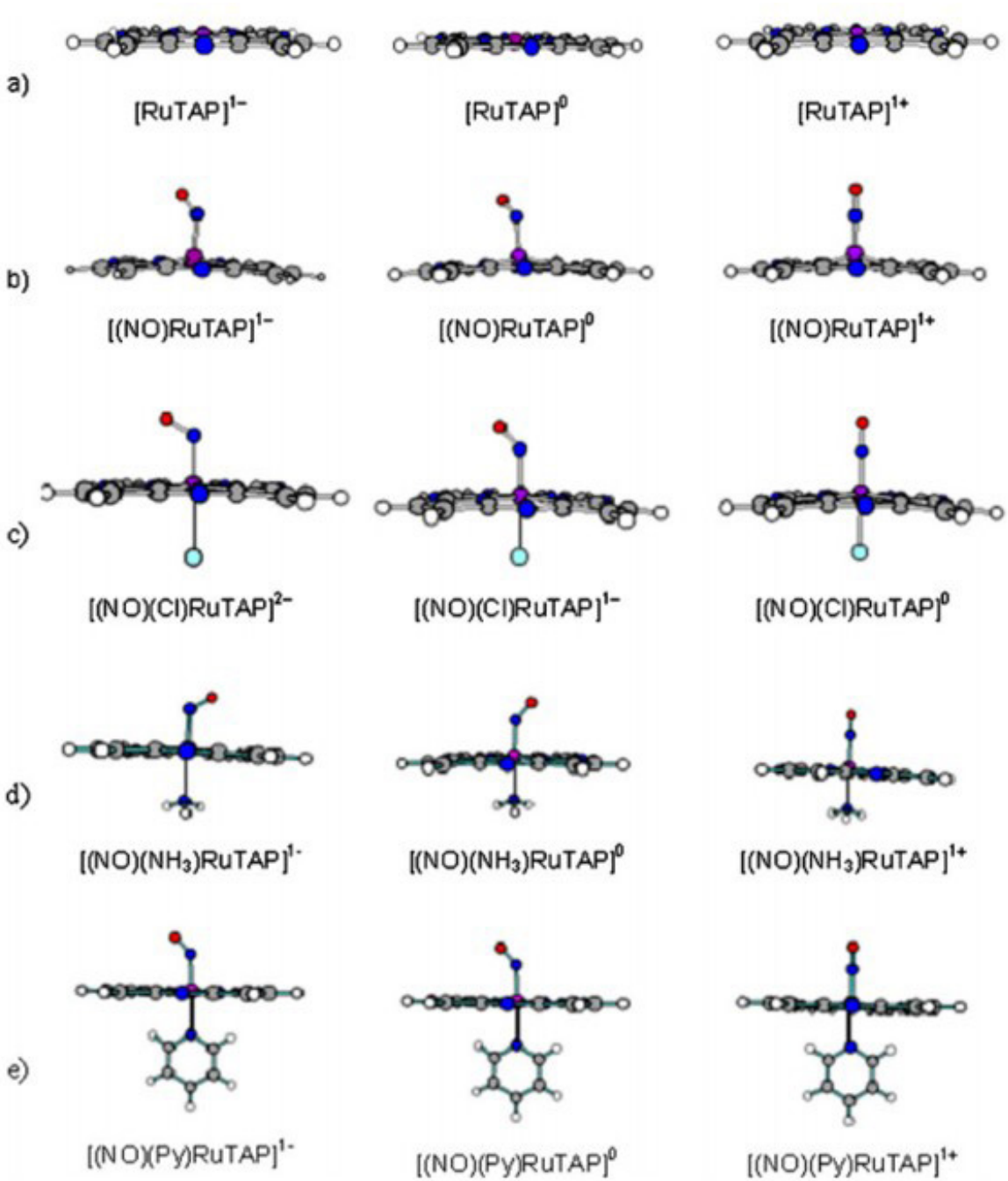



**Figura 7:** Representação gráfica das geometrias moleculares totalmente otimizadas no nível B3LYP / 6-31 + G (d) / LANL2DZ para todos os complexos estudados. **Fonte:** Theoretical investigation on ruthenium tetraazaporphyrin as potential nitric oxide carrier in biological systems.

alquilo axial é investigada por ferramentas experimentais e computacionais. Buddhadev utilizou cálculos de estrutura eletrônica, fornecendo informações sobre a natureza do estado excitado e o mecanismo de fotoclivagem resultante.

O trabalho publicado em 2005 por Danilo e colaboradores[19] relatou as propriedades limitadoras ópticas dos complexos axialmente substituídos de tetrapyrazinotetraazaporphyrinato (Pyz4TAP) com óxido de titânio, óxido de vanádio e dihidróxido de zircônio. A otimização das macrociclo abordadas ocorreu via teoria do funcional de densidade, utilizando o funcional de correlação de troca B3PW91. Cálculos de Kohn-Sham restritos e irrestritos foram realizados com o pacote Gaussian 98 para sistemas de shell aberto e fechado, respectivamente. O conjunto de bases 6-31G * foi consistentemente empregado para os complexos de vanadil e titanila alinhando desempenho e custo computacional. Para o átomo Zr, Danilo utilizou conjunto de bases 3-21G para descrição do complexo Pyz4TAPZr $(OH)_2$ desse elemento. DFT também foi utilizado para porfirina livre de metais, devido à concordância encontrada entre os comprimentos das ligações experimentais e ângulos de ligação e os valores calculados correspondentes. Danilo e colaboradores efetuaram a substituição axial nos complexos metálicos tetravalentes, juntamente com a presença de nitrogênio nos anéis condensados do ligante macrocíclico, mostrando uma significativa melhora do efeito de limitação óptica (OL) na faixa visível quando comparada com as ftalocianinas análogas em similares condições experimentais. O grupo conclui que as variações do momento de dipolo e transições de estados excitados explicam essa melhoria significativa.

O artigo publicado por Pyosang e colaboradores[20] trata de uma análise experimental e teórica de estruturas sintetizadas de benzoporfirinas, monobenzo- (Bp1), dibenzo- (syn Bp2 e antiBp2), tribenzo- (Bp3) e tetrabenzoporfirina (Bp4), sem substituintes periféricos. Os cálculos teóricos foram realizados através do programa Gaussian 03. DFT foi utilizado nesse trabalho para otimização das estruturas com os funcionais de troca híbrida de três parâmetros de Becke e a correlação funcional de Lee Yang-Parr (B3LYP), empregando conjunto de bases 6-31G (d). O grupo investigou de forma qualitativa o efeito de anéis fundidos no estado eletrônico e na dinâmica de relaxamento de energia intramolecular, foram calculados os estados excitados usando TD-DFT no nível B3LYP / 6- 31G (d), a partir dos quais a energia de transição, força do oscilador e direção do momento de dipolo de transição puderam ser obtidas.

Zhihua e colaboradores[21] publicaram um artigo em 2015 com objetivo de investigar os mecanismos de transferência de energia dos pontos quânticos de CdSe (QDs) aos derivados de porfirina com um potencial sistema de antenas com maior eficiência na coleta de luz. O grupo de pesquisadores abordaram os cálculos de transferência de energia de ressonância (FRET) e intensidade de fotoluminescência (PL). Esses tipos de cálculos indicam que maior transferência de energia pode ser alcançada com menor tamanho de pontos quânticos. Esse estudo sugere que os pontos quânticos de CdSe podem ser doadores promissores de transferência de energia para tetraazaporphyrins e absorvedores de NIR para formar sistemas de antenas com maior eficiência de coleta de luz.

A busca por novos fármacos fotossensibilizantes de segunda geração, com absorção de longo comprimento de onda, foi relatada por Wei Liu e colaboradores[22]. O objetivo do grupo era aplicar esses novos fármacos sintetizados na terapia fotodinâmica de tumores, dos quais foram estudadas novas ftalocianinas solúveis em água.

Christopher Farley e colaboradores[23] publicaram em 2016, no qual apresentaram um estudo fundamental de uma série de derivados de ZnF16Pc nos quais os átomos de flúor aromático são progressivamente substituídos por tioalcanos. Os resultados obtidos por eles estão correlacionados aos cálculos de DFT, que mostram que as energias orbitais e simetrias são fatores importantes para explicar a dinâmica do estado excitado.

Alexandra V. Soldatova e colaboradores[24] publicaram em 2006 um artigo, no qual os autores relataram que ocorreu investigação por espectrometria de absorção transiente ultrarrápida e métodos de DFT/TDDFT de propriedades fotofísicas de um grupo de tetrapirróis concentrados em Ni (II). Após a verificação mais profunda foi constatado através da revisão sistemática que o trabalho possui nível baixo de relevância para desenvolvimento da pesquisa final.

# Conclusões

Realizar uma boa revisão sistemática é fundamental para o início de qualquer trabalho, pois é necessário buscar na literatura potenciais e fraquezas para o tema abordado e assim verificar a relevância e contribuição para o meio científico. Essa busca avançada mostrou que o tema proposto inicialmente deveria ser alterado, haja visto que outros autores já haviam publicado algo com mesma ideia abordada, no qual se baseava na explicação do processo fotoquímico ocorrido na vitamina D. A organização dos dados através do programa StArt foi muito útil na tomada de decisão, após escolhas corretas das strings e inclusão e exclusão de artigos diversos. Dessa forma, optou-se pela estrutura de Tetraazaporfirina de Cobalto devido seu potencial, assim como outros derivados das porfirinas na aplicação em terapia fotodinâmica, atuando como transportadores de óxido nítrico, bastante conhecido por desempenhar papéis diversos em processos biológicos descritos na literatura, podendo destruir tecidos tumorais através de espécies tóxicas geradas com resultado da transferência de energia. Foram selecionados trabalhos diversos que estão relacionados com a linha de pesquisa proposta. Artigos que explicam estruturas derivadas das porfirinas através de rotinas práticas ou teóricas com níveis de teoria como DFT, e utilizando a mesma metodologia pretendida ao longo dessa pesquisa (dinâmica de estados excitados – Surface Hopping). O estudo teórico da Tetraazaporfirina de Cobalto relacionado a liberação de NO devido ao estímulo eletromagnético com frequência e comprimentos de ondas específicos contribui para a busca de possíveis aplicações farmacológicas dessa classe de compostos bem como para o meio científico.

# Referências


1. Zhu, W. *et al*. An efficient tumor-inducible nanotheranostics for magnetic resonance imaging and enhanced photodynamic therapy. Chem. Eng. J. 358, 969–979 **(2019)**.
2. Herold, S. Interaction of nitrogen monoxide with hemoglobin and the artefactual production of S-nitroso-hemoglobin. Comptes Rendus - Biol. 326, 533–541 **(2003)**.
3. Bartberger, M. D. *et al*. The reduction potential of nitric oxide (NO) and its importance to NO biochemistry. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 99, 10958–10963 **(2002)**.
4. Enemark, J. H. & Feltham, R. D. Principles of structure, bonding, and reactivity for metal nitrosyl complexes. Coord. Chem. Rev. 13, 339–406 **(1974)**.
5. Richter-Addo, G. B., Legzdins, P. & Burstyn, J. Introduction: Nitric oxide chemistry. Chem. Rev. 102, 857–859 **(2002)**.
6. Hunt, A. P. & Lehnert, N. Heme-Nitrosyls: Electronic Structure Implications for Function in Biology. Acc. Chem. Res. 48, 2117–2125 **(2015)**.
7. Bi, W. *et al*. A switchable NLO organic-inorganic compound based on conformationally chiral disulfide molecules and Bi(III)I5 iodobismuthate networks. Adv. Mater. 20, 1013–1017 **(2008)**.
8. Aoki, K., Nagano, K. & Iitaka, Y. The crystal structure of L -arginine phosphate monohydrate . Acta Crystallogr. Sect. B Struct. Crystallogr. Cryst. Chem. 27, 11–23 **(1971)**.
9. Lima, J. M. M., Silva, V. H. C., Camargo, L. T. F. M., De Oliveira, H. C. B. & Camargo, A. J. Theoretical investigation on ruthenium tetraazaporphyrin as potential nitric oxide carrier in biological systems. J. Mol. Model. 19, 1727–1737 **(2013)**.
10. Worth, G. A. & Cederbaum, L. S. Beyond born-oppenheimer: Molecular dynamics through a conical intersection. Annu. Rev. Phys. Chem. 55, 127–158 **(2004)**.
11. Barbatti, M. Nonadiabatic dynamics with trajectory surface hopping method. Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci. 1, 620–633 **(2011)**.
12. Yonehara, T., Hanasaki, K. & Takatsuka, K. Fundamental approaches to nonadiabaticity: Toward a chemical theory beyond the born-oppenheimer paradigm. Chem. Rev. 112, 499–542 **(2012)**.
13. Nikitin EE. Der gegenwärtige Stand der Theorien bimolekularer Reaktionen. Berichte der Bunsengesellschaft für Phys Chemie. **1968**; 72(8): 949–959.
14. Tully, J. C. & Pkeston, R. K. Trajectory surface hopping approach to nonadiabatic molecular collisions: The reaction of H+ with D2. J. Chem. Phys. 55, 562–572 **(1971)**.
15. Curchod, B. F. E., Rothlisberger, U. & Tavernelli, I. Trajectory-based nonadiabatic dynamics with time-dependent density functional theory. ChemPhysChem 14, 1314–1340 **(2013)**.
16. Akimov, A. V., Neukirch, A. J. & Prezhdo, O. V. Theoretical insights into photoinduced charge transfer and catalysis at oxide interfaces. Chem. Rev. 113, 4496–4565 **(2013)**.
17. Cisneros, C., Thompson, T., Baluyot, N., Smith, A. C. & Tapavicza, E. The role of tachysterol in Vitamin D photosynthesis-a non-adiabatic molecular dynamics study. Phys. Chem. Chem. Phys. 19, 5763–5777 **(2017)**.

18. Maiti, B. *et al*. Photoinduced Homolytic Bond Cleavage of the Central Si-C Bond in Porphyrin Macrocycles Is a Charge Polarization Driven Process. J. Phys. Chem. A 120, 7634–7640 **(2016)**.

19. Dini, D., Hanack, M., Egelhaaf, H. J., Sancho-Garcia, J. C. & Cornil, J. Synthesis of axially substituted tetrapyrazinoporphyrazinato metal complexes for optical limiting and study of their photophysical properties. J. Phys. Chem. B 109, 5425–5432 **(2005)**.

20. Kim, P. *et al*. Ultrafast intramolecular energy relaxation dynamics of benzoporphyrins: Influence of fused benzo rings on singlet excited states. J. Phys. Chem. B 115, 3784–3792 **(2011)**.

21. Xu, Z., Gao, F., Makarova, E. A., Heikal, A. A. & Nemykin, V. N. Energy transfer from colloidal quantum dots to near-infrared-absorbing tetraazaporphyrins for enhanced light harvesting. J. Phys. Chem. C 119, 9754–9761 **(2015)**.

22. Liu, W., Kumar, M. R., Vicente, M. G. H., Fronczek, F. R. & Smith, K. M. New water-soluble phthalocyanines and other terapyrroles for application in photodynamic therapy. Opt. Methods Tumor Treat. Detect. Mech. Tech. Photodyn. Ther. XIV 5689, 39 **(2005)**.

23. Farley, C., Bhupathiraju, N. V. S. D. K., John, B. K. & Drain, C. M. Tuning the Structure and Photophysics of a Fluorous Phthalocyanine Platform. J. Phys. Chem. A 120, 7451–7464 **(2016)**.

24. Soldatova, A. V. *et al*. Effects of benzoannulation and α-octabutoxy substitution on the photophysical behavior of nickel phthalocyanines: A combined experimental and DFT/TDDFT study. Inorg. Chem. 46, 2080–2093 **(2007)**.

## Igor C. Morais, João L. P. Lisboa, José A. S. Neto, Karolina S. Gonçalves*, Oliver A. J. S. Filho & Rosemberg F. N. Rodrigues

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

E-mail: karol.souza948@gmail.com

# Revisão Sistemática da Utilização de Far-UVC e Ozônio no Combate à Covid-19 e demais Patógenos

Guilherme V. L. Silva, Gustavo M. Camargo, José A. S. Neto, Igor D. Borges, Cláudio F. Oliveira & Rosemberg R. F. Nunes

Frente ao desafio de explorar novos meios de uma mitigação eficiente e acessível para inativação de patógenos e limitar sua transmissão em ambientes ocupados por pessoas, surgiu a iniciativa desta investigação que teve como objetivo primário realizar uma revisão sistemática, buscando na literatura o estado da arte em relação à utilização de radiação UVC e Ozônio como agentes germicidas no combate de vírus e bactérias.Foram pesquisados nos bancos de dados trabalhos que continham as strings “UVC" AND "wave" AND "ultraviolet" AND "radiation" AND "light" AND" intensity" e também “ozone" AND "air" AND "disinfection" AND "virus" AND "bacteria" AND "environment" AND "decontamination" AND "air decontamination". A busca foi feita nas bases de dados ScienceDirect, Web of Science, pubMED, SciELO, Google Scholar e World Wide Science. Foram encontrados 189 artigos relacionados à utilização de UVC como agente germicida e 16 artigos acerca da utilização do ozônio, totalizando assim 205 artigos. Destes somente 44 foram selecionados para a revisão, os outros trabalhos não foram selecionados, pois não se enquadraram no critério de seleção, seja por possuir uma aplicação diferente da proposta pelo grupo, exemplo artigos que relacionavam a utilização da radiação UVC no tratamento de águas residuais ou por a data de publicação não se enquadrar no período de 2016 a 2020, nenhum artigo utilizando ambos os agentes germicidas ozônio e UVC foi encontrado. Entretanto, entres os artigos selecionados, foram relatadas informações importantes e promissoras para dar firmamento e veracidade às premissas adotadas pelos pesquisadores.

**Palavras-chave:** *SARS-COV2; esterilização; pandemia; corona; duo cannon.*

Faced with the challenge of exploring new means of efficient and accessible mitigation to inactivate pathogens and limit their transmission in environments occupied by people, the initiative for this investigation arose, which had as its primary objective to carry out a systematic review, searching the state of the art in relation to the use of UVC and ozone radiation as germicidal agents in the fight against viruses and bacteria. Researches were carried out in the databases that contained the strings “UVC" AND "wave" AND "ultraviolet" AND "radiation" AND "light" AND "intensity "and also" ozone "AND" air "AND" disinfection "AND" virus "AND" bacteria "AND" environment "AND" decontamination "AND" air decontamination ". The search was carried out in the ScienceDirect, Web of Science, pubMED, SciELO, Google Scholar and World Wide Science databases. 189 articles were found related to the use of UVC as a germicidal agent and 16 articles about the use of ozone, thus totaling 205 articles. Of these, only 44 were selected for the review, the other studies were not selected, as they did not fit the selection criteria, either because they have an application different from that proposed by the group, for example articles that related the use of UVC radiation in the treatment of wastewater. or because the publication date does not fall within the period from 2016 to 2020, no article was found using both the ozone and UVC germicidal agents. However, among the selected articles, important and promising information was reported to give firmament and veracity to the assumptions adopted by the researchers.

**Keywords:** *SARS-COV2; sterilization; pandemic; corona; duo cannon.*

# Introdução

Segundo um estudo publicado no The Lancet[1], na data de 01/12/2019 foi identificado o primeiro paciente com um surto de pneumonia viral que atingiria a cidade de 11 milhões de habitantes Wuhan, na China. Na data de 20 de dezembro, 19 dias depois do primeiro caso, segundo o relatório do governo chinês, publicado no South China Morning Post[2], o número de casos confirmados até este dia chegou a 60. Até esta data não havia evidências de transmissão de humano para humano do novo coronavírus. No dia 25 de dezembro, o dr. Lu Xiaohong, diretor do departamento de gastroenterologia do hospital número 5 de Wuhan, afirmou que havia suspeita de que membros da equipe médica de dois hospitais da cidade contraíram a pneumonia viral. Somente 24 dias depois, foi emitido um relatório confirmando a transmissão de humano para humano do novo coronavírus. Três meses depois, a organização mundial da saúde OMS decreta uma pandemia. Até o momento da elaboração desta revisão os números de casos em 23/11/2020 era de 58.425.681 casos confirmados e 1.385.218 mortes contabilizados pela OMS dados esses que podem ser acessados no dashboard Figura 1 disponível no site da OMS[3].

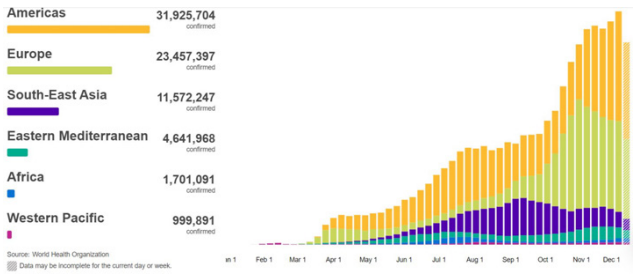



**Figura 1:** Evolução do Covid-19 no mundo. **Fonte:** Organização mundial da saúde[3]

Mesmo havendo pesquisas promissoras, atualmente, não há medicamentos antivirais licenciados pela Food andDrugAdministration (FDA) dos Estados Unidos, pela European Medicines Agency (EMA), pela Spanish Agencyof Medicines and Medical Devices (AEMPS) ou pela Italian Drug Agency para tratar pacientes com COVID-19. Nenhum medicamento antiviral para tratar pacientes com COVID-19 foi licenciado em qualquer país do mundo até agora. Assim como a pandemia de COVID-19 veio após a crise de sars de março de 2003, a comunidade científica sabe que novas pandemias virão após a COVID-19. Sendo assim, é extremamente importante explorar tecnologias de mitigação prática para inativação dos agentes patogênicos transportados pelo ar em locais públicos, limitando, assim, a transmissão aérea[4-6].

Um dos processos mais utilizados para a prevenção de transmissão de patógenos transportados pelo ar é a ventilação forçada, que elimina prontamente os organismos infecciosos pelo aumento na taxa de troca de ar, essa abordagem não é completamente eficaz. Atualmente, os filtros de ar com alta eficiência na separação de partículas (HEPA) são as alternativas que possuem maior eficiência, entretanto é uma premissa com alto custo de funcionamento[7,8]. As alternativas a serem exploradas no decorrer deste trabalho serão a utilização de espectro de luz UVC e o gás oxidante ozônio.

## OZÔNIO

O ozônio ($O_3$) é um gás instável que compreende três átomos de oxigênio produzidos naturalmente na estratosfera pela ação fotoquímica dos raios ultravioleta sobre as moléculas de oxigênio[8,9]. Esses raios são

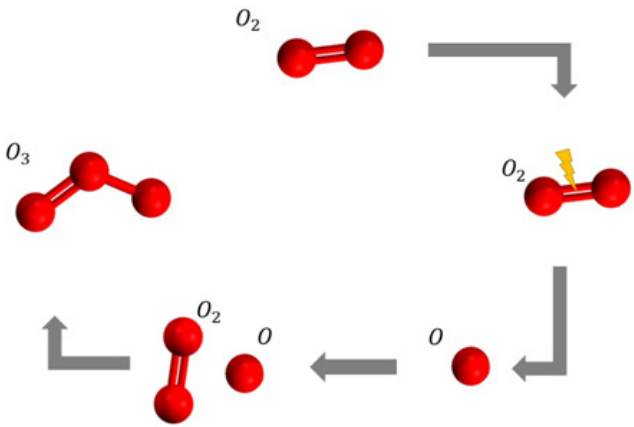



**Figura 2:** Processo de síntese de ozônio. **Fonte:** Autores

suficientemente intensos para separar os dois átomos que compõem a molécula de (O2) produzindo assim o oxigênio atômico Figura 2. A produção de ozônio é realizada numa etapa imediatamente posterior, resultando da associação de um átomo de oxigênio e uma molécula de (O2) na presença de um catalisador[8].

É um gás oxidante poderoso e com ação microbicida eficaz, isto é, elimina bactérias, fungos e vírus em superfícies e líquidos[10,11]. A utilização do ozônio em tratamentos de águas residuais está documentada e demonstra aplicações na maioria das cidades modernas[8,12]. Embora os estudos acerca da utilização do ozônio para esterilizar superfícies ainda sejam limitados, resultados experimentais já provaram que a utilização do ozônio é uma alternativa eficaz para desinfetar ar e superfícies[13]. De acordo com o artigo "Bactericidal Effects of High Airbone Ozone Concentrations In Escherichia coli na Staphylococcus aureus" escrito pelos pesquisadores W.J kowalski, W.P Bashnfleth e T.S. Whittam, foram investigados os efeitos bactericidas de altas concentradores de ozônio nas bactérias bacilar Escherichia coli e na bactéria Staphylococcus aureus frequentemente encontrada na pele e fossas nasais de pessoas. Essa pesquisa concluiu que mais de 99,99% da taxa de mortalidade foi alcançada para ambas as espécies após a exposição ao Ozônio[12]. Além da capacidade oxidante do gás ozônio, as suas propriedades também colaboram para ser um desinfetante aéreo ideal, em contraste com a radiação ultravioleta, troca de ar e filtros HEPA, o ozônio é um gás que pode facilmente penetrar em todos os cantos de um ambiente fechado, sendo assim pode esterilizar de forma eficaz[8]. Por conta da instabilidade do gás ozônio, ele é rapidamente convertido em oxigênio, não deixando nenhum resíduo prejudicial após a desinfecção[8].

Os átomos ou radicais livres do oxigênio são altamente reativos e oxidantes, oxidando quase tudo, incluindo vírus, bactérias, compostos orgânicos e não orgânicos em contato, tornando o ozônio um desinfetante e oxidante poderoso[11]. O ozônio é um oxidante muito mais forte do que outros desinfetantes comumente utilizados, como o cloro e o hipoclorito[8]. O uso de cloro ou hipoclorito em muitos países diminuiu significativamente devido à possibilidade de formação de subprodutos carcinogênicos, como trihalometanos (THM) durante processo de desinfecção[8]. Em contraste, a desinfecção com ozônio não produz resíduos prejudiciais e todo o ozônio residual será convertido de volta em oxigênio em um curto espaço de tempo[8]. O ozônio é, portanto, considerado um desinfetante ambientalmente correto[8]. Dada sua força e eficácia superiores como oxidante e biocida, o ozônio se torna uma das tecnologias de tratamento de água dominantes na Europa e na América. Mas sua aplicação na desinfecção do ar não é tão popular quanto a água devido à preocupação com a toxicidade do ozônio[8,14.] O ozônio com concentração superior a 1ppm (parte por milhão, 1 *ppm* é igual a 1 $g/m^3$ grama por metro cúbico) causa efeitos adversos à saúde humana e o uso de ozônio para desinfecção do ar geralmente não é recomendado se houver pessoas por perto[8]. Portanto, a desinfecção do ar com ozônio deve ser restrita apenas a salas desocupadas.

**UVC**

O espectro de luz UVC nada mais é que uma onda eletromagnética, na qual transportam uma quantidade de energia mínima, em proporção inversa ao seu comprimento de onda[15]. Sendo assim, quanto menor for o comprimento de onda, mais energética será a radiação transportada por ela. A radiação ultravioleta UV representa parte do espectro eletromagnético com o comprimento de onda menor que o da luz violeta, ou seja, uma faixa imediatamente mais energética do que a luz visível[16-18]. Devido à quantidade de energia transportada nas ondas UV, elas estão no limite denominado Região ionizante do espectro eletromagnético, isso indica que as ondas possuem condições de formar íons, o que significa ter condições de causar danos a moléculas de DNA[19,20].

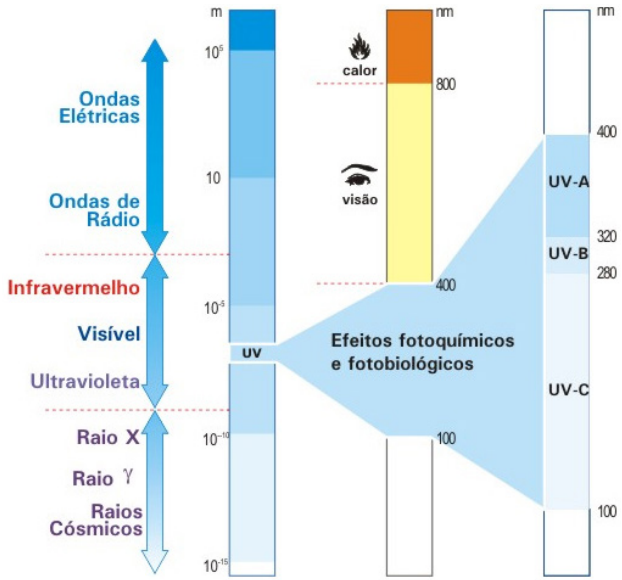



**Figura 3:** Divisões das energias eletromagnéticas. **Fonte:** Akari lâmpadas especiais e leds IR UV[21]

Como pode ser visto na Figura 3, o espectro ultravioleta se situa entre a luz visível e os raios X. Pode se verificar que ela se divide em três regiões: UV-A, UV-B e UV-C. o espectro UVA (radiação de ondas longas) possuindo comprimento de 315 nm (nanômetro) até 400nm, UVB (radiação de ondas médias) 280nm até 315 e UVC(radiação de ondas curtas) de 100nm a 280nm[22-27]. A ação germicida da radiação UV se dá na região UV-C e no comprimento de onda de 208nm a 254nm, fora dessa região, a ação germicida é reduzida[18,22,24,28,29].

Esse espectro de luz possui duas fontes: natural ou artificial, sendo a fonte natural o Sol que gera os espectros UV-A, UV-B e UV-C e como fonte artificial, as lâmpadas. As lâmpadas com comprimento de onda longos e médios são utilizadas para bronzeamento artificial e luz negra, muito comum em decoração de ambientes. Já as lâmpadas de ondas curtas UV-C são destacadas por promoverem a ação germicida[17,22,23,30,34].

Quando a radiação UV interage com uma entidade biológica, seja uma bactéria, uma célula da nossa pele ou até um vírus, por ser ionizante, ela tem condições de causar danos ao material genético[19,20]. Dependendo dos fatores de exposição que foi comentado, esse processo pode matar a célula, a bactéria ou desativar um vírus[22,35,36].

Como pode ser visto nas Figuras 4 e 5, ao adentrar ao interior dos microrganismos, à radiação UVC provoca um dano fotoquímico instantâneo no DNA[37] (ácido nucleico – material genético essencial para todos os seres vivos) essa alteração no DNA causa efeito esterilizante independente do ambiente que esses organismos se encontram seja água ou ar[22,36,38,39].

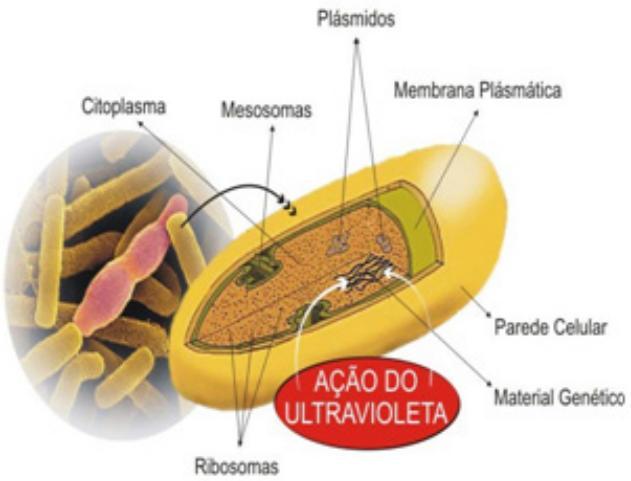



**Figura 4:** Local de ação do espectro UVC nas células de um vírus. **Fonte:** Fabricante de lâmpadas AKARI[21]

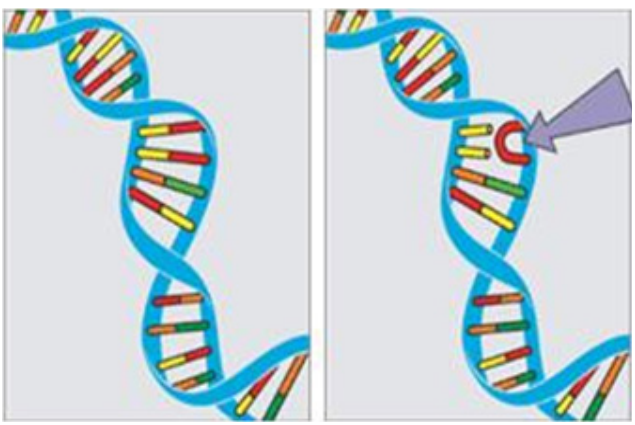


**Figura 5:** Ação do espectro UVC em uma estrutura de DNA. **Fonte:** Fabricante de lâmpadas AKARI[21]

Apesar do uso das lâmpadas UVC de 254 *nm* para esterilização não deixar nenhum resíduo, é de conhecimento do meio acadêmico que esse comprimento de onda é prejudicial à pele e aos olhos, pois a exposição a radiações ionizantes tem poderes cancerígenos e catarogênicos[40-42]. Os efeitos mais críticos em humanos e cobaias animais (geralmente ratos) é o câncer cutâneo causado por genotoxicidade[40].

Em tese, o Far- UVC é a luz ultravioleta que abrange o comprimento de onda de 207 a 222 *nm*, o qual mostrou-se tão eficiente quanto a luz ultravioleta germicida convencional em inativar microorganismos, mas não tem os problemas de saúde humana associados à luz ultravioleta germicida convencional. A explicação biofísica é que, devido ao seu curto intervalo em material biológico, a luz UVC (207 a 222 *nm)* não consegue penetrar no estrato córneo humano (camada externa de células mortas, espessura de 5 – 20 $\mu m$) nem mesmo no citoplasma das células de indivíduos humanos[22,40,41,43]. Resumindo, a razão é que o Far-UVC tem um alcance em materiais biológicos de apenas alguns micrômetros e, portanto, não pode alcançar células humanas vivas na pele ou nos olhos[22,38,44].

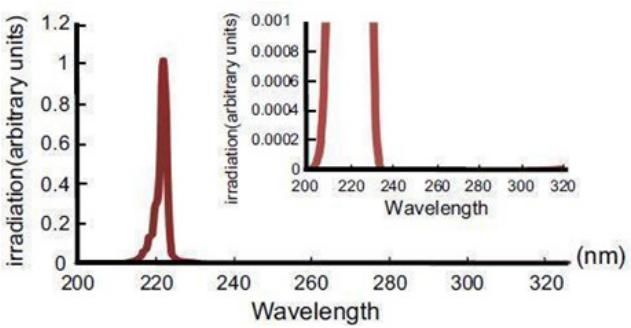



**Figura 6:** Espectro medido de um irradiador (Lâmpada UVC 222 *nm*). Região UVC: a quantidade de UV de 230 – 235 *nm* é 0,26% da quantidade de UV de 200 – 230 *nm,* e a quantidade de UV de 235 – 280 é 0,13% da quantidade de UV de 200 – 230. Região UVB, a quantidade de UV de 280 – 320 *nm* é 0,04% da quantidade de UV de 200 – 230 *nm*[44]. **Fonte:** Long-term Effects of 222 – *nm* ultraviolet radiation C Sterilizing Lamps on Mice Susceptible to Ultraviolet Radiation[44].

Mas como partículas nocivas são extremamente pequenas, o Far-UVC ainda pode penetrá-los e destruí-los[17,22]. Até agora, a luz UVC tem quase as mesmas propriedades germicidas altamente eficazes da luz UV, mas sem os riscos para a saúde humana associados. Vários grupos propuseram que a luz Far-UVC (207 a 222 *nm*), que pode ser gerada usando lâmpadas, é uma tecnologia antimicrobiana eficiente e segura que pode ser implantada em locais públicos ocupados[26,45,47].

# Metodologia

Essa pesquisa foi desenvolvida a partir de uma revisão sistemática, no qual foram realizadas buscas na literatura científica durante os meses de julho a novembro de 2020. Para a elaboração desta revisão sistemática, utilizou-se, em primeiro momento, a definição do objetivo geral, a solução do problema apresentado na introdução é como base de estudo, os artigos encontrados na literatura. Sendo assim, foram realizadas buscas nas bases de dados ScienceDirect, Web of Science, pubMED, SciELO, Google Scholar e World Wide Science, escolhidas por apresentarem a ferramenta que destaca e filtra as publicações relevantes para o tema. Após a leitura do artigo de embasamento "Far-UVC light (222 nm) efficiently and safe lyinactivates airborne human coronaviruses" a fim de filtrar as principais palavras chave, assim facilitaria o processo de triagem para a escolha dos artigos, limitando a quantidade de trabalhos e concentrando naqueles mais relevantes para o tema.

Durante esse processo, foram utilizados os termos "uvc" AND "wave" AND "ultraviolet" AND "radiation" AND "light" AND "intensity" para a busca dos artigos relacionados a UCV e para a busca de artigos relacionados a ozônio foram utilizados "ozone" AND "air" AND "disinfection" AND "virus" AND "bacteria" AND "environment" AND "decontamination" AND "airdecontamination". Assim, foi definidas as strings de busca, na qual funcionasse corretamente com os operadores lógicos AND e OR, além de ser aplicável em todas as bases de busca. Tais strings se limitaram a apresentar termos como desinfecção (disinfection), radiação (radiation),

ultravioleta C (UVC), ozônio (ozone) e descontaminação do ar (air-decontamination). Destacando que para a pesquisa filtraram -se somente os artigos científicos de língua inglesa por conta de a literatura brasileira ser limitada acerca do tema, além de limitar o período de busca em 4 anos visando coletar somente informações mais recentes.

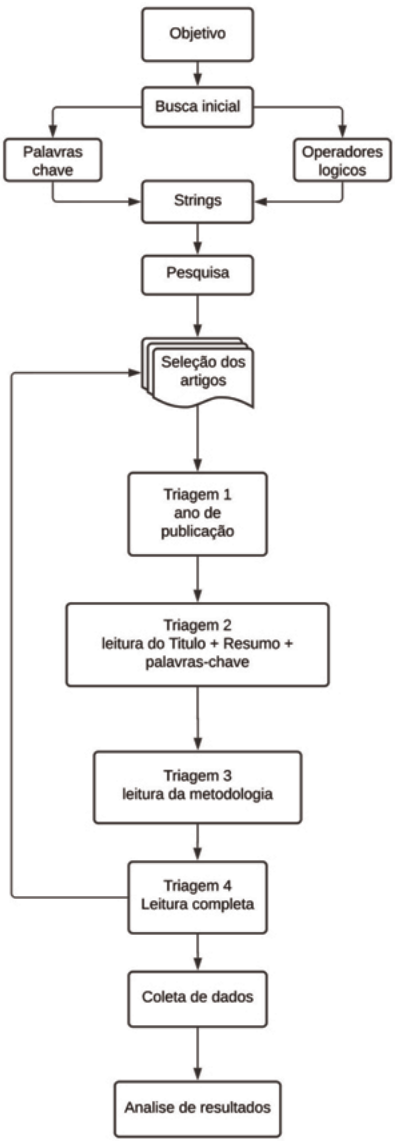



**Figura 7:** Fluxograma de seleção de artigos. **Fonte:** Autores

Como critério de inclusão buscou-se filtrar as publicações por 3 filtros distintos, conforme descrito no fluxograma da Figura 7. No primeiro filtro foi realizada a leitura parcial do artigo, sendo lido título, resumo e palavras-chave, com o propósito de identificar semelhanças entre o objetivo da revisão sistemática e o artigo lido.

No segundo, para os artigos que passaram no primeiro filtro foi feita a leitura da metodologia, tendo como objetivo escolher produções científicas que demonstram uma parte experimental mais elaborada. Por fim, no terceiro e último filtro, foi realizada a leitura completa dos artigos, com o propósito de coletar as informações chaves que se ligam ao objetivo proposto desta revisão. Para mais, durante esta etapa observaram-se os critérios de qualificação como a quantidade de citações, qualidade do periódico, ano de publicação, variabilidade de amostragem do experimento e H-Index da autoria. Para a aplicação de ambos os critérios se utilizou a ferramenta StArt, na qual facilita a separação dos artigos em cada fase.

# Resultados

Por meio de busca preliminar na bibliografia, foram encontrados cerca de 205 artigos, conforme mostra a Figura 8, contemplando as bases de buscas utilizadas, conforme critérios de escolha expostos na metodologia.

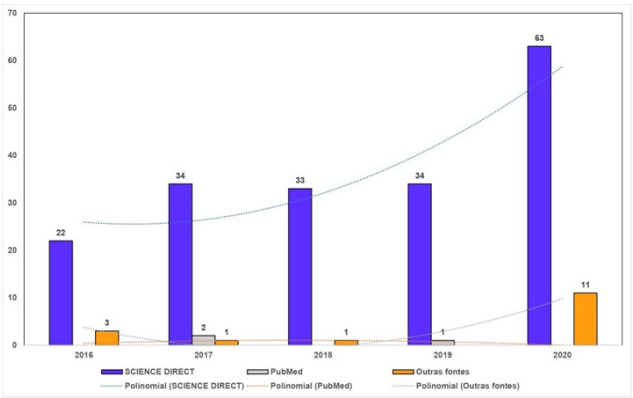



**Figura 8:** Publicações por plataformas. **Fonte:** Autores

A curva de tendência de publicações aumentou nos últimos anos, visto que a preocupação com agentes patológicos é algo bastante atual. A disseminação desses agentes é feita rapidamente devido à globalização e à facilidade do acesso ao transporte por todas as classes. Aplicando os critérios descritos na metodologia, foi possível realizar uma filtragem dos 205 artigos para 44 catalogados na Tabela 1, contendo um extrato simplificado de cada publicação com título do trabalho, revista publicada, Qualis, número de citações, autor principal e ano de publicação. Nota-se os trabalhos que possuem grande relevância para o desenvolvimento dessa pesquisa foram publicados em revistas em sua grande maioria com Qualis A e algumas de peso, como Nature, contendo diversas citações, mostrando a tamanha relevância dos resultados publicados.

Dos artigos selecionados para leitura, foi feito um teorema de pareto demonstrando o interesse de cada país no assunto vigente, representado no gráfico da Figura 9.

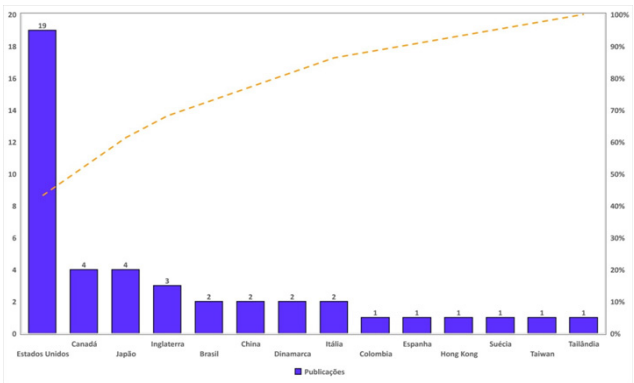



**Figura 9:** Publicações selecionadas por países. **Fonte:** Autores

Com a recente descoberta da Covid-19, uma variação do sars vírus que tem a capacidade de permanecer infeccioso em superfícies por longos períodos, indica ser um vírus resistente quando comparado com outros vírus envelopados (vírus que possuem externamente uma camada lipídica)[13,48]. Previsivelmente, desinfetantes como alvejantes, fenol e formaldeídos foram considerados eficazes na desativação do vírus; os detergentes, entretanto, foram menos eficientes[10]. O ozônio oferece a vantagem de por conta de ser um gás, sua capacidade de adentrar e desinfetar espaços de difícil acesso[8,13,48]. Além disso, o gás ozônio $O^3$ possui uma vida útil relativamente baixa revertendo-se para oxigênio após uma hora[8].

No artigo Ozone Disinfection of SARS-Contaiminated Areas escrito pelos pesquisadores Kenneth K. K. LAM B.Sc. (Hons), M. Phil.[8]com o propósito de testar a eficácia do ozônio $O^3$ na redução de formação de colônias de bactérias transportadas pelo ar, uma sala de $12m^2$ de área foi escolhida para o teste[8]. Por conta do ozônio em altas quantidades ser prejudicial a sala foi evacuada antes do experimento. Para as dimensões da sala, foi utilizado um gerador de ozônio com vazão de saída de 2g/h, este gerador tem a capacidade de manter altas concentrações de ozônio (0,5 – 5 ppm) no interior da sala (Figura 10)[8]. Foi utilizado também um ventilador para garantir uma boa distribuição de ozônio. Após fechar todas as portas e janelas, o gerador foi ligado por um dispositivo remoto localizado do lado de fora para iniciar o processo de ozonização[8]. A concentração de ozônio foi monitorada através de um sensor digital. Foram testados 3 níveis diferentes de ozônio sendo eles 0,5, 2,5 e 5 *ppm* (*ppm* parte por milhão, 1 *ppm* é igual 1 $g/m^3$)[8]. Após o desligamento do gerador, o nível de ozônio na sala começou a cair gradativamente a medida que estava se auto decompondo em oxigênio[8]. Por razões de segurança, só foi liberada a entrada de pessoas na sala quando o nível de ozônio no ambiente estava abaixo de 0,02 ppm[8]. Em geral, a concentração de ozônio demora cerca de 60 minutos para atingir concentrações seguras após o desligamento do gerador[8].

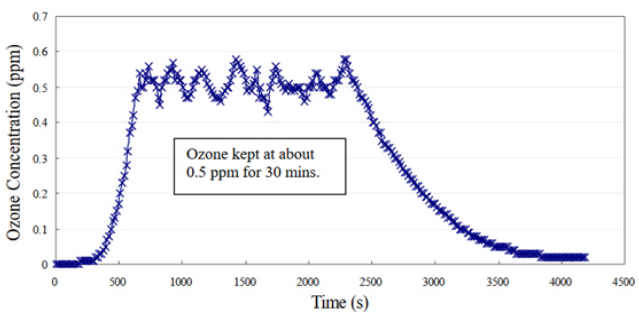



**Figura 10:** Processo de ozonização (0.5 ppm por 30 minutos.). **Fonte:** Yang J-H, Wu U-I, Tai H-M, Sheng W-H. Effectiveness of an ultraviolet-C disinfection system for reduction of healthcare-associated pathogens. J Microbiol Immunol Infect. 2019;52(3):487-493. doi:10.1016/j.jmii.2017.08.017[8]

**Tabela 1:** Resultado dos artigos catalogados. **Fonte:** Autores

| TÍTULO | REVISTA | QUALIS | CITAÇÕES | AUTOR PRINCIPAL | ANO |
|---|---|---|---|---|---|
| Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses | Nature | A1 | 48 | Manuela Buonanno | 2020 |
| Improving Indoor Air Quality through the Use of Ultraviolet Technology in Commercial Buildings | Sciencedirect | A2 | 8 | Danielde Robles P.E. | 2017 |
| Efficacy of manual cleaning and an ultraviolet C room decontamination device in reducing health care–associated pathogens on hospital floors | American Journal of Infection Control | A1 | 15 | AishatMustapha | 2018 |
| Investigation of ultrafast optical nonlinearities in novel bis-chalcone derivatives | OPTICS AND LASER TECHNOLOGY | A1 | 2 | YongYang | 2020 |
| Ozone Disinfection of SARS-Contaiminated Areas | PLOS ONE | A1 | 17 | Marie-Eve Dubuis | 2020 |
| Ozone and oxidation therapies as a solution to the emerging crisis in infectious disease management: A review of current knowledge and experience | Medical GasResearch | B2 | 15 | Robert Jay Rowen | 2019 |
| Inactivation of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) by gaseous ozone treatment | Journalof Hospital Infection | B2 | 0 | H. Yano | 2020 |
| On airborne transmission and control of SARS-Cov-2 | Science of The Total Environment | A1 | 37 | Maosheng Yao | 2020 |
| Bactericidal Effects of High Airborne Ozone Concentrations on Escherichia coli and Staphylococcus aureus | Ozone: Science & Engineering | A2 | 107 | Wladyslaw J. Kowalski | 1997 |
| Potential Cytoprotective Activity of Ozone Therapy in SARS-CoV-2/COVID-19 | ANTIOXIDANTS | B1 | 32 | Gregorio Martínez-Sánchez | 2020 |

**Tabela 1:** Resultado dos artigos catalogados. **Fonte:** Autores - *continuação*

| TÍTULO | REVISTA | QUALIS | CITAÇÕES | AUTOR PRINCIPAL | ANO |
|---|---|---|---|---|---|
| Ozone efficacy for the control of airborne viruses: Bacteriophage and norovirus models | PLOS ONE | A1 | 17 | Marie-Eve Dubuis | 2020 |
| A novel upper-room UVC-LED irradiation system for disinfection of indoor bioaerosols under different operating and airflow conditions | Journal of Hazar dous Materials | A1 | 1 | SundayS.Nunayon | 2020 |
| In-Room Ultraviolet Air Filtration Units Reduce Airborne Particles During Total Joint Arthroplasty | journal of orthopaedicre search | A2 | 1 | Hiba K Anis | 2020 |
| Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans | PLOS ONE | A1 | 3 | Tomoaki Fukui | 2020 |
| Disinfection of Pseudomonas aeruginosa biofilm contaminated tube lumens with ultraviolet C light emitting diodes | Biofouling | A1 | 42 | Jimmy Bak | 2010 |
| Impact of an ultraviolet air sterilizer on cardiac surgery patients, a randomized clinical trial | medicina clinica | B2 | 2 | María Heredia-Rodríguez | 2018 |
| Enhanced terminal room disinfection and acquisition and infection caused by multidrug-resistant organisms and Clostridium difficile (the Benefits of Enhanced Terminal Room Disinfection study): a cluster-randomised, multicentre, crossover study | The Lancet | A1 | 187 | DJ Anderson | 2017 |
| 207-nm UV light - A promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. II: In-vivosafetystudies | PLOS ONE | A1 | 47 | M Buonanno | 2016 |
| Decontamination and reuse of N95 filtering facemask respirators: A systematic review of the literature | American Journal of Infection Control | A1 | 16 | CE Rodriguez-Martinez | 2020 |

**Tabela 1:** Resultado dos artigos catalogados. **Fonte:** Autores - *continuação*

| TÍTULO | REVISTA | QUALIS | CITAÇÕES | AUTOR PRINCIPAL | ANO |
|---|---|---|---|---|---|
| Shining a light on the pathogenicity of health care providers' mobile phones: Use of a novel ultraviolet-C wave disinfection device | American Journal of Infection Control | A1 | 3 | S Malhotra | 2020 |
| Can ultraviolet light C decrease the environmental burden of antimicrobial-resistant and -sensitive bacteria on textiles? | veterinarydermatology | B1 | 4 | JJ Bentley | 2016 |
| Time Effectiveness of Ultraviolet C Light (UVC) Emitted by Light Emitting Diodes (LEDs) in Reducing Stethoscope Contamination | INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH | A2 | 28 | Gabriele Messina | 2016 |
| Ultraviolet Light Fights New Virus | Engineering | A1 | 2 | Dana Mackenzie | 2020 |
| Disposable masks: Disinfection and sterilization for reuse, and non-certified manufacturing, in the face of shortages during the COVID-19 pandemic | Safety Science | A1 | 39 | JC Rubio-Romero | 2020 |
| Ultra violet germicidalir radiation of influenza-contaminated N95 filteringfacepiecerespirators | American Journal of Infection Control | A1 | 158 | D Mills | 2018 |
| Applications of ultraviolet germicidal irradiation disinfection in health care facilities: Effective adjunct, but not stand-alone technology | American Journal of Infection Control | A1 | 135 | F Memarzadeh | 2010 |
| Effectiveness of an ultraviolet-C disinfection system for reduction of healthcare-associated pathogens | Journal of Microbiology, Immunology and Infection | A2 | 23 | Jui-Hsuan Yang | 2019 |
| Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases | Nature | A1 | 114 | D Welch | 2018 |
| Evaluation of a low-intensity ultraviolet-C radiation device for decontamination of computer keyboards | American Journal of Infection Control | A1 | 8 | AA Shaikh | 2016 |

**Tabela 1:** Resultado dos artigos catalogados. **Fonte:** Autores - *continuação*

| TÍTULO | REVISTA | QUALIS | CITAÇÕES | AUTOR PRINCIPAL | ANO |
|---|---|---|---|---|---|
| Microbiological evaluation of UV disinfection effectiveness in a specialist cystic fibrosis clinic | Journal of Cystic Fibrosis | A2 | 1 | O Allen | 2019 |
| The uses and limitations of a hand-held germicidal ultraviolet wand for surface disinfection | Journal of Occupational and Environmental Hygiene | - | 4 | G Byrns | 2017 |
| Effectiveness of ultraviolet-c light and a high-level disinfection cabinet for decontamination of n95 respirators | PATHOGENS AND IMMUNITY | - | 37 | JL Cadnum | 2020 |
| THE STRUCTURE OF DNA | HARBOR SYMPOSIA ON QUANTITATIVE BIOLOGY | B1 | 2048 | JD Watson | 1953 |
| Further evidence that far-UVC for disinfection is unlikely to cause erythema or pre-mutagenic DNA lesions in skin. | PHOTODERMATOLOGY, PHOTOIMMUNOLOGY & PHOTOMEDICINE | B1 | 6 | Isla Rose Mary Barnard | 2020 |
| Ultraviolet-C decontamination of a hospital room: Amount of UV light needed | Burns | A2 | 18 | Marie Lindblad | 2020 |
| Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses | Nature | A1 | 48 | Manuela Buonanno | 2020 |
| Norovirus recovery from floors and air after various decontamination protocols | Journal of Hospital Infection | B2 | 4 | C L Ciofi-Silva | 2019 |
| Clinical, operational, and financial impact of an ultraviolet-C terminal disinfection intervention at a community hospital | American Journal of Infection Control | A1 | 10 | Robert Raggi | 2018 |
| Ultraviolet C light with wavelength of 222 nm inactivates a wide spectrum of microbial pathogens | Journal of Hospital Infection | B2 | 7 | Kouji Narita | 2020 |

**Tabela 1:** Resultado dos artigos catalogados. **Fonte:** Autores - *continuação*

| TÍTULO | REVISTA | QUALIS | CITAÇÕES | AUTOR PRINCIPAL | ANO |
|---|---|---|---|---|---|
| Long-term Effects of 222-nm ultraviolet radiation C Sterilizing Lamps on Mice Susceptible to Ultraviolet Radiation | Photochemistry and Photobiology | A1 | 12 | NozomiYamano | 2020 |
| Efficacy of an automated ultraviolet C device in a shared hospital bathroom | American Journal of Infection Control | A1 | 10 | Jesse Cooper | 2016 |
| Viability evaluation of layered cell sheets after ultraviolet light irradiation of 222 nm | Regenerative Therapy | | 0 | Nami Hanamura | 2020 |
| Comparative effectiveness of rapid-cycle ultraviolet decontamination to chemical decontamination on high-touch communication devices | American Journal of Infection Control | A1 | 1 | Marisol Resendiz | 2019 |
| Bioactive Lipids in COVID-19-Further Evidence | Archivesof Medical Research | A2 | 2 | Einstein, A., B. Podolsky | 2020 |
| Characterization of Ozone Disinfection of Murine Norovirus | ASM | A2 | 67 | MY Lim | 2010 |

A quantidade de bactérias transportadas pelo ar na sala foi medida antes e após cada processo de ozonização, essa medição foi realizada utilizando um exibidor de estágio único Andersen N-6 com Agar em uma placa de petri[4]. Para cada amostragem, foram coletados 283 litros de ar[8]. A placa de petri foi incubada a 35 °C por 48 horas antes da contagem8. A eficiência da desinfecção através do ozônio em diferentes concentrações pode ser observada na Tabela 2[8].

**Tabela 2[8]:** Redução de bactérias transportadas pelo ar após ozonização. **Fonte:** Autores

| Concentração de ozônio (0,5 ppm) | 0,5 | 2,5 | 5 |
|---|---|---|---|
| Antes da ozonização (CFU/m³) | 592 | 612 | 552 |
| Depois da ozonização (CFU/m³) | 169 | 42 | 57 |
| Redução (%) | 71,5 | 93,1 | 89,6 |

Os resultados mostram que o ozônio é eficaz na redução de bactérias transportadas pelo ar[8]. No nível de ozônio mais alto, o efeito de esterilização aumentou mais de 90% do ar, assim as bactérias podem ser reduzidas na concentração de 2,5 ppm[4]. O aumento de concentração de ozônio para 5 ppm não foi benéfico na redução de bactérias[8]. No artigo Bactericidal Effects of High Airborne Ozone Concentrationson Escherichia coli and Staphylococcus aureus escrito pelos pesquisadores WJ Kowalski,WPBahnfleth ETS Whittam que realizaram um experimento semelhante expondo placas de petri com Escherichia coli e Staphylococcus aureus a concentrações altas de ozônio, neste segundo experimento, foi alcançada uma taxa de mortandade superiores a 99,99% para ambas as espécies[12]. A diminuição da taxa de mortalidade do primeiro experimento se dá pelo fato de que a sala

testada não estava 100% vedada, pois a porta era aberta brevemente após cada amostragem de ar para a troca das placas de petri ou seja era inevitável a troca de ar[12]. Embora a temperatura e o ph do ozônio sejam um fator crucial na eficácia do ozônio como agente germicida o artigo Characterization of Ozone Disinfection of Murine Norovirus afirma que, tanto a 20 ° C quanto a 5 ° C, o a taxa de inativação foi maior em pH 5,6 do que em pH 7, isso diferença foi significativa com base no modelo EFH (P 0,05 pelo teste F)49. O MNV foi inativado pelo ozônio mais rapidamente em temperaturas mais baixas do que em temperaturas mais altas, mas a diferença não foi significativa[49].

Em contrapartida, os pesquisadores H. Yano R. Nakano Y. Suzuki A. Nakano K. Kasahara H. Hosoi que realizaram um experimento semelhante aos citados, porém utilizando uma cepa de SARS-CoV-2, que foi isolada e fornecida pelo National Institute of Infectious Diseases, Japan[10]. As culturas de vírus foram colhidas por dois ciclos de congelamento e descongelamento e clarificadas por centrifugação de 10.000 g por 15 min a 4 ° C[22]. Sendo submetido o sobrenadante à ultrafiltração, as placas foram deixadas secar antes da exposição ao gás ozônio e expostas ao ozônio imediatamente após a secagem. As placas foram colocadas em uma caixa de acrílico hermética à prova de ozônio (altura: 23 cm, profundidade: 30 cm, largura: 40 cm) com o dispositivo gerador de gás ozônio (TM-04OZ; Tamura TECO Ltd., Japão) e tinham 15 cm longe do dispositivo[10]. As placas foram então expostas a uma concentração de 1,0 ppm de ozônio por 60 minutos (concentração-tempo e 6,0 ppm de ozônio a 55 min, à temperatura de 25 ° C e umidade relativa de 60-80%30. Em cada experimento, placas colocadas por 60 ou 55 minutos sem exposição ao ozônio foram usadas como controle. Este estudo foi conduzido em um laboratório BSL-3 na Nara Medical University[10]. O ensaio de placa antes da exposição ao ozônio foi de 1,7 × 107 pfu / mL. O título após a exposição de 1,0 ppm de ozônio em 60 min foi 1,7 × 104 em comparação com 5,8 × 105 pfu / mL para o controle10. Após a exposição a 6,0 ppm de ozônio em 55 min, o título foi menor ou igual a 1,0 × 103 pfu / mL, em comparação com 2,0 × 106 pfu / mL para o controle[10]. O título diminuiu significativamente após a exposição ao ozônio, sugerindo que o ozônio inativou o SARS-CoV-210.

Revisando a bibliografia, assim como o ozônio o uso do espectro C do ultravioleta, elimina agentes patogênicos, pois passa através da parede celular destruindo o material genético do mesmo, no qual a onda 222 – *nm*, contém características germicidas sem provocar problemas de saúde aos humanos expostos, porém apresenta um problema de dimensionamento em que a exposição para determinados sistemas é diferente, para sítios com humanos, a exposição recomendada é cerca de 500 [mJ/cm²], demandando mais tempo para maior eficácia do sistema[4,17,44,45].

Segundo o artigo por Fukui, T. *et al*.Exploratory clinical trial on the safety and bactericida lef fect of 222 – *nm* ultraviolet C irradiation in healthy humans, um experimento foi desenvolvido com 20 voluntários saudáveis com objetivo de testar a exposição ao UVC17. O dorso dos voluntariados foi irradiado com UVC 222 – *nm* a *50 – 500* [*mJ / cm*²] e o eritema induzido (vermelhidão da pele) foi avaliado. Posteriormente, o dorso dos voluntários foram irradiados com quantidade máxima de UVC não causando eritema, e os swabs de pele antes e após a irradiação foram cultivados[17]. O número de colônias formadas após 24 horas foi medido, além disso, o dímero de ciclobuteno pirimidina (CPD) como um indicador de dano ao DNA foi medido usando tecidos da pele das regiões não irradiadas e irradiadas[17]. Todos os indivíduos não apresentaram eritema em todas as doses. As costas dos voluntários foram irradiadas a*500* [*mJ / cm*²], e o número de colônias bacterianas encontrados nos swabs foi significativamente diminuído pela irradiação UVC de 222 – *nm* como pode ser visto na Figura 11[17]. A quantidade de CPD produzida na região irradiada foi ligeiramente, mas significativamente maior do que na região não irradiada[17].

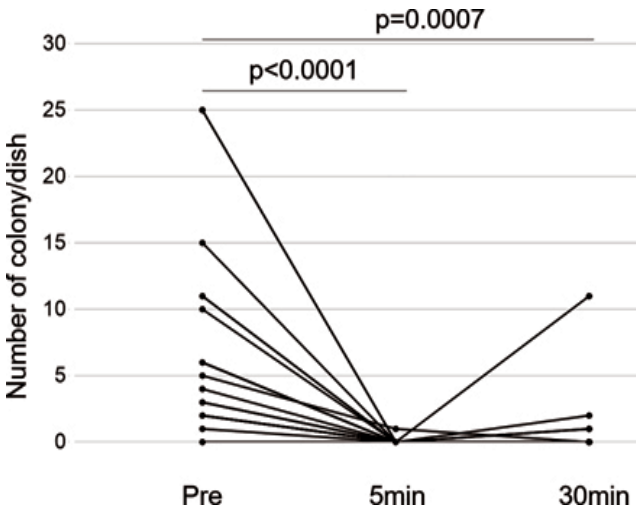



**Figura 11**: Número de colônias bacterianas em suspensão no swab. **Fonte:** Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans[17].

Na Figura 12, é demonstrado o processo experimental realizado pelos pesquisadores Manuela Buonanno, David Welch, Igor Shuryak& David J. Brenner publicados na revista Nature, no qual foram irradiados por FAR UVC células pulmonares infectadas a partir de alfa e beta HCOV[4]. A fluorescência verde indica qualitativamente as células infectadas e em azul DAPI é um marcador fluorescente que se liga fortemente a regiões de DNA ricas em adenina-timina[4]. Os resultados do experimento sugerem que ambas as cepas de coronavírus estudadas têm alta sensibilidade semelhante a UVC distante ativação[4]. A regressão linear robusta produziu intervalos de confiança de 95% sobrepostos para a taxa de inativação coronavírus têm tamanhos genômicos semelhantes, o que é um determinante primário da sensibilidade UVC, é razoável esperar que a luz UVC distante mostre uma eficiência de inativação semelhante contra todos os coronavírus humanos, incluindo SARS-CoV-2. Os dados obtidos neste experimento são consistentes com esta hipótese[4].

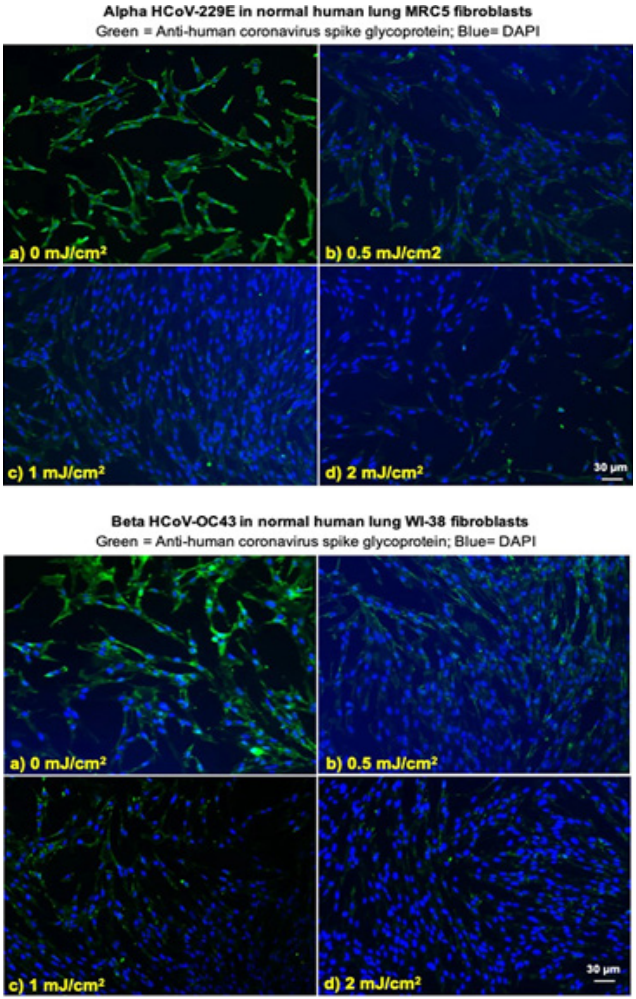



**Figura 12:** Ação da radiação UVC (222nm) em secreção pulmonar infectada com alfa e beta HCoV. **Fonte:** Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses[4]

O mesmo experimento foi feito com ratos por outro grupo de pesquisadores, em que as cobaias foram expostas a diversas ao comprimento de onda de 222 *nm*, 254 *nm* e BB-UVB44. Na Figura 13, é possível identificar que o espectro de 222 não causou nenhuma resposta inflamatória na pele quanto nos olhos, diferente do comprimento de onda BB-UVB (305 – 325 *nm*) que é notória a formação de inflamação na retina e na derme da cobaia[44].

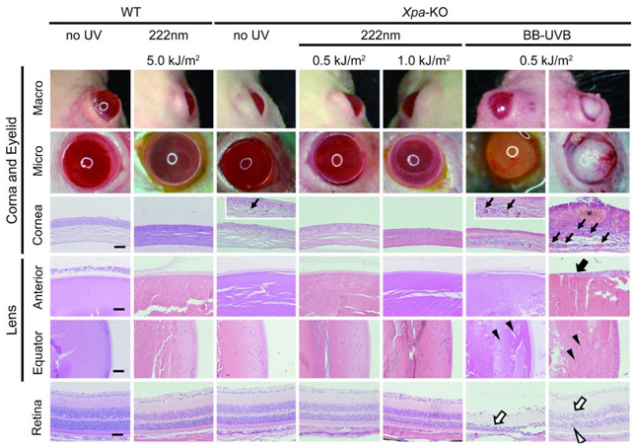



**Figura 13:** Resultados da córnea e epiderme das cobaias para cada irradiador. **Fonte:** Long-term Effects of 222-nm ultraviolet radiation C Sterilizing Lamps on Mice Susceptible to Ultraviolet Radiation44.

A utilização conjunta ou separada de ambos os métodos apresentados se faz bastante necessária visto a atual necessidade de desinfecção de áreas públicas. Já sendo realizada a pesquisa com testes experimentais por meio da utilização das duas tecnologias aplicadas em uma plataforma totalmente móvel e autônoma com sistema integrado de luz UVC + $O_3$, ventilação e ultrafiltração, o que permite a coleta de dados e tornando viável a aprimoração desses meios de desinfecção aplicados em conjunto conforme Figura 14.

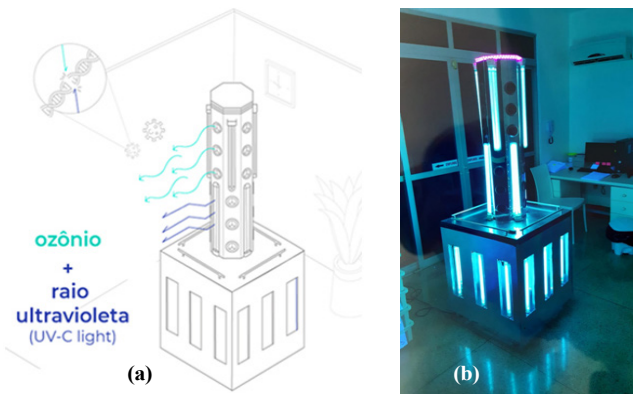



**Figura 14:** (a) Proposta inicial do Duo Cannon com esboço do protótipo. (b) Teste preliminares com protótipo. **Fonte:** Autores.

A Tecnologia proposta foi denominada Duo Cannon, que atua como dois canhões contra os minúsculos patógenos em suspensão no ar e em superfícies, faz uso do canhão (1) UVC e canhão (2) Ozônio. Esta solução foi desenvolvida pensando em um primeiro momento nos agentes de saúde, que são os mais suscetíveis a serem infectados nos hospitais. Depois ampliando a sua aplicação para os mais variados ambientes, como em áreas de convívio público, transportes públicos, ambulâncias, indústrias em geral, farmácias, bancos, Instituto Médico Legal, escolas, academias, entre outros, mostrando grandes perspectivas futuras para o avanço dos testes experimentais e aplicações.

# Conclusão

Essa descoberta abre um leque de oportunidades para futuros projetos de salas limpas, salas de cirurgias, sistemas de ar-condicionado e praticamente todos os sistemas de fluido nos quais possa haver agentes patológicos. De modo que a irradiação UVC de 222 *nm* e insuflação de ozônio demonstraram aplicações relevantes no tratamento de infecções de sítio cirúrgico e no controle de patógenos transmitidos pelo ar e por alimentos. Ambos os meios de mitigação quando comparados com outros elementos já utilizados tem a vantagem de não deixar resíduos tornando a área segura após a utilização. O gás ozônio pode atingir todos os cantos do ambiente, incluindo locais que podem ser difíceis de obter com líquidos convencionais e procedimentos de limpeza manual. Além disso, o gás ozônio é muito fácil de fabricar, pois é produzido por eletrólise e não requer reposição de matéria-prima.

# Referências

1. Huang, C. *et al*.Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. Lancet395, 497–506 **2020**.

2. Ma, J. Coronavirus: China's first confirmed Covid-19 case traced back to November 17. https://www.scmp.com/news/china/society/article/3074991/coronavirus-chinas-first-confirmed-covid-19-case-traced-back.

3. OMS. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. https://covid19.who.int/.

4. Buonanno, M., Welch, D., Shuryak, I. & Brenner, D. J. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. Sci. Rep.10, 10285 **2020**.

5. de Robles, D. & Kramer, S. W. Improving Indoor Air Quality through the Use of Ultraviolet Technology in Commercial Buildings. Procedia Eng.196, 888–894 **2017**.

6. Mustapha, A., Alhmidi, H., Cadnum, J. L., Jencson, A. L. & Donskey, C. J. Efficacy of manual cleaning and an ultraviolet C room decontamination device in reducing health care–associated pathogens on hospital floors. Am. J. Infect. Control46, 584–586 **2018**.

7. Yang, Y. *et al*. Investigation of ultrafast optical nonlinearities in novel bis-chalcone derivatives. Opt. Laser Technol.123, 105903 **2020**.

8. LAM, K. K. K. Ozone Disinfection of SARS-Contaiminated Areas. 2860, 1–6 **2003**.

9. Rowen, R. J. Ozone and oxidation therapies as a solution to the emerging crisis in infectious disease management: A review of current knowledge and experience. Med. Gas Res.9, 232–237 **2019**.

10. Yano, H. *et al*. Inactivation of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) by gaseous ozone treatment. J. Hosp. Infect.106, 837–838 **2020**.

11. Yao, M., Zhang, L., Ma, J. & Zhou, L. On airborne transmission and control of SARS-Cov-2. Sci. Total Environ.731, 139178 **2020**.

12. Kowalski, W. J., Bahnfleth, W. P. & Whittam, T. S. Bactericidal Effects of High Airborne Ozone Concentrations on Escherichia coli and Staphylococcus aureus. Ozone Sci. Eng.20, 205–221 **1998**.

13. Martínez-Sánchez, G., Schwartz, A. & Di Donna, V. Potential Cytoprotective Activity of Ozone Therapy in SARS-CoV-2/ COVID-19. Antioxidants9, 389 **2020**.

14. Dubuis, M.-E. *et al*. Ozone efficacy for the control of airborne viruses: Bacteriophage and norovirus models. PLoS One15, e0231164 **(2020)**.

15. Nunayon, S. S., Zhang, H. H. & Lai, A. C. K. A novel upper-room UVC-LED irradiation system for disinfection of indoor bioaerosols under different operating and airflow conditions. J. Hazard. Mater.396, 122715 **2020**.

16. Anis, H. K. *et al*. In-Room Ultraviolet Air Filtration Units Reduce Airborne Particles During Total Joint Arthroplasty. J. Orthop. Res.38, 431–437 **2020**.

17. Fukui, T. *et al*. Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans. PLoS One15, 1–13 **2020**.

18. Bak, J., Ladefoged, S. D., Tvede, M., Begovic, T. & Gregersen, A. Disinfection of Pseudomonas aeruginosa biofilm contaminated tube lumens with ultraviolet C light emitting diodes. Biofouling 26, 31–38 **2010**.

19. Heredia-Rodríguez, M. *et al*. Impact of an ultraviolet air sterilizer on cardiac surgery patients, a randomized clinical trial. Med. Clin. (Barc).151, 299–307 **2018**.

20. Anderson, D. J. *et al*. Enhanced terminal room disinfection and acquisition and infection caused by multidrug-resistant organisms and Clostridium difficile (the Benefits of Enhanced Terminal Room Disinfection study): a cluster-randomised, multicentre, crossover study. Lancet389, 805–814 **2017**.

21. Akari. O mais seguro e moderno sistema de descontaminação de água e ar: a Luz Ultravioleta C. https://www.akarilampadas.com.br/aplicacoes/introducao-a-luz-ultravioleta-uvc.php.

22. Buonanno, M. *et al*. 207-nm UV light - A promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. II: In-vivo safety studies. PLoS One11, 1–12 **2016**.

23. Rodriguez-Martinez, C. E., Sossa-Briceño, M. P. & Cortés, J. A. Decontamination and reuse of N95 filtering facemask respirators: A systematic review of the literature. Am. J. Infect. Control48, 1520–1532 **2020**.

24. Malhotra, S. *et al*. Shining a light on the pathogenicity of health care providers' mobile phones: Use of a novel ultraviolet-C wave disinfection device. Am. J. Infect. Control48, 1370–1374 **2020**.

25. Bentley, J. J., Santoro, D., Gram, D. W., Dujowich, M. & Marsella, R. Can ultraviolet light C decrease the environmental burden of antimicrobial-resistant and -sensitive bacteria on textiles? Vet. Dermatol.27, 457-e121 **2016**.

26. Messina, G. *et al*. Time Effectiveness of Ultraviolet C Light (UVC) Emitted by Light Emitting Diodes (LEDs) in Reducing Stethoscope Contamination. Int. J. Environ. Res. Public Health13, 940 **(2016)**.

27. Mackenzie, D. Ultraviolet Light Fights New Virus. Engineering6, 851–853 **2020**.

28. Rubio-Romero, J. C., Pardo-Ferreira, M. del C., Torrecilla-García, J. A. & Calero-Castro, S. Disposable masks: Disinfection and sterilization for reuse, and non-certified manufacturing, in the face of shortages during the COVID-19 pandemic. Saf. Sci.129, 104830 **2020**.

29. Mills, D., Harnish, D. A., Lawrence, C., Sandoval-Powers, M. & Heimbuch, B. K. Ultraviolet germicidal irradiation of influenza-contaminated N95 filtering facepiece respirators. Am. J. Infect. Control46, e49–e55 **2018**.

30. Memarzadeh, F., Olmsted, R. N. & Bartley, J. M. Applications of ultraviolet germicidal irradiation disinfection in health care facilities: Effective adjunct, but not stand-alone technology. Am. J. Infect. Control38, S13–S24 **2010**.

31. Yang, J.-H., Wu, U.-I., Tai, H.-M. & Sheng, W.-H. Effectiveness of an ultraviolet-C disinfection system for reduction of healthcare-associated pathogens. J. Microbiol. Immunol. Infect.52, 487–493 **2019**.

32. Welch, D. *et al*. Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. Sci. Rep.8, 2752 **2018**.

33. Shaikh, A. A. *et al*. Evaluation of a low-intensity ultraviolet-C radiation device for decontamination of computer keyboards. Am. J. Infect. Control44, 705–707 **2016**.

34. Allen, O. *et al*. Microbiological evaluation of UV disinfection effectiveness in a specialist cystic fibrosis clinic. J. Cyst. Fibros.18, e37–e39 **2019**.

35. Byrns, G. *et al*. The uses and limitations of a hand-held germicidal ultraviolet wand for surface disinfection. J. Occup. Environ. Hyg.14, 749–757 **(2017)**.

36. Cadnum, J. L. *et al*. Effectiveness of ultraviolet-c light and a high-level disinfection cabinet for decontamination of n95 respirators. Pathog. Immun.5, 52–67 **2020**.

37. Watson, J. D. & Crick, F. H. C. THE STRUCTURE OF DNA. Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.18, 123–131 **1953**.

38. Barnard, I. R. M., Eadie, E. & Wood, K. Further evidence that far-UVC for disinfection is unlikely to cause erythema or pre-mutagenic DNA lesions in skin. Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.36, 476–477 **2020**.

39. Lindblad, M., Tano, E., Lindahl, C. & Huss, F. Ultraviolet-C decontamination of a hospital room: Amount of UV light needed. Burns46, 842–849 **2020**.

40. Buonanno, M., Welch, D., Shuryak, I. & Brenner, D. J. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. Sci. Rep.10, 1–8 **2020**.

41. Ciofi-Silva, C. L. *et al*. Norovirus recovery from floors and air after various decontamination protocols. J. Hosp. Infect.103, 328–334 **2019**.

42. Raggi, R., Archulet, K., Haag, C. W. & Tang, W. Clinical, operational, and financial impact of an ultraviolet-C terminal disinfection intervention at a community hospital. Am. J. Infect. Control46, 1224–1229 **2018**.

43. Narita, K. *et al*. Ultraviolet C light with wavelength of 222 nm inactivates a wide spectrum of microbial pathogens. J. Hosp. Infect.105, 459–467 **2020**.

44. Yamano, N. *et al*. Long-term Effects of 222-nm ultraviolet radiation C Sterilizing Lamps on Mice Susceptible to Ultraviolet Radiation. Photochem. Photobiol.96, 853–862 **2020**.

45. Cooper, J., Bryce, E., Astrakianakis, G., Stefanovic, A. & Bartlett, K. Efficacy of an automated ultraviolet C device in a shared hospital bathroom. Am. J. Infect. Control44, 1692–1694 **2016**.

46. Hanamura, N., Ohashi, H., Morimoto, Y., Igarashi, T. & Tabata, Y. Viability evaluation of layered cell sheets after ultraviolet light irradiation of 222 nm. Regen. Ther.14, 344–351 **2020**.

47. Resendiz, M., Horseman, T. S., Lustik, M. B., Nahid, A. & West, G. F. Comparative effectiveness of rapid-cycle ultraviolet decontamination to chemical decontamination on high-touch communication devices. Am. J. Infect. Control47, 1135–1139 **2019**.

48. Das, U. N. Bioactive Lipids in COVID-19-Further Evidence. Arch. Med. Res. **2020** doi:10.1016/j.arcmed.2020.09.006.

49. Lim, M. Y., Kim, J.-M., Lee, J. E. & Ko, G. Characterization of Ozone Disinfection of Murine Norovirus. Appl. Environ. Microbiol.76, 1120–1124 **2010**.



# Guilherme V. L. Silva*, Gustavo M. Camargo, José A. S. Neto, Igor D. Borges, Cláudio F. Oliveira & Rosemberg R. F. Nunes

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: vcguilherme@hotmail.com

# Estudo do Potencial de Geração de Energia Eólica no Estado de Goiás

Thomas E. G. F. Kohler, Luís G. Moreira, Sérgio M. Brandão, Rosemberg F. N. Rodrigues & Márcio J. Dias

A energia eólica consiste em transformar energia cinética dos ventos em energia elétrica. Neste trabalho é demonstrado o avanço do potencial energético, como é produzida e distribuída a energia eólica. É provada a capacidade eólica do estado de Goiás, por meio da análise técnica da distribuição e velocidade dos ventos. Os locais mais adequados para a instalação de Parques Eólicos no estado são nos municípios São Domingos e Guarani de Goiás, comparando com o Parque Eólico de Palmas, e explicitando incentivos para impulsionar esta forma de obtenção de eletricidade como fonte de abastecimento de eletricidade para o estado de Goiás.

**Palavras-chave:** *energia renovável; parque eólico; estado de Goiás.*

Wind energy consists of transforming wind kinetic energy into electrical energy. This paper demonstrates the advancement of energy potential, as wind energy is produced and distributed. The wind capacity of the state of Goiás is proved by the technical analysis of the distribution and speed of the winds. The most suitable locations for the installation of wind farms in the state are in the municipalities of SãoDomingos and Guarani de Goiás, compared to the Palmas Wind Farm in Paraná, and explaining incentives to boost this form of obtaining electricity as a source of energy for the state of Goiás.

**Keywords:** *renewable energy; wind farm; state of Goiás*

# Introdução

A fonte de energia mais utilizada no Brasil é a hidráulica. Contudo, em 2015, o país enfrentou uma crise neste setor frente à escassez de chuvas. Por consequência, desde então, para suprir o consumo dos brasileiros, a cada ano, o governo começou a utilizar em maior escala as usinas termelétricas, que promovem grande emissão de poluentes e possuem elevado custo para os consumidores finais. Notando-se os crescentes investimentos destinados a energias renováveis no Brasil, decidiu-se estudar o potencial do estado de Goiás quanto à energia gerada pelos ventos, campo ainda pouco explorado nesse estado.

Energias renováveis podem ser classificadas como convencionais, tradicionais e novas. As fontes convencionais são oriundas de potenciais hidráulicos; as tradicionais são provenientes de biomassa primitiva, como lenha. As novas são as que têm ganhado mercado nos últimos anos, começando a competir com as fontes de geração tradicionais, podem ser citados os painéis solares fotovoltaicos, os aquecedores solares, turbinas eólicas, pequenas centrais hidrelétricas, usinas geotermais, geração por intermédio da biomassa proveniente de cana-de-açúcar e óleos vegetais[1].

O grande desafio produtivo e econômico deste século é expresso pela alteração da matriz energética, com o provável esgotamento das reservas de petróleo e aumento da utilização de energias renováveis. Todo esse cenário é acompanhado pelas mudanças climáticas observadas, causadas pela emissão de poluentes em sua maioria provenientes dos combustíveis fósseis da matriz energética mundial[2].

Apesar de seu grande potencial eólico, o Brasil tem um aproveitamento muito baixo nesta forma de geração de energia renovável, tendo como foco as regiões Nordeste, Sul e Sudeste do país. Em 2002, houve a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfra) fazendo com que o setor elétrico no país crescesse de forma considerável.

Segundo Eduardo Azevedo, as fontes de energia competem entre si, mas complementam umas às outras, então secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia (MME) de 2018[3].

Para a aplicação desta fonte de energia são necessários incentivos fiscais, pois apesar da fácil instalação, o custo é elevado devido à tecnologia avançada e ao transporte das partes das turbinas e, principalmente, os custos para utilização dos territórios onde são instalados os parques eólicos, na maioria dos casos sendo propriedades federais ou estaduais. Em contrapartida, trata-se de uma tecnologia renovável, não alterando a geografia da região e não obriga que as comunidades locais deixem suas residências e alterem seu modo de vida.

O presente trabalho visa demonstrar o potencial eólico do estado de Goiás, por meio do estudo de viabilidade técnica da qualidade dos ventos para a geração de energia e condições legais para exploração energética. Desta forma, realizando comparações com parques eólicos em condições climatológicas semelhantes e encontrar incentivos econômicos que podem ser criados ou já existentes a serem destinados à produção eólica no estado de Goiás.

# Revisão Bibliográfica

A energia do vento é explorada há milhares de anos, suas aplicações mais antigas incluem a extração de água de poços, produção de grãos e outras aplicações agrícolas. Esta energia vem evoluindo e se tornou uma das formas de produção de energia limpa mais conhecidas do mundo. O grande avanço desta tecnologia ocorreu na década de 70 quando houve a crise do petróleo, nesta época houve uma grande infusão de dinheiro em pesquisas nos Estados Unidos, Dinamarca e Alemanha para encontrar fontes alternativas de energia. Contudo, nos anos 80 os incentivos nos Estados Unidos haviam desaparecido, devido a isso, esta área da energia eólica teve um grande encolhimento. Por outro lado, na Europa, os investimentos continuaram sendo o motivo de, até recentemente o continente ser o líder referente a esta tecnologia[4].

Os avanços tecnológicos na área da energia eólica foram muito expressivos, as turbinas eólicas destinadas

para uso comercial dispunham de uma potência nominal de 10 kW a 50 kW, no início da década de 90 a potência do maquinário foi elevada para o intervalo de 100 kW a 300 kW. Entre os anos de 1995 e 1997, ampliou-se o potencial eólico de 300 kW para 1,5 MW, dando início à geração de turbinas de grande porte. Segundo o Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2005) "Em 1999 surgiram as primeiras turbinas eólicas de 2MW e hoje existem protótipos de 3,6 MW e 4,5 MW sendo testados na Espanha e Alemanha. A capacidade média das turbinas eólicas instaladas na Alemanha em 2002 foi de 1,4MW e na Espanha de 850 kW. Atualmente, existem mais de mil turbinas eólicas com potência nominal superior a 1 MW em funcionamento no mundo." Um dado importante, juntamente com o avanço da potência é a velocidade média dos ventos para que seja viável a exploração desta fonte de energia[5,6].

Por meio destas tecnologias desenvolvidas ao longo das décadas, foi possível chegar à tecnologia atual, o gerador eólico, ou aerogerador. Este é composto por um rotor ligado a, em sua maioria, 3 pás que oferecem resistência ao vento fazendo com que o rotor se mova, entregando de 19 a 30 rpm. Este eixo ligado ao rotor é chamado de eixo de baixa rotação, a esta velocidade não é possível gerar energia elétrica, por isso é ligado à caixa multiplicadora entregando 1500 rpm no eixo de alta velocidade, o qual é conectado ao gerador elétrico[7,9].

Dentro do aerogerador, esta parte fundamental desta tecnologia o gerador elétrico, como observa-se na Figura 1, principal responsável pela produção da eletricidade, este é composto pelo condutor, fio convoluto como uma bobina, a parte interna do gerador é revestida com vários imãs acoplados que cingem a bobina. Ao receber a alta rotação do eixo, é gerado um campo magnético neste sistema no qual a energia mecânica é convertida em energia elétrica[7,9,10].

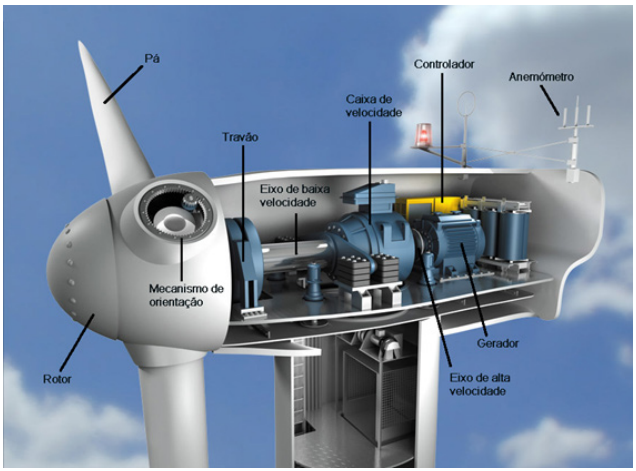



**Figura 1:** - Componentes do aerogerador. **Fonte:** Le Gues, 2012. Adaptado pelo autor.[11]

Ao ser produzida, a eletricidade, pode ser encaminhada a duas aplicações distintas, sendo estas o Sistema Isolado e o Sistema Integrado à rede. No primeiro, conhecido como Off-Grid, a eletricidade é armazenada em baterias e é utilizada em residências e redes de pequena escala, na segunda, é denominado In-Grid, aplicação à eletricidade é injetada na rede elétrica e utilizada em maior escala e para fins comerciais. Então passa por um transformador para chegar a uma voltagem compatível a um dos destinos anteriormente citados[10,12].

Dentre os componentes já citados, existem outros que também constituem toda a estrutura do aerogerador como, o Controle de Direção, responsável por rotacionar o aerogerador como um todo, apontando o rotor para a melhor direção em que este receberá a incidência de ventos adequada para a entregade máxima eficiência da tecnologia eólica. Os dados, para determinar a posição que a turbina eólica deve estar, são apontados pelo Anemômetro, transmitindo a velocidade e posição do vento para o controlador. Este profissional reconhece e envia os dados recolhidos para a central de controle, onde o aerogerador pode ser operado remotamente, determinado assim a quão atuante serão os freios, ou travão, conectados ao eixo de

baixa rotação definindo a velocidade de rotação do rotor, indicando ao Controle de Direção a melhor posição e o ângulo de inclinação das pás para a melhor incidência dos ventos.[8,9]

Apesar de todos os avanços na área de energias renováveis, principalmente eólica e solar, os combustíveis fósseis ainda dominam a matriz energética mundial, e o impacto do consumo destes combustíveis causa danos ambientais que podem e devem ser reduzidos.

Segundo Rocha *et al*[13],

> Consequentemente, vários países estão caminhando para a sustentabilidade e eficiência energética. De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (IEA), a energia mundial produzida em 2014 foi constituída 67% de combustíveis fósseis, 11% de energia nuclear, e 22% de energia renovável. Além disso, a energia hidroelétrica contabilizada como 16% do total da matriz energética mundial; isto constituiu 74% do total de energia proveniente de fontes renováveis. Diante desse desafio, fontes renováveis de energia vêm recebendo maior atenção dos governos nacionais.

Durante as últimas décadas, a degradação do meio ambiente tem se mostrado evidente, perante às mudanças climáticas observadas, assim como aos estudos empíricos realizados comprovantes da elevação da temperatura global, segundo Dincer[14].

A instalação de um parque eólico é mais rápida e causa menos impacto ambiental quando comparada com a instalação de outras formas de geração energética. Porém, existem alguns impasses que fazem com que os parques eólicos não se tornem alvos certos de todos os investidores. Segundo Herbert *et al*. (2007), a energia é o ingrediente básico para o desenvolvimento socioeconômico de qualquer país. Por possuir esse caráter essencial ao desenvolvimento das nações e se utilizar de combustíveis fósseis, a geração de energia elétrica responde por mais de 33% de toda a emissão de $CO_2$ relacionada ao setor de energia no mundo[15,16].

Atualmente, no Brasil, há uma perspectiva de investimento na geração de energia eólica. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a energia eólica possuía, em agosto de 2014, cerca de 4,5 GW de capacidade instalada país afora, distribuídos em 181 usinas. Somente em 2013, realizaram-se quatro leilões de energia, dos quais, três contemplaram a fonte eólica, resultando em 4,7 GW de energia contratada, boa parte na região Nordeste. Um recorde para o setor[17].

Para este fim, algumas estratégias de incentivo devem apoiar a redução do risco financeiro para potenciais investidores no mercado de energia renovável. O Estudo feito no artigo Wind Power Generation tem como objetivo analisar o impacto de estratégias de incentivo fiscal no risco de financiamento de produção de energia eólica[18].

No estudo realizado para a instalação de um parque eólico, pode-se dividir o processo de projeto de instalação de um parque eólico em projeto conceitual, o qual consiste na validação e confirmação de uma ideia como a melhor solução a atender à necessidade em questão[19].

Fases do projeto conceitual:

- Clarificação
- Concepção
- Análise
- Definição
- Validação

A execução é subdividida em implementação, comissionamento e operação. Dentro da análise se encontram os estudos de sustentabilidade técnico econômica, campo no qual se concentram os estudos realizados no presente trabalho. A denominada engenharia econômica consiste na aplicação de técnicas de análise econômica às decisões de engenharia visando determinar o desenvolvimento de um projeto viável e decidir sobre alternativas excludentes. Dentre as principais empresas brasileiras atuantes no setor eólico a busca pelo preço do terreno baixo é comum. Contudo algumas optam por abordar também a questão do impacto social econômico das comunidades com grande potencial eólico transformação da comunidade por meio do aluguel da propriedade projetos sociais visando à redução das carências das regiões, à coordenação de sustentabilidade no desenvolvimento de educação, lazer e à distribuição de água potável.

A seleção do local para implantação de um parque eólico depende das condições específicas do vento para a geração de energia. Tal processo se divide nas seguintes etapas: escolha do site (análise dos ventos, topografia, meio ambiente, documentação, acessos e conexão elétrica), a qual é parcialmente abordada neste artigo; medição dos ventos (locação de torre anemométrica, especificação de equipamentos e campanha de medição) e micrositing (determinação da energia, limitações e escolha da melhor turbina)[20].

Uma medição confiável de vento para a estimativa de produção de energia é premissa básica para suporte à decisão sobre a realização de um empreendimento eólico. Erros nas medições de vento no local em avaliação podem comprometer todo o empreendimento eólico. De acordo com o Guia de Boas Práticas para Instalação de Estações Anemométricas, um erro na medição de vento de 9%, pode superestimar a produção de energia por uma turbina de 600kW em 21%. Além da correta obtenção de dados a sua análise é crucial, juntas essas duas etapas determinam o potencial eólico de uma região[21].

Para obtenção de dados precisos da localidade escolhida, faz-se necessária a montagem correta da estação anemométrica e escolha de instrumentos de qualidade. As medições seguem normas internacionais estabelecidas pelos órgãos IEA (Intenational Energy Agency), IEC (InternationalElectrotechnicalComission) e MEASNET. Para que as medições das torres anemométricas tenham eficiência e qualidade, é imprescindível que atendam alguns requisitos básicos dispostos a seguir. Período mínimo de 12 meses de medição; medição na mesma altura dos aerogeradores a serem escolhidos; possuir no mínimo dois anemômetros em alturas distintas; as perdas dos dados não podem exceder 15 dias consecutivos e a disponibilidade da medição deve ser de no mínimo 90% para o caso de perdas não consecutivas[20,21].

# Metodologia

A metodologia utilizada nesta pesquisa é caracterizada pelo estudo de resultados de simulações realizadas por órgãos do governo federal brasileiro. Após pesquisas e aprofundamentos em conhecimentos disponibilizados por órgãos governamentais competentes na área de geração de energia, como: Ministério de minas e energia (MME), Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica de S. Brito (CRESESB), e de uma revisão bibliográfica aqui apresentada, observou-se o potencial de algumas regiões do estado de Goiás na geração de energia eólica[22].

Com base em dados do Atlas Eólico Brasileiro do ano de 2013, definiu-se a localidade mais indicada no estado à instalação de um parque eólico. Este atlas apresenta o mapeamento do potencial eólico de todo território brasileiro a partir do modelo numérico de mesoescala Brams, desenvolvido pelo INPE a partir de modelo semelhante da Universidade Estadual do Colorado. O Brams possui um conjunto de parametrizações físicas adequadas para simulações de processos iterativos entre a tmosfera e superfície terrestre, englobando turbulência, radiação, convecção e microfísica de nuvens. O modelo Brams é acoplado ao CCATT (CoupledAerosolandTracerTransportmodel), que é um modelo de transporte a transformação química de gases e aerossóis e integrado ao JULES. (Joint UK Land Environment Simulator)[23].

O modelo Brams do CPTEC/Inpe que dispõe o mais correto grupo de parametrizações e de finalidades de maior performance, com parâmetros quantitativos de aptidão igual ou superior a modelos de outros centros internacionais.

Para o trabalho do novo Atlas foi desenvolvida uma versão especial do Brams com o intuito de estimar, com todos os detalhes possíveis em uma grade com 5 quilômetros de resolução, a intensidade e orientação do vento em variadas alturas, em todo o território nacional, foi estimada e os dados de velocidade média anual do vento foram registrados para o período de 1 ano, nas alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 metros[24].

A qualidade inovadora da utilização do modelo Brams exclusivamente para previsão da velocidade e da direção do vento em todo o território brasileiro gerou diversos desafios ao longo da iniciativa. Para a obtenção de um ano

típico, que refletisse informações médias de um período e não de um ano específico, optou-se por simular os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. A partir dos dados simulados e, a posteriori, ajustados com dados medidos, seria obtido o ano típico para o período dos quatro anos mencionados. No tocante à comparação dos resultados das simulações geradas pelo modelo Brams com dados efetivamente ponderados. Apesar da vasta rede climatológica distribuída por todo o Brasil, os melhores dados para comparação e ajuste dos resultados das simulações logradas com o modelo Brams são aqueles oriundos de estações anemométricas específicas para empreendimentos eólicos. Um dos grandes benefícios do uso destes dados se encontra nas alturas de aferição, que correspondem às alturas dos aerogeradores disponíveis comercialmente no Brasil.A partir dos dados obtidos, foram confeccionados mapas temáticos relativos às médias anuais, obtidas a partir de simulações para o ano de 2013 os quais são utilizados para extração dos dados do presente artigo científico[24].

Mediante a análise das velocidades dos ventos nas localidades de parques eólicos já existentes, decidiu-se realizar a comparação das áreas de maior velocidade média anual dos ventos no estado de Goiás com o de parque eólico de Palmas, no estado do Paraná na divisa com Santa Catarina, por sua similaridade em velocidade dos ventos e distribuição dessas velocidades entre as alturas de 30 a 200 metros, registradas no Atlas Eólico Brasileiro. Além da viabilidade geográfica é, também, interessante estudar quão viável seria financeiramente, por meio de incentivos, à instalação de um parque eólico, levando em consideração que a tecnologia eólica tem um alto custo de aquisição e instalação.

Logo de início a página digital do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) apresentou o Proinfra, os Leilões como Leilão de Fontes Alternativas (LFA) e Leilão de Energia de Reserva (LER), a partir de 2011 e 2012, os preços da energia eólica se aproximaram da fonte convencional mais competitiva no país (a hidrelétrica), justamente devido a estes leilões[25].

Foi publicado pelo Banco Central do Brasil, no site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), este que se trata de um benefício concedido pela isenção da exigência do PIS/PASEP, e COFINS sobre serviços e bens voltados a infraestrutura, dentre outros setores, o energético[26].

Mais um incentivo relevante foi apontado pela ENGIE, o ProGD foi criado pelo Ministério de Minas e Energia e visa à produção distribuída no país, mediante a criação de linhas de crédito e financiamento para facilitar a implantação da geração de energia em residências, indústrias e comércios[3,27].

# Resultados e Discussão

Ao analisar o comportamento das regiões brasileiras em 2016, quanto a geração de energia. Nota-se que na geração de eletricidade total originária de energia renovável, a região Sul tem a maior participação com 34,9%, destacando-se nesta região a lenha (43,5%) e a hidráulica (39,9%). Em segundo lugar aparece a região Sudeste que participa no total da geração de energia renovável com 25,8%, destacando-se a gerada pelo bagaço de cana (66,0%) e pela solar (28,2%). Em seguida vem a região Norte, com 13,7% de participação, tendo a principal fonte a hidráulica (16,6%); a região Centro-Oeste, com 13,0%, sendo as principais fontes o bagaço de cana (22,1%) e a lixívia (16,6%). A região Nordeste apresenta a menor participação na produção de eletricidade por fonte renovável (12,7%) e tem seu destaque na fonte eólica (84,7%), solar (47,1%) e a lixívia (35,2%)[2].

Abordando apenas os estados da região Centro-Oeste, percebe-se que da produção total de energia realizada na região (60.320 GWh), a maior parcela se encontra no estado de Goiás, com 39,8%. Em segundo lugar, segue o estado de Mato Grosso do Sul, com participação de 38,1%, o estado de Mato Grosso com 22,0% e o Distrito Federal com 0,1%. Voltando o foco para a produção deeletricidade por fonte renovável para o estado de Goiás (23.996 GWh), é notável que a maior participação de Goiás está no bagaço de cana, com 51,5% (4.000 GWh), na hidráulica, com 40,0% (19.970 GWh) e na solar, com 25,0%.

Por meio da análise do atlas do potencial eólico

brasileiro, fornecido pelo centro de referência para as energias solar e eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) com objetivo de disponibilizar informações para capacitação da tomada de decisão na identificação de locais adequados para instalação de parques eólicos. As áreas do estado goiano com boa velocidade e distribuição dos ventos se encontram no município de São Domingos nas proximidades das coordenadas 13° 12' 43.2" S e 46° 19' 1.2" W e no município de Guarani de Goiás na região das coordenadas 13° 45' 36" S e 46° 16' 15.6" W, como representado nas Figuras 2 e 3[24].

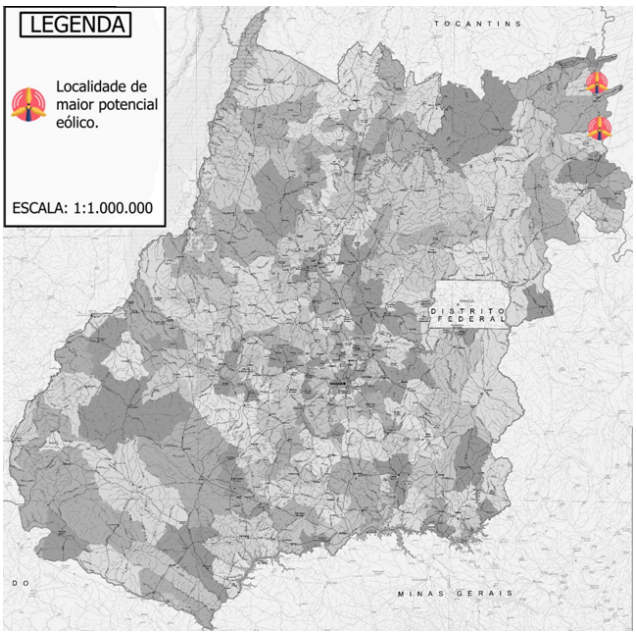



**Figura 2:** Localidades do estado de Goiás de maior potencial eólico. **Fonte:** Guia Geográfico, 2015. Adaptado pelo autor.[28]

Por meio da comparação realizada com o parque eólico de Palmas, resultados observados na Figura 4, notou-se que a velocidade diurna dos ventos chega a ser maior que deste antigo parque eólico em diversos momentos do dia. Revelando por meio da analogia que os empreendimentos nas regiões goianas teriam boa produção de energia ao longo do ano[24,29].

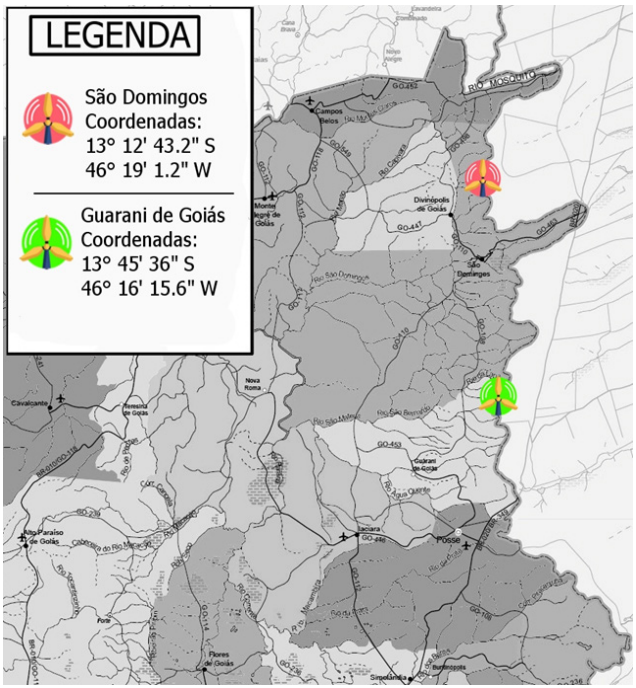



**Figura 3:** – Localização detalhada das áreas estado de Goiás com maior potencial eólico. **Fonte:** Guia Geográfico, 2015. Adaptado pelo autor.[28]

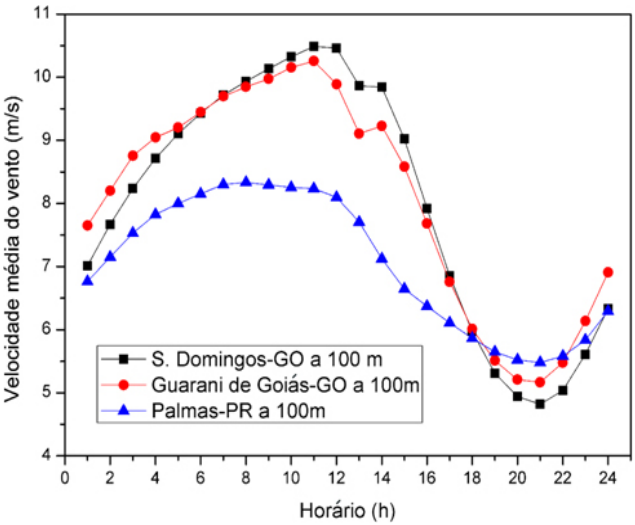



**Figura 4:** Comparação dos regimes diurnos da velocidade do vento entre as localidades nos municípios de São Domingos-GO, Guarani de Goiás-GO e Palmas-PR. **Fonte:** CEPEL; CPTEC, 2017. Adaptado pelo autor.

A escolha do parque eólico de Palmas, região sudoeste do Paraná se deve, principalmente, pela velocidade dos ventos desta área, representada no Atlas Eólico Brasileiro de 2013, ser semelhante as potenciais áreas de geração encontradas em Goiás. O Complexo de Geração Eólica Palmas I, entrou em funcionamento em 1999, sendo o primeiro do sul do país, com potência de apenas 2,5 MW Em 2018 se tornou pública a informação da construção do Palmas II de potência total de 200 MW, desta forma, aquela que foi a primeira usina eólica da região se tornará a maior do sul brasileiro.O parque se localiza em áreas de incidência de ventos com velocidade média anual em torno de 7 m/s a 100 m de altura[29].

A instalação de parques eólicos na proximidade de unidades de conservação é um tema muito discutido. Uma das áreas com melhor velocidade dos ventos no estado se encontra ao sul da Reserva Extrativista de Recanto das Araras de Terra Ronca localizado no leste goiano, próximo a Bahia. Quanto a este fator analisou-se ressente licenciamento concedido a um empreendimento com situação semelhante no estado de Santa Catarina, o empreendimento da Vilco Energias Renováveis obteve licença prévia para instalar um parque eólico junto ao Parque Nacional São Joaquim (PNSJ), na Serra Catarinense. O projeto prevê a instalação de 28 turbinas no município de Bom Jardim da Serra, sendo que o aerogerador mais próximo do PNSJ estará a 60 metros da área de proteção integral[30].

A empresa obteve a licença após três anos de tramitação junto ao órgão ambiental estadual. A licença prévia, emitida pelo Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA), é a etapa inicial do licenciamento, que aprova a localização do empreendimento e atesta sua viabilidade ambiental. Para a obtenção desta, foi necessária autorização do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), o qual também é responsável pela reserva em questão no estado de Goiás.

Mediante a proximidade da localidade em Guarani de Goiás a Reserva Extrativista de Recanto das Araras de Terra Ronca, destaca-se a alteração na paisagem causada pelas turbinas e os impactos da instalação do empreendimento, pois estradas terão de ser abertas para a passagem de caminhões. Para tanto faz-se necessária a mitigação dos impactos das obras e de controle ambiental que garantam o uso sustentável dos recursos naturais. Contudo, o estudo comparativo realizado ao empreendimento da Vilco Energias renováveis em Santa Catarina leva crer que a instalação do parque eólico não sofreria embargos por parte de órgãos ambientais[29,30].

A maior parte dos empreendimentos nesse setor energético preveem a concessão por número específico de anos, nos quais a região de instalação é beneficiada com a geração de empregos diretos e indiretos. A mão de obra vai desde a montagem e construção do parque até a manutenção e o monitoramento ambiental. Além dos empregos indiretos relacionados às atividades de serviços no município como alimentação, hotelaria e turismo e comércio. Apesar de tantos impactos positivos, provenientes da construção de uma usina eólica, a venda da energia elétrica produzida pelo empreendimento, que pode ser comercializada tanto em sistemas de leilão, método regulado, para as 62 distribuidoras de energia no país, como para o ambiente não regulado. No caso do mercado livre, a energia é vendida para comercializadoras que revendem o produto para grandes consumidores, como indústrias, supermercados, centros comerciais e empresas[29].

A altura das torres é um fator determinante para o melhor aproveitamento eólico. Em Palmas I, as torres têm 47 metros apenas, limitando a capacidade de geração. Nas palavras de Ivo Pugnaloni, presidente da ENERBIOS, responsável pelo parque eólico Palmas II[31,32].

A excelente jazida de ventos de altitude na região de Palmas, justifica a instalação de torres mais altas já construídas no Brasil até agora. É uma região de 1250 metros, a altura de torres não pode ser similar à beira de praia, as aplicações devem ser diferentes. O rotor deve ter 140 metros no parque piloto; é a meta, mas é possível chegar a 160 alcançando fatores de capacidade similares ao Nordeste. Experiências em outros parques demonstram que diferenças de 20, 30, 40 metros podem aumentar a

produção em mais de 20%.

Visto a importância da altura das torres sobre as quais serão instaladas as turbinas, acredita-se que alturas de mais de 120 metros de altura proporcionarão bom aproveitamento das áreas no estado de Goiás, nas Figuras 5 e 6 estão representadas as velocidades medias anuais a 120 metros. Em face de que a velocidade média dos ventos é favorável acima de 100 metros de altura[24,31,32].

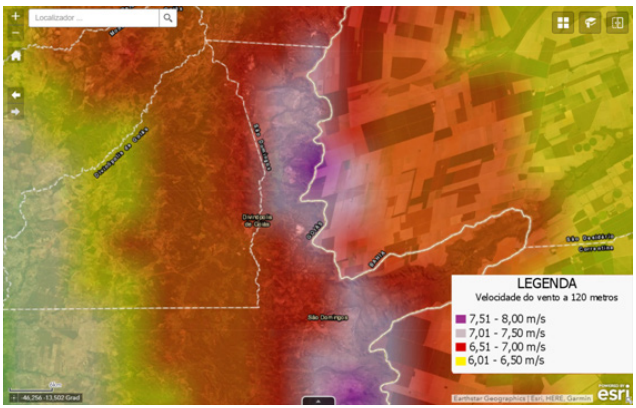



**Figura 5:** – Captura de tela do Atlas Online, componente do Atlas Eólico Brasileiro da localidade no município de São Domingos a 120 metros de altura. **Fonte:** CEPEL; CPTEC, 2017. Adaptado pelo autor.

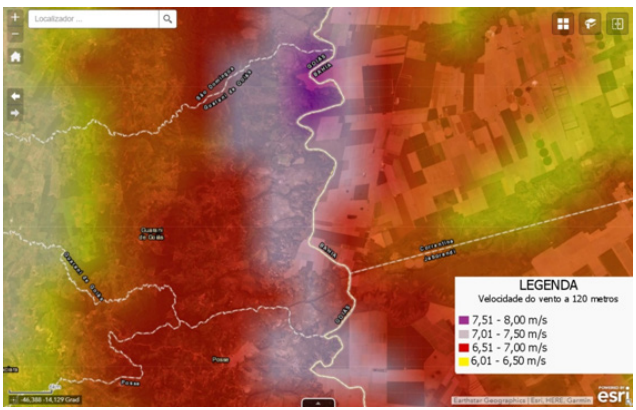



**Figura 6:** – Captura de tela do Atlas Online, componente do Atlas Eólico Brasileiro da localidade no município de Guarani de Goiás a 120 metros de altura. **Fonte:** CEPEL; CPTEC, 2017. Adaptado pelo autor.

Devido às dificuldades do mercado financeiro e aos altos preços da tecnologia envolvida na produção de energia eólica, a forma mais eficaz de tornar este mercado atraente é por intermédio de incentivos. Um exemplo destes incentivos é o Proinfra, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, funciona comercializando com o consumidor final ou que recolhem tarifa de uso das redes elétricas, para cobrir custos da energia elétrica produzida por empreendimentos autônomos com base de fontes eólicas. Foi instituído em 2002, definindo preços diferenciados e atrativos para a contratação da energia eólica[25].

O Proinfra é o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, funciona comercializando com o consumidor final ou que recolhem tarifa de uso das redes elétricas, para cobrir custos da energia elétrica produzida por empreendimentos autônomos com base de fontes eólicas. Foi instituído em 2002, definindo preços diferenciados e atrativos para a contratação da energia eólica[25].

Após o lançamento do PROINFRA, notou-se um aumento expressivo nos projetos renováveis não convencionais para geração de energia. O país, que contava com alguns poucos projetos implantados antes da entrada em vigor do programa, viu crescer o número de projetos de geração eólica, principalmente, na região Nordeste. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a capacidade eólica instalada no Brasil em fevereiro de 2019 era de 14,79 GW, distribuídos por 587 parques com operação comercial. O que revela a importância de políticas governamentais de incentivo a esta fonte energética[20,33].

Outro incentivo fiscal criado é o REIDI, criado em 2007, para dar impulso ao crescimento da infraestrutura energética do Brasil, conforme o artigo LEGISLAÇÃO E TRIBUTOS NO SETOR EÓLICO, o beneficiado tem a suspensão da exigência do recolhimento das contribuições PIS/Cofins e PASEP incidentes sobre bens e serviços voltados para a infraestrutura de, entre outros setores favorecidos, energia[26,34].

Existem também financiamentos facilitados pelos

próprios bancos, como o da Caixa Econômica Federal com parcelamento e baixa taxa de juros e leilões como, Leilão de Fontes Alternativas (LFA) e Leilão de Energia de Reserva (LER) foram realizados em 2007 para dar suporte, elevar a segurança do fornecimento de energia e destinar para o mercado determinada cota de energia eólica[25,35,36].

A Tabela 1 demonstra os incentivos citados anteriormente sobre todo o terreno nacional, o Proinfra em um escopo geral e os leilões LER e LFA do ano 2009 ao ano de 2015, provando assim o quão fundamental são os incentivos para o avanço da energia eólica, principalmente, no estado de Goiás[33].

**Tabela 1:** Instalação de Parques Eólicos a partir de Incentivos. **Fonte:** ABEEÓLICA, 2019. Adaptado pelo autor.

| Viabilização | PROINFA | LER 2009 | LER 2010 | LFA 2010 | LER 2011 | LER 2013 | LER 2014 | LFA 2015 | LER Nov/2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Potência (MW) | 1.298,60 | 1.820,20 | 548,2 | 1.293,40 | 592,8 | 1.108,60 | 740,6 | 90 | 551,3 |
| N° de Parques | 52 | 67 | 20 | 48 | 23 | 47 | 31 | 3 | 20 |

Mais um programa promissor é o ProGD, Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica, este estimula a produção de energia dos próprios consumidores, porém direcionado à produção de energia solar, sendo interessante a expansão para abranger geração de energia pela tecnologia eólica. Além de contar com o apoio do BNDES, o incentivo também tem benefícios como, a isenção de ICMS sobre o saldo de energia inserida na rede distribuidora, da mesma forma ocorrerá com o PIS/Cofins, entre outros benefícios[3,27].

O grupo de trabalho composto pelo MME publicou o relatório final sobre o ProGD, a partir deste poderão ser ampliadas e aprofundadas as ações de estímulo à geração de energia. Um dos grandes desafios encontrados pelo grupo é a questão do financiamento, tido como ponto vital para o programa ser inserido em larga escala por todo o território nacional[3].

# Conclusões

O estado de Goiás possui um potencial eólico não explorado, porém relevante e por meio deste será possível complementar sua capacidade energética com uma fonte renovável e não poluente reduzindo assim as emissões gases nocivos a atmosfera e impulsionando o mercado energético brasileiro. O apoio do governo às energias renováveis pode ser visto, também, como uma forma de retomada do crescimento do país, privilegiando uma matriz mais barata, que não agride o meio ambiente de maneira severa e que gera mais empregos no país. Apesar da descoberta do parecer favorável à instalação de parques eólicos no estado de Goiás, é necessária a realização da coleta de dados por intermédio de sensores de temperatura, umidade, pressão e velocidade instalados em torres anemométricas nas localidades aqui apresentadas e em mais de uma altura relativa ao solo.

# Referências


1. Goldemberg, J.; Lucon, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. Revista USP, n. 72, p. 6, 1 fev. **2007**.
2. Alves, L. B. Energias Renováveis: análise da geração fotovoltaica no Brasil e Goiás. Goiânia-GO: [s.n.]. Disponível em: <http://www.imb.go.gov.br/files/docs/publicações/estudos/2018/energias-renovaveis-analise-da-geracao-fotovoltaica-no-brasil-e-goias-**2018**.pdf>.
3. MME. ProGDBrasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar, [s.d.]. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticas/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030>
4. JAIN, P. Wind Energy Engineering. [s.l.] McGRAW-HILL, **2011**.
5. ANEEL. Atlas de Energia Elétria - 2aEdição. In: Atlas de Energia Elétria - 2ª Edição. 2ª Edição ed. [s.l.] CEDOC, **2005**. p. 94–98.
6. BRASIL, P. Saiba como se produz energia limpa a partir da força dos ventosSaiba como se produz energia limpa a partir da força dos ventos, **2017**. Disponível em: <http://legado.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2015/02/saiba-como-se-produz-energia-limpa-a-partir-da-forca-dos-ventos>. Acesso em: 13 out. **2019**.
7. INDÚSTRIA HOJE. O que é um gerador eólico?, **2014**. Disponível em: <https://industriahoje.com.br/o-que-e-um-gerador-eolico>. Acesso em: 9 out. **2019**

8. REIS, P. Como funciona um Aerogerador14/04, **2016**. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>. Acesso em: 11 out. **2019**

9. Vela, A. Energia Eólica #Infografia #Infographic #MedioAmbiente08/04/2013, 2013. Disponível em: <https://ticsyformacion.com/**2013**/04/08/energia-eolica-infografia-infographic-medioambiente-5/>. Acesso em: 10 out. **2019**

10. ECYCLE, E. O que é energia eólica?O que é energia eólica?, [s.d.]. Disponível em: <O>. Acesso em: 11 dez. **2019**

11. GUES, C. LE. Componentes do Aerogerador. Disponível em: <https://www.behance.net/gallery/6147197/3d-cgi-technical-illustrations>. Acesso em: 8 nov. **2019**.

12. VENTOS, C. DOS. Energia EólicaEnergia Eólica, [s.d.]. Disponível em: <http://casadosventos.com.br/pt/energia-dos-ventos/energia-eolica>. Acesso em: 11 out. **2019**.

13. ROCHA, L. C. S. *et al*. A stochastic economic viability analysis of residential wind power generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 412–419, jul. **2018**.

14. DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 4, n. 2, p. 157–175, jun. **2000**.

15. ANG, B. W.; Zhou, P.; Tay, L. P. Potential for reducing global carbon emissions from electricity production - A benchmarking analysis. Energy Policy, v. 39, n. 5, p. 2482–2489, maio **2011**.

16. Joselin Herbert, G. M. *et al*. A review of wind energy technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 11, n. 6, p. 1117–1145, ago. **2007**.

17. ABEEÓLICA. Boletim Anual de Geração Eólica **2014**. São Paulo-SP: [s.n.]. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2016/08/Boletim-Anual-de-Geracao-Eolica-2014.pdf>.

18. Aquila, G. *et al*. Wind power generation: An impact analysis of incentive strategies for cleaner energy provision in Brazil. Journal of Cleaner Production, v. 137, p. 1100–1108, nov. **2016**.

19. Antunes, P. R. Projeto conceitual: O que é, e porque fazê-lo. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/edicoes.asp?link=ultima&fase=C&id=743>. Acesso em: 20 maio. **2019**.

20. Abujamra, R. Torres Anemométricas e a importância de seu uso. Disponível em: <https://gruposansolucoes.com/blog/torres-anemometricas>. Acesso em: 13 out. **2019**.

21. Empresa de Pesquisa Energética, C. A. para O. D. S. G. Guia de Boas Práticas para Instalação de Estações Anemométricas. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.]. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-236/Guia Boas Práticas Estações Anemométricas.pdf>.

22. Gonçalves, P.; … A. I.-… de E. S.; **2018**, Undefined. Análise dos Dados Climatológicos de Vento do Município de Anápolis-GO para Soluções Projetuais. anaiscbens.emnuvens.com.br, [s.d.].

23. Moreira, D. S. *et al*. Coupling between the Jules land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (Jules-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the $CO_2$ budget in South America. Geoscientific Model Development Discussions, v. 6, n. 1, p. 453–494, 23 jan. **2013**.

24. CEPEL; CPTEC. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013: Metodologia. Disponível em: <http://novoatlas.cepel.br/index.php/metodologia/>. Acesso em: 11 set. **2019**.

25. BNDES. O desenrolar da energia eólica no Brasil. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/energia-eolica-brasil>. Acesso em: 12 set. **2019**.

26. Pommosky, E. F. Legislação e Tributos no Setor Eólico Legislação e Tributos no Setor Eólico, **2017**. Disponível em: <https://gsga.com.br/legislacao-e-tributos-no-setor-eolico/>. Acesso em: 12 set. **2019**.

27. ENGIE. Conheça 7 incentivos governamentais para quem usa energia solarConheça 7 incentivos governamentais para quem usa energia solar, 2018. Disponível em: <https://blog-solar.engie.com.br/incentivos-governamentais-energia-solar/>. Acesso em: 12 set. **2019**.

28. Geográfico, G. Mapa Político de Goiás. Disponível em: <https://www.brasil-turismo.com/goias/mapa-politico.htm>. Acesso em: 10 nov. **2019**.

29. Pozzobon, B. Maior parque de geração de energia eólica da região Sul será inaugurado no Paraná em **2019**. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/nova-economia/maior-parque-de-geracao-de-energia-eolica-da-regiao-sul-sera-inaugurado-no-parana-em-2019-0tz6q0q7j9nncheat2zqlhksx/>. Acesso em: 12 out. **2019**.

30. Wenzel, F. Parque Eólico poderá instalar aerogerador a 60 metros do Parque Nacional São Joaquim. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/reportagens/parque-eolico-podera-instalar-aerogerador-a-60-metros-do-parque-nacional-sao-joaquim/>. Acesso em: 14 set. **2019**.

31. Energia, A. Maior parque eólico privado do Paraná prevê instalação já em **2019**. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2018/12/maior-parque-eolico-privado-parana-preve-instalacao-ja-em-2019/35418>. Acesso em: 12 out. **2019**.

32. Fochzato, I. C. Complexo Eólico Palmas II iniciará em fevereiro de 2019. Disponível em: <https://rbj.com.br/geral/complexo-eolico-palmas-ii-iniciara-em-fevereiro-de-2019-4423.html>. Acesso em: 12 out. **2019**.

33. Abeeólica. Números ABEEólica: Fevereiro de **2019**. São Paulo-SP: [s.n.]. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/02/Números-ABEEólica-02.2019.pdf>.

34. SCE. REIDI - Regime Especial de Incentivos Para o Desenvolvimento da InfraestruturaREIDI, **2015**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/reidi>. Acesso em: 14 set. **2019**.

35. Ecoa, E. R. Quais incentivos estão fortalecendo o crescimento da energia solar. Quais incentivos estão fortalecendo o crescimento da energia solar, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ecoaenergias.com.br/2019/03/19/quais-incentivos-estao-fortalecendo-o-crescimento-da-energia-solar/>. Acesso em: 12 set. **2019**.

36. Tradener, C. DE E. Informações de Mercado Informações de Mercado, **2017**. Disponível em: <http://www.tradener.com.br/informacoesmercado/pt-br>

Thomas E. G. F. Kohler*, Luís G. Moreira, Sérgio M. Brandão, Rosemberg F. N. Rodrigues & Márcio J. Dias

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: thomas.e.kohler@hotmail.com

# Comparação das Características Físico-Químicas do Fluido de Corte Aplicado no Torno CNC Utilizado em Laboratório Didático – Estudo de Caso

Filipe Y. G. Luz, Bruno S. Miranda, João V. M. Torres, Marcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Adriano P. Ramiro

Usinagem é um processo de fabricação que continua evoluindo constantemente. O objetivo deste artigo é avaliar e comparar as características físico-químicas dos fluidos de corte coletados periodicamente em um torno CNC do Laboratório didático do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Para execução deste foi verificado a compatibilidade com as fichas técnicas dos fabricantes para montagem de um laudo de avaliação. Foi constatado que, por ser tratar de um equipamento industrial aplicado para fins didáticos e consequentemente operar poucas horas no mês, os fluidos tiveram uma degradação excessiva, sendo estes fatores de risco ao maquinário.

**Palavras chave:** *fluido de corte; torno CNC; meio ambiente; características físico-químicas.*

The machining process is a manufacturing process that continues to evolve constantly. The purpose of this is to evaluate and compare the physical-chemical characteristics of the cutting fluids collected periodically in a CNC lathe at the Didactic Laboratory of the University Center of Anápolis - UniEVANGÉLICA. In order to execute this, it was verified the compatibility with the manufacturers' technical sheets for assembling an appraisal report. It was found that, because it is an industrial equipment applied for educational purposes and consequently operating a few hours in the month, the fluids had an excessive degradation, being these risk factors to the machinery.

**Keywords:** *cutting fluid; CNC lathe; environment; physical and chemical characteristics.*

# Introdução

## PROCESSOS DE USINAGEM

Sabe-se que com a Revolução Industrial, alguns novos materiais e vários tipos de liga foram sendo descobertos. Em meados do século XVIII, o material mais utilizado em engenharia era a madeira. Já no início do século XIX, com a utilização da água e do vapor, acabou por vez impulsionando a indústria metal-mecânica. No século XX, necessitou-se fabricar peças de materiais mais resistentes e, para isso, foi necessário que aprimorar também o maquinário utilizado. Com o crescimento da tecnologia, o desenvolvimento de ferramentas que conseguissem usinar tais materiais fora facilitado. Diante de todo o avanço da tecnologia, as máquinas comandadas numericamente (CN) surgiram, promovendo a produção em série e tendo consequentemente, um ganho considerável de tempo em relação as máquinas convencionais, mantendo também, a qualidade da usinagem[1].

A usinagem é um processo de retirada de sobremetal de uma determinada peça por meio da utilização de ferramentas de corte. Estas ferramentas podem ser: manuais ou máquinas operatrizes. Dentre algumas das ferramentas manuais estão cossinetes, alargadores, limas e machos. Das principais máquinas operatrizes dos processos de usinagem, podem-se destacar o torno mecânico universal, fresadora mecânica universal, retificadora plana, cilíndrica e centerless, mandriladora e furadeira[1].

A caracterização mecânica dos materiais tem de ser assegurada, uma vez que, este interfere diretamente nos parâmetros que podem ser mensuráveis como: qualidade superficial da peça, produtividade, temperatura de corte, força de usinagem, tipo de cavaco e vida útil da ferramenta. Pode-se entender por este processo como usinabilidade, sendo a propensão do material em ser cortado, torneado, fresado, furado ou rosqueado. Para melhor compreendimento da funcionalidade do fluido de corte nestes processos, é necessário compreender a origem da utilização destes, que é o ponto onde muitos autores relatam e descrevem seus atributos[2].

## HISTÓRICO FLUIDO DE CORTE

Sabe-se que, Frederick Winslow Taylor foi o pioneiro na introdução de fluidos de corte na usinagem dos materiais. Por volta de 1890, ele utilizou água no processo, percebendo assim algumas melhorias na refrigeração na região peça-ferramenta e um aumento de 33% na velocidade de corte, sem alterar a vida útil. Contudo, como já é esperado, por mais que a água traga os benefícios já citados, ao entrar em contato com metais ou ligas-metálicas, ela promove a oxidação, tanto da peça, quanto da ferramenta[3,4].

A partir disto, foi aos poucos sendo testada a substituição da água, como fluido de corte, por óleos, como os óleos graxos de origem animal que fizeram sucesso na época, sendo utilizados em basicamente todas as operações que exigiam baixos parâmetros de usinagem. Entretanto, como esses óleos eram de origem animal, apresentaram uma baixa vida útil, deteriorando-se rapidamente, principalmente, quando aplicados em altas temperaturas[3].

Com este agravante e o aumento da produção de materiais metálicos, foram surgindo, aos poucos, os óleos minerais, que primeiramente foram aplicados em operações com materiais de baixa resistência mecânica (ligas não ferrosas e aços leves), e para operações que exigiam maiores esforços, eram adicionados óleos de origem animal, que foram reduzidos drasticamente do processo por meio de avanços tecnológicos envolvendo metais e ligas metálicas, ferramentas de usinagem e obviamente, fluidos de corte. Para satisfazer às operações consideradas pesadas (aços com maior teor de carbono), foram disseminados a aplicação de aditivos químicos, surgindo assim uma variada gama de combinações de óleos (minerais e graxos), fluidos químicos de corte e também as emulsões, sendo sua finalidade definida de acordo com as exigências do processo[3].

A classificação dos tipos de fluido de corte não segue uma padronização, alguns autores fazem suas categorizações apenas dentro da classe dos fluidos de corte no estado líquido, dividindo em: óleos puros e óleos não puros (miscíveis em água). Outros autores adotam em seus catálogos, os fluidos de corte sólidos e gasosos, sendo referidos principalmente em literaturas técnicas. Baseado

na bibliografia de FERRARESI (2017)[3], o autor descreve os fluidos de corte de acordo com seus três estados físicos que facilitam no agrupamento destes, sendo esses estados: sólidos, líquidos e gasosos.

## TIPOS DE FLUIDOS DE CORTE

De acordo com suas características físicas, os fluidos de corte possuem funções diferentes. Os fluidos de corte sólidos (Grafita e bissulfeto de molibdênio), são utilizados para diminuir o atrito entre ferramenta/peça/cavaco, porém, necessitam de aplicação constante durante o processo, o que o inviabiliza, pois o equipamento deve ser desligado para isso. O emprego de fluidos de corte gasosos, possui finalidade apenas de remoção do cavaco, sendo que, na maior parte dos processos, é utilizado o ar comprimido. Porém alguns autores citam a utilização destes (ar, $CO_2$ e $N_2$) para obter refrigeração e uma mínima quantidade de lubrificação, estas propriedades são obtidas quando aplicadas em baixas temperaturas juntamente com aumento da pressão, entretanto, seu custo é aumentado a ponto de tornar-se inviável[3,5,6].

Prosseguindo com as caracterizações, os fluidos de corte de estado líquido são, dentre os três citados, os mais importantes e também os mais empregados devido aos fatores como menor custo de aquisição, diversidade de produtos, facilidade de uso, inúmeras características positivas para o processo. Contudo, por existir uma maior variedade, a classificação altera de acordo com a literatura[3,6].

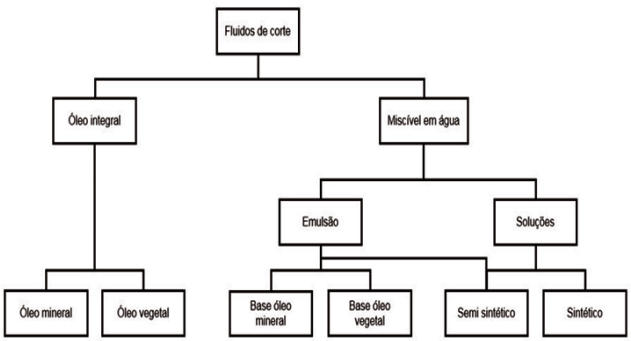



**Figura 1:** Classificação dos fluidos de corte. **Fonte:** DINIZ[4].

Conforme a Figura 1, os fluidos de corte são divididos em óleos integrais e miscíveis em água (emulsionáveis e/ou soluções), mas, essa classificação é adotada em bibliografias no início do século XXI, tendo sido expandido nos novos conteúdos didáticos. Como para MACHADO (2012)[5], que mantém os óleos integrais (puros ou com aditivos) e subdivide os óleos miscíveis em água em dois grupos distintos, sendo eles, as emulsões e soluções.

Descrevendo brevemente sobre os óleos integrais, existem os vegetais e minerais, que por possuírem maior viscosidade, são recomendados para procedimentos mais pesados, com baixa velocidade de corte, garantindo um melhor acabamento superficial da peça, no entanto, seu poder de refrigeração é relativamente baixo. Outros fatores negativos são, sua alta inflamabilidade, seu elevado custo comparado aos demais e maior risco à saúde do operador, fazendo com que assim, percam espaço no mercado[3,5].

Os fluidos de corte emulsionáveis, possuem esta nomenclatura, pois seguem o conceito de emulsão entre óleo e água, apresentando duas fases e sua proporção varia entre 10 a 100 partes de água, para uma parte de óleo. Normalmente, além destas emulsões, são adicionados emulsificantes, que atuam como agentes de dispersão, que auxiliam na diminuição da tensão superficial da água, pois somente assim, geram estabilidade no fluido. Vale citar que as emulsões podem variar de acordo com a base do óleo, podendo ser, vegetal ou mineral[3,5].

A partir disto, o fluido que é composto predominantemente de água, adquire melhores propriedades de refrigeração e através da ação do óleo, é possível, inibir os efeitos negativos da água em contato com os metais. Contudo, essas características são diferenciadas de acordo com a concentração, sendo as de menor quantidade de óleo propícias para situações com média/alta velocidade de corte e baixo avanço, logo, as de maior quantidade de óleo quando a lubrificação se torna relevante[3].

As soluções, diferente das emulsões, são monofásicas, pois como são totalmente dissolvidas em água, através de reações químicas, geram uma mistura homogênea e sem a presença de emulsificantes. São conhecidos comumente como fluidos sintéticos, tendo como base para

sua combinação, apenas óleo vegetal, água e aditivos. Sua principal função no processo de usinagem é garantir refrigeração e proteção anticorrosiva, no entanto, com a adição de aditivos específicos, sua diversidade de propriedades podem aumentar, elevando também seu custo de mercado[3-5].

As bibliografias utilizadas para este estudo destacam que os fluidos de corte semissintéticos, que são basicamente emulsões que utilizam óleo mineral (de 5% a 50%), juntamente com aditivos e reagentes químicos, apresentam as mesmas funções dos fluidos sintéticos, entretanto, sua classificação como soluções ou emulsões, ficam a critério dos autores. A partir dessas informações já descritas, fica explicita a importância dos aditivos nas composições de fluidos de corte, sendo necessária a utilização dos mesmos em diversas ocasiões, pois tendem a acrescentar positivamente no processo, adicionando novas características e melhorando os demais atributos. Para um melhor compreendimento sobre os aditivos, segue abaixo sua categorização:[3,5,6]

**ADITIVOS**

Anticorrosivos: Conhecidos também como inibidores de corrosão, são substâncias químicas que impedem a corrosão tanto da peça, da ferramenta de corte e da máquina-ferramenta, visto que, normalmente a maioria dos fluidos de corte possuem água em sua composição que ocasiona essa adversidade no processo. Podem ser compostos de amina, sulfonatos, sulfurados e nitrito de sódio, sendo recomendada a utilização do nitrito de sódio em menores quantidades e com precaução, pois é suspeito de ser cancerígeno[3-8].

Detergentes: Têm a finalidade de impedir ou reduzir a formação de partículas sólidas na superfície do fluido (lodo ou borras). São adquiridos através de fenolato, salicilato compostos organometálicos (apresentam ao menos um átomo de metal ligado a um átomo de carbono), juntamente com magnésio, cálcio, bário e até mesmo álcoois[3-8].

Antiespumantes: Impossibilitam a formação de espumas que dificultam a visibilidade da região peça/ferramenta e interferem negativamente na refrigeração, durante a execução do processo. Interagem na tensão interfacial (água e óleo), reduzindo-a, fazendo com que as bolhas menores, aglomerem-se, criando assim bolhas maiores e instáveis. Para oferecer estas características, são utilizados polímeros de silício ou ceras especiais[3-8].

Emulsificantes: Como já citado, os agentes emulsificantes ou emulgadores possuem a função de reduzir a tensão superficial da água, realizando assim a emulsão com o óleo, criando uma mistura bifásica e estável. Dentre as substâncias, há: sabões (potássio e alcanolaminas), sulfonatos de petróleo e emulsificantes não iônicos[3,8].

Surfactantes: Possuem o conceito similar dos emulsificantes, contudo, realizam esta função de maneira distinta. Quando em contato com líquidos que não se misturam, como no caso da água e do óleo, suas substâncias interagem na região delimitada como área de interação dos dois fluidos, criando uma relação entre as moléculas miscíveis em água com a própria água e do mesmo modo com o óleo e as demais moléculas, garantindo homogeneidade na emulsão. Geralmente são utilizados sulfonatos, álcoois etoxilados e ésteres fosfatos[3,8].

Biocidas: São substâncias que devem impedir a geração e proliferação de microrganismos (bactérias, fungos e leveduras), preservando o fluido de corte e estendendo sua vida útil. Para prevenir essa contaminação, os aditivos biocidas levam como base o enxofre, porém podem dispor de aditivos nitratos ou saia (cobre ou quaternários de amônio)[3-8].

Aditivos de extrema pressão (EP): Estes aditivos possuem características lubrificantes, sendo recomendados para operações de usinagem consideradas mais pesadas, onde o fluido é exposto a altas temperaturas e pressões de corte. Reagem na superfície usinada, resultando na maioria das vezes, na formação de sais que em contato com elevadas temperaturas, dissolvendo-se favorável o cisalhamento. Esses atributos são adquiridos por compostos de enxofre, fósforo ou cloro, cloroparafina e ésteres (sulfuroso ou ácido fosfórico)[3-8].

Diante o contexto do acréscimo de aditivos nos fluidos, pode-se levar em consideração que este é uma das formas de tentar inibir os pontos negativos em que o fluido de

corte, seja ele mineral ou vegetal, tem dentro do processo de usinagem. Essa adição impacta diretamente em todos os parâmetros que estão envolvidos na operação, sejam de desbaste ou acabamento, por vez melhoram drasticamente a qualidade final da peça que será usinada, entregando assim um produto com características mecânicas garantidas por meio da utilização correta da mistura densa de óleo em combinação com água e aditivos diversos.

## INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NA USINAGEM EM OPERAÇÕES DE DESBASTE E ACABAMENTO

Em operações de desbaste, o ponto principal na qual o fluido de corte atuará será na lubrificação, visto que, nestes tipos de operações as temperaturas atingidas nos momentos de contato entre ferramenta e peça, não são elevadas como é em operações de acabamento. Outro ponto que pode ser considerado, é que além do fluido agir como lubrificante em baixas velocidades de corte, também ajuda na não formação de arestas postiça de corte[5].

Já nas operações de acabamento, o fluido de corte terá como finalidade principal o resfriamento, tendo potencial de aumentar a velocidade de corte em até três vezes, em razão disto, interfere de maneira positiva na qualidade superficial da peça, na rugosidade e tolerância dimensional, porém, os itens já mencionados, dependem de três fatores, sendo eles a geometria da ferramenta, as condições de corte e o comportamento dinâmico da máquina[3].

O fluido de corte além de ajudar no resfriamento e lubrificação, consegue remover cavaco da zona de corte e segundo MACHADO (2012)[5], "A capacidade do fluido de corte em remover os cavacos da zona de corte depende da sua viscosidade e vazão, além, é claro da natureza da operação de usinagem e do tipo de cavaco que está sendo formado".

A garantia de que o material não perca suas características mecânicas é essencial, pois este, reduz gastos adicionais que proveriam de possíveis deformações na peça usinada. Portanto, o profissional habilitado para realizar o processo referido, tem que estar informado sobre os métodos e as inovações que podem ser aplicados, sendo esse último, uma prática diferenciada na qual pode resultar em pontos positivos ou negativos no processo, além das características do material trabalhado, para assim, selecionar o melhor tipo de fluido de corte em sua operação, melhorando o desempenho, garantindo qualidade e reduzindo custos.

## MÉTODOS DE APLICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE E INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

Um método que veio como uma alternativa para redução da contaminação causada ao operador pelo fluido de corte no processo de usinagem é a técnica de mínima quantidade de fluido e sem fluido de corte (corte a seco). Como uma das maiores preocupações mundiais é em relação aos danos causados ao meio ambiente, não seria diferente uma análise voltada para a redução dos contaminantes que são liberados pelos fluidos, sendo que estes provocam não só a poluição ambiental, mas também, dificuldade e custo da reciclagem do fluido e dos cavacos que foram molhados por eles, doenças de pele e pulmão nos operadores. Um ponto crucial nesse método, é o controle da quantidade de fluido, visto que, cada processo necessita de uma quantidade diferente de lubrificação. Para garantir que o processo seja eficiente mesmo utilizando quantidades inferiores de fluido, é necessário que as condições de usinagem sejam favoráveis para o processo e que as ferramentas possuam baixo coeficiente de atrito, com alta dureza a quente e estabilidade química. O custo com o processo é um fator primordial, e mesmo que as condições implicadas para melhoria das ferramentas devido às condições de fluido sejam elevadas, o custo total de produção pode ser menor em relação aos que utilizam vazões maiores. A técnica de MQF (Mínima Quantidade de Fluido de Corte) possui boa capacidade de lubrificação e é empregada em forma de vapor devido sua maior penetrabilidade[4,9].

Outra técnica anteriormente mencionada, é o corte a seco, embora tem-se a perda das vantagens que o fluido de corte proporciona ao processo, o ganho relativo à eliminação da aquisição e em manutenção desse bem, como danos ao meio ambiente e saúde do operador são fatores que compensam a utilização dessa técnica. Para aprimorar o processo de usinagem para que ele se encaixe

sob as condições ideais de usinagem a seco, esse tem que ser realizado com aumento do avanço e diminuição da velocidade de corte. Devido à elevação do parâmetro de avanço, o contato entre ferramenta e cavaco será maior, portanto, uma maior área receberá calor gerado no processo, por conseguinte, menor temperatura na ferramenta. Esse processo acarretará em um aumento na rugosidade da peça, e para manter essa característica uniforme, é necessário aumentar o raio da ponta da ferramenta, isso resultará em um acréscimo do comprimento de contato da aresta da ferramenta com a peça, ajudando a disseminar todo o calor gerado favorecendo assim, o processo de corte a seco[4,9].

A técnica de usinagem que utiliza resfriamento criogênico também é uma grande tendência tecnológica, uma vez que essa é uma boa alternativa em relação à agressão ambiental, porque o nitrogênio líquido utilizado para resfriamento no processo evapora no ar e não tem poder de contaminação e não precisa ser descartado. Esse método possui um bom rendimento com velocidades de corte mais baixas, aumentando a vida da ferramenta que é um fator preponderante no processo de usinagem. Os cavacos gerados são isentos de contaminação, podendo assim, ser reciclados e garantindo ao processo um maior aproveitamento de material sem desperdícios. O ponto negativo desse método, é a regulagem da vazão e pressão do nitrogênio, pois, implica refrigeramento excessivo da peça, aumentando as forças de corte[4,9].

Uma das formas mais práticas de aplicação dos fluidos de corte é por jato à baixa pressão ou por gravidade. Esse método consiste em lançar o fluido na saída da ferramenta ou na parte superficial superior do cavaco. Como neste processo o fluido vai em oposição à superfície fraturada do cavaco, facilitando a saída para fora da interface cavaco-ferramenta, promovendo a remoção de cavaco da zona de corte e garantindo qualidade no processo. Pelo processo ser simples, é o mais usual.

Outro tipo de aplicabilidade é o conhecido por sistema a alta pressão. Este tem por objetivo a quebra do cavaco, onde o fluido é disparado em duas posições, sendo a primeira sobre o cavaco e a segunda na saída da ferramenta. A grande vantagem desse método é que foi desenvolvido um sistema em que agrupamento entre suporte e ferramenta de corte fossem vazados ISCAR (1991), admitindo com que o fluido passe pelo seu interior e alcançando a superfície de saída da ferramenta. Por consequência, o fluido de corte atinge a interface com alta pressão, fazendo com que o contato entre ferramenta e cavaco seja reduzido, e assim, a vida útil da ferramenta é assegurado, além da qualidade do trabalho realizado pelo processo. Nesse tipo de emprego do fluido de corte, a ferramenta sempre manterá seu interior e a superfície de saída sendo resfriados, e o cavaco, será resfriado logo após sua deformação, e na primeira direção de aplicação, o cavaco é resfriado simultaneamente à sua deformação. Como resultado desse sistema de refrigeração no processo, ocorre um aumento da resistência ao cisalhamento no material da peça e, consequentemente, as forças de usinagem sofrem uma ascensão. Com todas essas maneiras de aplicação de fluidos e as tendências tecnológicas, é perceptível a preocupação em relação às configurações dos procedimentos realizados nos processos de usinagem, uma vez que, essas interferem indiretamente no meio ambiente devido à geração de calor e emissão de gases, que são vistos como um potencial de periculosidade alto e que podem prejudicar e degradar o sistema ambiental como um todo[6].

## CONTROLE AMBIENTAL

Nos últimos tempos, a preocupação com o meio ambiente vem sendo pauta em principais discursos e notícias, devido a grandes empresas de vários segmentos terem poluído o ambiente em sua volta com descarte de gases e líquidos não tratados diretamente em rios ou nascentes. O governo tem órgãos responsáveis pela criação de leis e fiscalização se as empresas cumprem o tratamento antes do descarte ou até mesmo meios de descarte corretos.

A indústria metal mecânica ao final de um processo de fabricação, pode gerar diversos tipos de materiais para descarte, metal que foi retirado durante os processos, fluidos também utilizados no processo. Após todo o uso do fluido de corte na usinagem, que por sinal traz grandes benefícios ao processo, encontrasse um problema quando sua vida útil termina, como realizar o descarte correto sem agredir o meio ambiente. Muitas vezes o fluido quando foi muito

utilizado e por um longo período de tempo, apresenta pH irregular, suas características químicas se alteram devido à formação de bactérias proveniente da falta de circulação do mesmo na máquina, com isso, o seu descarte se torna um tanto quanto complicado.

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)[10], na resolução de número 9/93, diz que "Considerando que o uso prolongado de um óleo lubrificante resulta na sua deterioração parcial, que se reflete na formação de compostos tais como ácidos orgânicos, compostos aromáticos polinucleares, "potencialmente carcinogênicos", resinas e lacas, ocorrendo também contaminações acidentais ou propositais". Esses efluentes quando liberados em rios, geram uma camada oleosa na superfície da água, dificultando a troca de oxigênio com o ambiente. Nesses fluidos também podem ser encontradas bactérias, que, quando em contato com a comunidade biológica presente no rio, podem trazer danos, desestabilização e até degradação total.

Os fluidos não apresentam apenas riscos para o meio ambiente, mas também ao operador do equipamento quando não se usa os EPIs corretamente. Como na usinagem o atrito entre a peça e a ferramenta é alto, gera-se calor, com isso, o contato do fluido com partes quentes, sejam elas a peça, ferramenta ou cavaco, gera névoa e gases que podem ser nocivos à saúde humana, também podendo alguma partícula de fluido entrar em contato com a pele e causar irritação. Fluidos integrais são mais prejudiciais à saúde, podendo chegar a riscos cancerígenos em alguns órgãos, mesmo que não sejam tão agressivos, outros tipos de fluidos também podem causar alguma irritação ou desenvolvimento de alguma doença, podendo piorar quando misturados com aditivos inadequados.

Algumas fábricas contam com centrais de reciclagem, que recuperam o fluido de corte, retirando impurezas e partículas de metais. Porém mesmo com tantas etapas e processos na reciclagem pode-se tornar uma atividade com alto custo financeiro, devido aos equipamentos, local e material e inviável devido ao fluido não apresentar características idênticas quando se está novo, podendo assim ter uma menor vida útil e além de trazer danos ao equipamento. Quando o óleo é filtrado, retira-se os cavacos de usinagem e são separados, esses cavacos devem ser tratados com cuidado, pois ainda estão úmidos com fluido, se o transporte não for adequado, esse fluido irá escorrer por vãos das carrocerias dos caminhões de transporte e contaminar o solo por onde passa[11].

Um problema encontrado também é o descarte do cavaco após a usinagem, mesmo após o transporte correto, quando descartado no solo, a contaminação é alta devido à presença de fluido e ao metal que demora vários anos para se decompor. Logo é preciso de um meio para a reciclagem desse material também, para que não seja despejado em local e de maneira incorreta[12].

Existem duas classificações quanto ao tipo de tratamentos de fluidos de corte, sendo químicos e físicos. Os químicos agregam a quebra ácida, que consiste na adição e agitação da emulsão juntamente com ácido, após isso, deixa-se decantar, logo em seguida é retirado o óleo e sobrando uma "lama" no tanque, não sendo necessária a remoção para o próximo tratamento. Outro modo químico é por meio de polímeros, adicionando-se polieletrólitos na emulsão, gera-se floculação da emulsão. Os métodos físicos agregam tanques de decantação, realizando a quebra química e separação das fases, outro meio é a separação por membranas que se divide em três processo: microfiltração, ultrafiltração e osmose reversa. Esses processos consistem em passar a emulsão através das membranas, porém o óleo não é totalmente separando da água, necessitando de outro tipo de tratamento. Posteriormente, também para a retirada da água da emulsão, pode-se utilizar a técnica de evaporação, na qual inicialmente são retirados todos os outros resíduos de óleos distintos da máquina e os resíduos, logo em seguida, a emulsão é levada para evaporadores que permitem apenas a evaporação da água por meio de temperaturas controladas[12].

Com base nas pesquisas bibliográficas e nos conhecimentos mencionados, o objetivo deste trabalho científico é analisar os fluidos de corte utilizados no equipamento "Torno CNC Romi Centur 30D", do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, realizando assim os testes químicos e físicos que avaliam a degradação durante um período de utilização e armazenagem no

equipamento, gerando assim uma comparação entre os fluidos utilizados. Durante a realização da pesquisa, foram empregados ao equipamento dois tipos diferentes de fluidos de corte, sendo eles o fluido vegetal e fluido mineral, ambos solúveis em água.

# Metodologia

Inicialmente foi coletada uma amostra do fluido (coleta 1) que estava no equipamento, para análise comparativa, posteriormente, realizou-se a troca para um novo fluido de corte vegetal (coletas 2 a 7), sendo ele, Óleo solúvel biodegradável, da marca Vonder, lote nº 214, permanecendo em uso durante 70 dias. Neste período, foram coletadas 6 amostras em intervalos de 13 a 15 dias, entre uma coleta e outra. Ao longo de 27 dias, ocorreu a interrupção da pesquisa, devido à degradação excessiva do fluido no equipamento, impossibilitando o uso deste, fazendo com que as coletas retornassem quando um novo fluido de corte fosse adquirido e realizado a troca no reservatório do torno CNC.

Após a troca de fluidos, foi empregado o fluido de corte mineral Sivalane Solúvel Extra (coletas 8 a 12), da marca Siva Siroll, lote nº 08/04, permanecendo em uso em um período de 70 dias, para que os períodos de trabalho e intervalo de dias entre as coletas fossem idênticos ao fluido anterior, resultando em apenas 5 amostras coletadas, devido à falha no procedimento de coleta e armazenagem a amostra do dia 03 de agosto de 2019 foi indisponibilizada e descartada. Ambos os fluidos estavam contendo a mesma concentração dentro do reservatório, sendo ela de 1 parte de óleo, para 20 partes de água.

Todas as amostras foram armazenadas em frascos de vidro âmbar (200 *ml*), previamente higienizados com água corrente e detergente neutro e esterilizados com álcool 70%. Foram identificados com o tipo de fluido e data da coleta, logo em seguida, estocados até a última data de coleta, para realização dos testes físicos e químicos. Dentre os testes químicos realizados, há: pH, condutividade elétrica e densidade. As amostras foram colocadas em Becker de 100 *ml* e enumeradas de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1:** Dados das coletas. **Fonte:** Autores.

| NÚMERO DA AMOSTRA | TIPO DE FLUIDO DE CORTE | DATA DA COLETA | TEMPO DE PERMANÊNCIA NO TORNO CNC (dias) |
|---|---|---|---|
| 01 | Vegetal | 27/03 | Indeterminado |
| 02 | Vegetal | 27/03 | 0 |
| 03 | Vegetal | 10/04 | 14 |
| 04 | Vegetal | 24/04 | 14 |
| 05 | Vegetal | 09/05 | 15 |
| 06 | Vegetal | 22/05 | 13 |
| 07 | Vegetal | 05/06 | 14 |
| 08 | Mineral | 04/07 | 0 |
| 09 | Mineral | 19/07 | 15 |
| 10 | Mineral | 16/08 | 13 |
| 11 | Mineral | 29/08 | 13 |
| 12 | Mineral | 12/09 | 14 |

Para a realização da aferição do pH, foi utilizado um medidor de pH (pHmetro), modelo Q-400A da marca QUIMIS. Em cada amostra, o eletrodo foi posicionado dentro do Becker de 200 mL, até a estabilização da leitura, tendo o resultado mostrado no visor. A medição da condutividade elétrica foi realizada por meio de um condutivímetro portátil da marca QUIMIS, modelo Q-795P. O equipamento é interligado a um eletrodo, no qual foi submergido dentro da amostra, logo em seguida aguardaram-se cerca de 5 minutos até a estabilização dos dados mostrados no visor.

Para a medição da densidade de cada amostra, foram utilizados Picnômetros de 25 mL, cada um foi pesado individualmente vazio, juntamente, com sua tampa em uma balança de precisão devidamente calibrada. Em seguida, foi adicionado a amostra do fluido de corte dentro da vidraria e foi levado à balança novamente, com isso o resultado foi obtido mediante a diferença da massa entre as duas etapas de pesagem pelo volume do Picnômetro.

O teste de viscosidade foi realizado com um viscosímetro, da marca QUIMIS, modelo Q860M21, que possuía 4 Spindles, no qual cada um desses era destinado a um nível de viscosidade, sendo o Spindle 1 para menores viscosidades e o Spindle 4 para maiores viscosidades. O equipamento ainda contava com duas velocidades de

rotação (30 e 60 rpm). O Spindle utilizado foi o de número 1, em uma rotação de 60 rpm, pois apenas com estes parâmetros era possível obter um resultado no visor. As amostras foram colocadas em Beckers de 200 mL e o rotor do equipamento foi submergido até o nível necessário. Após isso, foi acionado e aguardado um minuto até a estabilização do resultado, com isso a amostra era retirada e o visor apresentava o valor final, sendo este apresentado em Pascal×Segundo (Pas). Contudo para melhor comparação com as bibliografias, é necessária a conversão para outras duas unidades, sendo a primeira Centipoise (cP) e a segunda Centistokes (cSt).

A conversão de (Pas) para (cP) é apenas uma multiplicação por um mil (x1000), pois (cP) é o mesmo que milipascal×segundo (mPa.s) sendo ambas unidades de viscosidade dinâmica. Já a conversão de (Pas) para (cSt), exige a alteração de viscosidade dinâmica para viscosidade cinemática (viscosidade absoluta / densidade), necessitando assim da multiplicação do resultado em (cP) vezes o inverso da densidade, conforme Equação 1[13].

$$cSt = cP * \frac{1}{Densidade} \quad \text{(Eq. 01)}$$

Para realização entre as amostras de todos os experimentos, os equipamentos foram higienizados com água destilada e álcool 70%, a fim de evitar qualquer contaminação entre as amostras. A partir dos dados coletados, foram elaborados gráficos para melhor visualização dos resultados e comparação com o referencial teórico que é relacionado com este tema.

# Resultados e Discussão

Primeiramente, foi realizada a análise do pH dos fluidos de corte, sendo necessária a comparação com as fichas técnicas de ambos os fluidos. O fluido vegetal não apresenta dados concretos com relação à sua composição, sendo de 80 a 90% segredo industrial, 10 a 20% de óleo vegetal e de 1 a 5% Dietanolamina, dificultando assim a apuração de dados. O fluido mineral por mais simples que seja sua composição (85% Óleo Mineral, 15% Emulgadores) não apresenta o valor do seu pH em sua ficha técnica, inviabilizando sua comparação com os resultados[14,15].

Na Figura 2 é apresentado o valor do pH de cada amostra, sendo levado em consideração os dias das coletas e as horas trabalhadas entre estes períodos. Pode-se notar que quando o equipamento possui algum valor de horas trabalhadas, por menor que sejam, o pH tende a subir, apresentando características de base. O contrário também acontece quando o fluido fica em estado estacionário, tendo uma queda brusca do seu pH atingindo características de ácido, sendo altamente prejudicial para o maquinário.

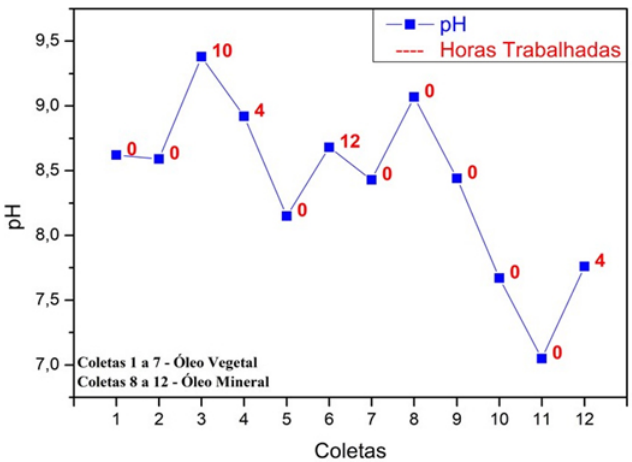



**Figura 2:** pH x Coleta. **Fonte:** Autores.

As amostras de fluido de corte vegetal apresentaram certa discrepância com os valores informados na ficha técnica do produto (pH 9 a 10), em que valores próximos a estes só foram alcançados com a utilização do fluido a partir de 10 horas de trabalho. Levando em consideração o fluido de corte mineral, este não apresenta o valor do seu pH em sua ficha técnica. No entanto é perceptível uma queda brusca do seu pH, chegando ao valor de 7, no qual o fluido adquire propriedades de uma solução neutra[14,15].

Segundo MARCELINO (2012)[16], o nível do pH para ser aceito nas indústrias deve ter valor a partir de 8,7, valores que estejam entre a faixa de 8,7 - 7,8 é recomendada a

utilização de aditivos para o controle. Entretanto, caso o pH do fluido seja abaixo de 7,8 a ação mais recomendada é que seja realizado a troca do fluido. Abordando também outro fator importante, sendo o de contaminação de microrganismos, a partir do estudo de CARVALHO (2017)[17] é compreendido que, a diminuição do pH é um indicativo da existência de bactérias ou fungos dentro do fluido de corte, podendo ser denotado também por fatores como: odor, diminuição das vidas úteis da ferramenta e do fluido, corrosão, dentre outros[18].

A condutividade elétrica é relacionada com a capacidade de um material conduzir ou inibir eletricidade, neste caso aumenta conforme a quantidade de metais que entram em contato com o fluido de corte, pois quando pequenas partes do cavaco ficam imersas sobre o fluido de corte em estado estacionário, é iniciado um processo de corrosão do metal, mais especificamente uma corrosão eletroquímica, neste caso sofrendo efeito da solução aquosa do fluido onde o metal, formado por átomos de ferro (Fe), libera os elétrons ($2e^-$) para o meio que está envolvido:

$$Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^- \qquad \text{(Eq. 02)}$$

Estes elétrons que entram em contato com o fluido, aumentando sua condutividade, buscam estabilizar-se juntamente com os átomos de água ($H_2O$) e oxigênio ($O_2$), através de um balanceamento químico e conforme o trabalho de FRAUCHES-SANTOS (2014)[19], quando o meio é considerado básico ou neutro com presença de oxigênio, como o caso deste estudo, formam assim a seguinte equação química:

$$H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^- \qquad \text{(Eq. 03)}$$

Portanto são obtidas duas moléculas de hidroxila, que ao entrar em contato com as moléculas de ($Fe2^+$), formam o hidróxido de ferro ($Fe(OH)_2$), que presente em um meio aquoso alcalino, realiza a quebra das moléculas (hidrólise), liberando assim átomos de óxido de ferro II (FeO), não se descarta a possibilidade da liberação de óxido de ferro III ($Fe_2O_3$), ambos contribuem para a mudança de coloração de fluido, tornando-o amarronzado[18].

$$2\,Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2\,Fe(OH)_3\ ou\ FeO.OH \qquad \text{(Eq. 04)}$$

A Figura 3 demonstra o comportamento da condutividade elétrica de acordo com o período de tempo avaliado, tendo um maior acréscimo principalmente no fluido vegetal, devido ao maior número de horas trabalhadas. É possível notar também a diferença de condutividade quando os fluidos são recém colocados no reservatório. Portanto, o fluido de corte vegetal tem uma maior tendência a formar os óxidos de ferro citados, aumentando assim os aspectos da coloração de tom marrom dentro do tanque.

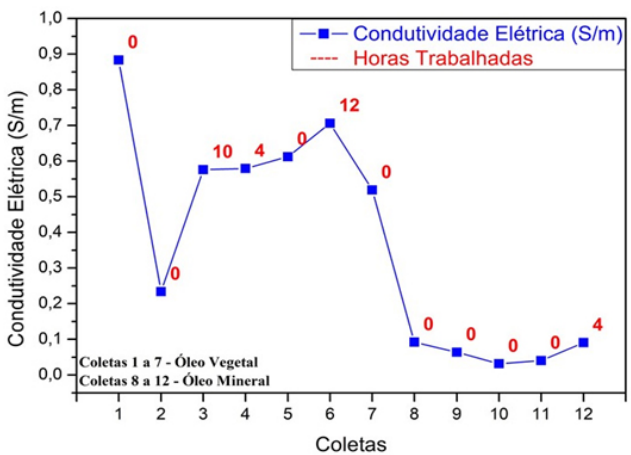



**Figura 3:** Condutividade Elétrica x Coletas. **Fonte:** Autores.

Como as fichas técnicas não informam as respectivas condutividades dos fluidos de corte, o teste de condutividade elétrica é direcionado para demonstrar o crescimento de substâncias corrosivas (óxido de ferro) dentro da solução, que além de aumentar o pH, podem acarretar possíveis problemas ao equipamento, caso não

possua tratamentos químicos durante sua fabricação ou sofra ranhuras na camada de proteção do material. Comparando os dados do fluido mineral com os resultados encontrados por MARCELINO (2013)[20], pode-se verificar que os valores encontrados durante o ensaio condizem com os apresentados pelo autor, em que após 6 meses de seus estudos, verificou-se um aumento de 0,07506 S/m para os dados do autor e de 0,06040 S/m para o fluido mineral analisado neste estudo de caso[14,15].

A densidade de um fluido, é a relação de massa ($g$) por seu volume ($m^3$), estes valores podem se alterar de acordo com a proporção de óleo e água utilizados nos devidos fluidos. O teste de densidade, além de fornecer dados para comparação com as devidas fichas técnicas, teve como intuito principal informar estes valores para a elaboração dos cálculos de conversão para o teste de viscosidade, além do mais, é visível o comportamento dessa no decorrer da vida útil dos fluidos, conforme Figura 4.

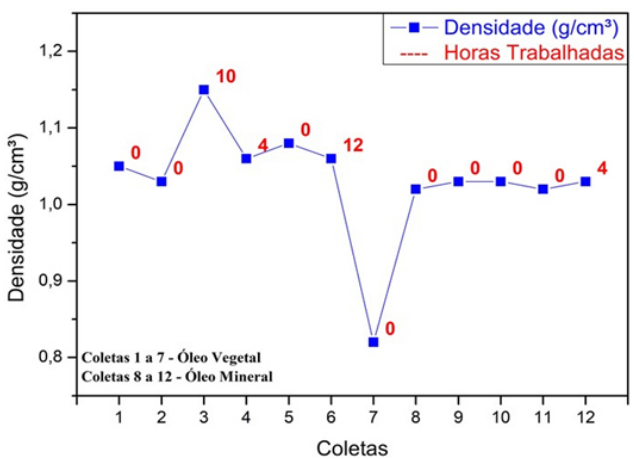



**Figura 4:** Densidade x Coletas. **Fonte:** Autores.

Ao analisar o comportamento da densidade dos fluidos é perceptível uma discrepância com o passar do tempo, mais evidentemente no fluido de corte vegetal. Isto se deve ao fato de que teve uma maior carga horária de trabalho, entrou em contato por mais tempo com o cavaco gerado pelo processo, o que deve ter ocasionado uma adição de pequenas partículas de ferro, com o passar das quinzenas, o metal acumulado no fluido entrou em processo de oxidação e formou uma borra de ferrugem, por possuir uma menor densidade que o fluido, acabou acumulando-se na superfície do reservatório. Durante as coletas, como possuía forte odor e dificultava armazenagem, programou-se para evitar a coleta do fluido com grande partes de resíduo superficial.

Essa proposta para coleta pode ter ocasionado estes valores divergentes para avaliação. Entretanto, ao avaliar a ficha técnica do fluido de corte vegetal, fica compreendido que os dados coletados estão de certa forma, coerentes com a ficha, por que a mesma apresenta uma densidade de 1,02 a 1,05 g/cm³ e como a maior parte da solução é água, apresentaria um valor próximo de 0,997 g/cm³ a 25ºC. A última coleta do fluido vegetal teve um alto índice de decaimento da densidade, provavelmente, ocasionado pela perda precoce da vida útil. O fluido de corte mineral, por sua vez, não teve horas trabalhadas nas primeiras coletas, por isso, manteve sua densidade constante em todo o período de avaliação, tendo um pequeno acréscimo, devido à soma de 4 horas trabalhadas na última coleta[14,15].

Em sua ficha técnica, apresenta densidade de 0,877 g/cm³ e com a adição de água, a densidade do mesmo tendeu a elevar, o que é perceptível a olho nu quando misturado o fluido puro com água. O estudo da densidade dos fluidos de corte não possui um direcionamento tão específico e, na maioria das vezes, são realizados com intuito de comparação com a ficha ou norma técnica desses. Comparando os resultados com diversos autores, as densidades encontradas são bem equivalentes e coerentes com as especificações de sua utilização, variando de acordo com a concentração e temperatura durante análise [14,15].

Do mesmo modo que os demais ensaios realizados, foi necessário primeiramente conferir a ficha técnica de ambos os fluidos para prosseguir com a comparação da viscosidade, em que respectivamente os valores são: 40 a 90 cSt para o fluido vegetal e 10,2 cSt para o fluido mineral. Torna-se necessário realizar a conversão de unidades para análise dos dados e de acordo com a Figura 5 são exibido os valores coletados da viscosidade em duas unidades

dinâmica (cP) e cinemática (cSt). Algumas amostras não apresentaram resultado no dispositivo, devido à baixa faixa de valores que possui, tornando assim um fator limitante[13].

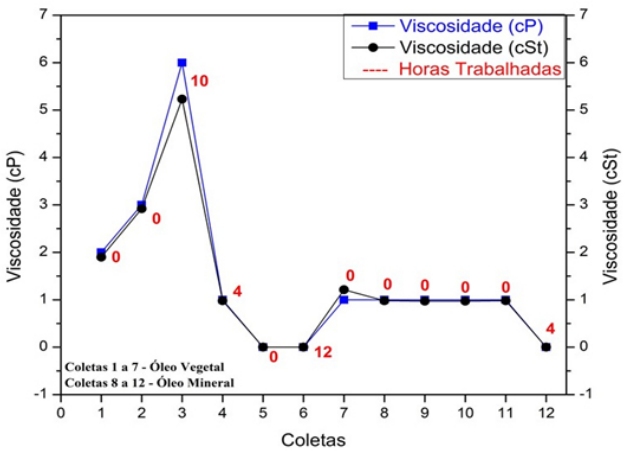



**Figura 5:** Viscosidade x Coletas. **Fonte:** Autores.

Analisando os valores obtidos na Figura 5, é possível observar que os resultados das amostras de fluido de corte vegetal decaem drasticamente, isso é devido à possibilidade de o fluido vegetal ter ocorrido uma proliferação de microrganismos, juntamente com partículas metálicas da usinagem realizada, o que fez esse ter uma característica refrigerante maior que a de lubrificante, acarretando também em instabilidade na viscosidade, devido a sua baixa vida util. O fluido mineral teve uma constância em seus valores pelo fato de ter poucas horas de trabalho, obtendo-se uma característica de refrigerante dominante[14,15,17].

A partir das premissas acima sobre os resultados gerados tornou-se possível a avaliação com o estudo de CARVALHO (2017)[17], no qual a autora analisa o desempenho de dois fluidos de corte, um de origem vegetal e outro mineral. Os valores alcançados através dos testes de viscosidade apresentam compatibilidade com os encontrados neste trabalho, no qual os valores encontrados pela autora foram, para o fluido de corte vegetal é encontrado entre uma faixa de 1,13 a 6,46 cP (1,14 a 6,53 cSt) e para os fluidos de corte mineral de 0,81 a 1,03 cP (0,81 a 1,03 cSt). A queda de valores para a viscosidade que é observada, é explicada por meio do ataque de bactérias e fungos presentes nas emulsões, que degradam os emulgadores e a matéria orgânica presente nos fluidos, auxiliando para a instabilidade da viscosidade. Considerando que os fluidos analisados possuem diferentes porcentagens de concentração e, portanto, estes resultados se devem, de acordo com a autora, ao fato de os fluidos estão miscíveis em meio aquoso, sua viscosidade será próxima da água [17,20].

Um adendo importante sobre a vida útil do fluido, não é especificado nas fichas técnicas nem em bibliografias com esta temática a validade que um fluido de corte tem no processo de usinagem. Entretanto, na placa de identificação do torno CNC deste estudo, é citado que a cada 6 meses deve ser feita a troca do fluido.

# Conclusões

Ao finalizar as comparações e apurações de resultados, os seguintes pontos devem ser destacados, primeiramente, ambos os fluidos de corte analisados neste trabalho, possuíam um desempenho baixo durante o período de avaliação. O fluido de corte vegetal, por ser maior parte da sua composição segredo industrial, deixou alguns aspectos em dúvidas, como a presença de aditivos, especificamente detergentes e biocidas que poderiam prolongar a vida útil do mesmo. O fluido de corte mineral apresentou melhor performance devido às poucas horas trabalhadas, porém seu pH decaiu muito por esse mesmo fator, o que é um risco ao torno. Este fator de horas trabalhadas contribuiu negativamente neste caso, pois já é de conhecimento geral, que equipamentos mecânicos devem manter uma constância de funcionamento, o que não foi executado de fato, pois é calculada uma carga de 30 horas trabalhadas em um período de aproximadamente 170 dias, o que provoca a formação de problemas mecânicos dentro deste torno CNC, desde problemas com a lubrificação dos eixos, possibilidade de travamento de partes e como visualizado, uma perda antecipada dos fluidos de corte.

Outra circunstância verificada foram as concentrações utilizadas neste torno e, segundo a própria placa de identificação do equipamento, é necessário cerca de 60% de

fluido de corte para operações. Todavia essa recomendação é para funcionamento industrial, que exige alta porcentagem que acarreta em um acréscimo no valor, como o maquinário é utilizado para fins didáticos, não é necessário a mesma porcentagem. Porém devem-se procurar alternativas para evitar possíveis problemas, como o estudo para viabilizar a quantidade de fluido necessários em casos específicos como este.

As considerações finais devem ser: buscar novos fluidos de corte, de preferência de origem vegetal, por ser menos agressivo ao meio ambiente e ao operador, mas que possuam os aditivos já mencionados; verificar o reservatório de fluido periodicamente para a constatação na mudança de odor, coloração e surgimento de partículas superficiais, juntamente com a devida limpeza; incentivar a utilização do torno CNC, principalmente, com a participação dos discentes do curso ou por meio de prestação de serviços em geral. Por fim o descarte correto do fluido após uso, sendo uma proposta caso possível, por meio de incineração como já ocorre com os resíduos hospitalares gerados pela instituição ou buscando a forma mais correta perante a legislação ambiental, direcionando o fluido para uma estação de tratamento adequada a este tipo de efluente.

# Referências


1. Almeida PS de. Processos de Usinagem: Utilização e Aplicações Das Principais Máquinas Operatrizes. 1o. (Editora Érica, ed.). São Paulo - SP; **2015**. https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520070/cfi/2!/4/4@0.00:7.59.
2. Quimatic T. A Influência dos Fluidos de Corte na Usinabilidade dos Metais. https://www.quimatic.com.br/blog/2016/02/a-influencia-dos-fluidos-de-corte-na-usinabilidade-dos-metais/. Published **2016**. Accessed August 29, **2019**.
3. Ferraresi D. Fundamentos Da Usinagem Dos Metais. 17o ed. São Paulo - SP: Edgard Blücher; **2017**.
4. Diniz, Anselmo Eduardo; Marcondes, Francisco Carlos; Coppini NL. Tecnologia Da Usinagem Do Materiais. 9o ed. São Paulo - SP: Artliber Editora; **2014**.
5. Machado ÁR, Abrão AM, Coelho RT, Silva MB da, Ruffino RTPP-SP. Teoria da Usinagem Dos Materiais. 2012:397.
6. Santos SC, Sales WF. Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais. São Paulo Artliber. **2007**;246.
7. Finzi MB de A. Fluidos de corte e suas indispensáveis e necessárias características protetivas ao sistema no qual circulam. **2017**.
8. Lima HV. Análise do Comportamento do Fluido de Corte Recuperado / Reformulado no Processo de Retificação Hugo Vilaça Lima Análise do Comportamento do Fluido de Corte Recuperado / Reformulado no Processo de Retificação. **2013**:117.
9. Lisboa FC de, Moraes JJB de, Hirashita M de A. Fluidos De Corte : Uma Abordagem Geral E Novas. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador - BA; **2013**.
10. CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução No 9. 31/08/93.
11. Vieira C, Pasqualini A, Alexandrini F, Alexandrini CFD, Hasse CR. Reaproveitamento de Óleo de Corte em Centros de Usinagem no Setor de Suportes na Metalúrgica Riosulense S.a. **2012**. https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos12/28416236.pdf.
12. Dandolini DL. Gerenciamento Ambiental de Fluidos De Corte Em Indústrias Metal-Mecânicas. **2001**.
13. Khonsari MM, Booser ER. Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication. John Wiley & Sons; **2017**.
14. Vonder. FISPQ – Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos.; **2019**:7.
15. SivaSiroll. Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ).; **2018**:9.
16. Marcelino A, Mg LIOC, Mg LRC, Mg CRC, Mg HVC. Propriedades dos fluidos de corte sem contaminação e com contaminação. In: ; **2012**:1.
17. Carvalho D oliveira almeida. Comparação do desempenho de fluidos de corte de base vegetal e mineral no torneamento do aço ABNT 1050. **2017**:170.
18. Fogo FC. Avaliação e critérios de eficiência nos processos de tratamento de fluido de corte por Eletroflotação. **2008**:117.
19. Frauches-Santos C, Albuquerque MA, Oliveira MCC, Echevarria A. The corrosion and the anticorrosion agents. Rev Virtual Quim. **2014**;6(2):293-309. doi:10.5935/1984-6835.20140021
20. Marcelino Lido, Silva LR da, Calado CR, *et al*. Fluido De Corte Mineral Emulsionável: Monitoramento, Análise Da Degradabilidade, Reformulação E Estratégias De Aumento De Tempo De Vida No Processo De Retificação. In: 7o Congresso Brasileiro de Engenharia De Fabricação. Vol 1. Itatiaia – RJ; **2013**:130. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Filipe Y. G. Luz*, Bruno S. Miranda, João V. M. Torres, Sérgio M. Brandão & Adriano P. Ramiro

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: filipe-yan@hotmail.com

# Aplicação de Tratamento Estatístico Utilizando o Método de Tukey para Análise de Ruído e Vibração de Veículos SUV

Lays E. Cunha, Paulo Zavala & Fábio S. Gomes

A aplicação de métodos combinados para análise estatística de parâmetros de conformidade é convencional e utilizado desde os primeiros conceitos de estatística descritiva. Partindo deste princípio, este trabalho teve como objetivo demonstrar o comportamento de uma proposta de métricas para ruído e vibração interna veicular, utilizando para tanto a análise três sigma (distribuição normal) e o método de John Tukey. Este método em conjunto com os resultados da análise sigma caracterizou valores de distintas grandezas, possibilitando padronizar para os veículos da mesma categoria (SUV) os limites adotados. Os resultados obtidos na amostra mensurada geraram valores de LMS (limite superior) advindos do método de tukey, estes correlacionaram se com a amplitude estudentizada possibilitando a adaptação de um padrão e viabilizando confrontar as medições subsequentes destinadas a avaliação de conformidade produtiva.

**Palavras-chave:** *ruído; vibração; método de tukey.*

The application of combined methods for statistical analysis of compliance parameters is conventional and used since the first concepts of descriptive statistics. Based on this principle, this work aimed to demonstrate the behavior of a proposal of metrics for noise and vehicular internal vibration, using the three sigma analysis (normal distribution) and the John Tukey method. This method together with the results of the sigma analysis characterized values of different quantities, making it possible to standardize the adopted limits for vehicles of the same category (SUV). The results obtained in the measured sample generated LMS values (upper limit) from the tukey method, which correlated with the studied amplitude, allowing the adaptation of a standard and enabling the comparison of subsequent measurements aimed at evaluating productive conformity.

**Keywords:** *noise; vibration; tukey's method.*

# Introdução

Por vários anos, pesquisadores têm buscado definir o sentido da utilização dos conceitos estatísticos no cotidiano. A utilização de teorias baseadas em probabilidade, a estatística possibilita-nos fazer inferências de fenômenos futuros, com base em uma coleta de dados de eventos passados, trabalhando tanto com dados observacionais quanto em experimentos, minimizando assim a incerteza dos experimentos. Para profissionais da engenharia ela proporciona previsões úteis sobre a demanda e distribuição de eventos na área de planejamento e controle de produção[1].

Neste raciocínio Toledo[2] descreve a estatística como:

> Cada vez mais acentuada em qualquer atividade profissional da vida moderna. Nos seus mais diversificados ramos de atuação, as pessoas estão frequentemente expostas à Estatística, utilizando-a com maior ou menor intensidade. Isto se deve às múltiplas aplicações que o método estatístico proporciona àqueles que dele necessitam.

Portanto, de acordo com as considerações apresentadas acima, o controle estatístico de processos é uma ferramenta baseada em conceitos e técnicas da estatística e da engenharia de produção que trabalha em conjunto no controle da qualidade nas etapas de um processo, ou seja, é um método preventivo a fim de comparar resultados com um padrão já existente e a partir de técnicas estatísticas eliminar ou controlar certas variações[3]. O Controle de Qualidade também é uma medida adotada com o objetivo de definir e monitorar padrões de produto e processo produtivo almejados, visando elevar o grau de satisfação do consumidor, acionistas, funcionários e fornecedores[4].

Seguindo este pensamento existem alguns marcos históricos que demonstram as ocorrências e eventos desde a criação da estatística até o desenvolvimento do método de Tukey em 1953[5].

- 5000 aC - Registros egípcios de presos de guerra.
- 695 - Primeira utilização da média ponderada pelos árabes na contagem de moedas.
- 1918 - Definição formal de Variância em um artigo de Genética (Fisher) e Distribuição de von Mises.
- 1923 - Tabela A NOVA (Fisher) e Processo de Wiener.
- 1930 - Controle de Qualidade nas indústrias, Inferência Fiducial (Fisher), Distância de Mahalanobis, Tempo Médio de Espera na Fila M/G/1 (Pollaczek) e Fundação da Econometria.
- 1949 - Método de Linearização, Eficiência em Grandes Amostras (Neyman) e Teste de Aditividade de Tukey.
- 1953-Teste de Tukey da diferença honestamente significativa.

Ao realizar a análise de variância (ANOVA) de um experimento com dois tratamentos, visualiza-se apenas pela média qual o melhor tratamento. Entretanto, quando existe mais de dois tratamentos, fazendo apenas o teste de "f" (teste que aponta a existência de diferença entre as médias dos tratamentos) não há indicação precisa de qual o melhor tratamento. Neste caso, é necessário aplicar um teste de comparação de médias dos tratamentos, daí podendo concluir qual o melhor tratamento[5].

Então os testes de comparação de média servem como um complemento para o estudo da análise de variância. Há vários testes de comparação de médias, entre os quais podem ser citados: teste de Tukey, teste de Duncan, teste de Scheffé, teste de Dunnet e teste de Bonferroni[5].

Dito isto, visando melhorar o controle estatístico de processos (CEP) para limiares produtivos de ruído interno, há a necessidade de compreender o ramo da engenharia destinado ao estudo e avaliação de fenômenos acústicos e oscilatórios. Este é representado pela sigla NVH (Noise, vibration and Harshness / Ruído, vibração e aspereza). Esta sigla tem um significado confuso, porém pode ser definida como a qualidade acústica levando em consideração as exigências e o grau de satisfação que o corpo humano requer[7]. A qualidade acústica tem três tipos distintos de influências variáveis: Psicológicas (avaliação), Psicoacusticas (percepção) e físicas (Intensidade). Abdel-Rahman considera que mensurar a qualidade acústica

de um veículo, além de multidimensional (culminando na classificação de experiências sensoriais humanas) é uma tarefa subjetiva[8]. A identidade de um veículo também está expressa nas características acústicas dele, tais parâmetros influenciam significativamente na decisão do cliente[9].

A estatística tem sido aliada da acústica, pois o trabalho em conjunto delas trouxe uma parametrização dos dados exigidos normativamente para apresentação de controle de ruídos. Ações de estudos comparativos entre marcas e modelos têm sido amplamente feitas por meio de tais análises remetendo a mídia parâmetros para avaliação de veículos[6].

Partindo do princípio de conceitos estatísticos, o presente estudo se baseia nas características descritas acima de parâmetros, entretanto este visa o controle do conforto acústico no interior de veículos SUV, levanto em consideração instrumentação, aquisição e tratamento estatístico de dados processados. Por meio deste princípio, foram utilizados métodos estatísticos descritivos combinados para abranger as variações de unidades e situações apresentadas.

# Metodologia

## REFERENCIAL TEÓRICO

O som é apenas uma vibração propagada transmitida em um meio (ar ou outro), e audível quando chega ao ouvido humano. A faixa do limiar auditivo de uma pessoa geralmente varia entre 20 Hz a 20 kHz, havendo mais sensibilidade na faixa de 100 Hz a 15 kHz. Vibrações são percebidas abaixo de 200 Hz, podendo nesta faixa serem tanto sentidas quanto ouvidas. Pressão sonora acústica (P) serve de base nos estudos dos sons[10]. A faixa de pressão sonora audível está entre 2.10-5 N/m²<P<20 N/m². Geralmente não é prático utilizar esta faixa pois ela é suscetível a grandes variações. Sendo esta escala de manuseio complicado e não linear. Portanto a medida do nível de pressão sonora estudada será apresentada em decibel, uma vez que esta escala logarítmica se aproxima da percepção do ouvido às flutuações de pressão sonora[11].

A escala bel é sem dimensão (relativa), e traz uma comparação quantitativa em relação à um valor referência, tomando como base limites inferiores ou superiores. A escala decibel possui algumas curvas e a que mais se adéqua ao projeto é a escala dBA, comumente usada nas avaliações de ruído interno como apresentado na Figura 1 a seguir:

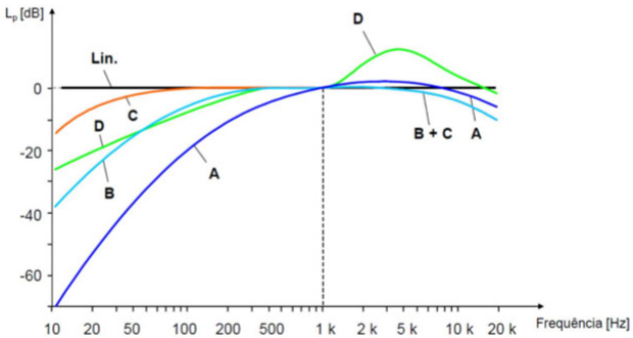



**Figura 1:** Escala dB. **Fonte:** ZAVALA[12]

Para Zavala, ruídos baixos a curva de ponderação acústica que melhor se aproxima da sensibilidade humana é a do tipo A, portanto é expressa como dBA ou dB(A)[12].

Além da percepção acústica humana, também serão considerados os parâmetros de Articulation Index (% Inelegibilidade humana) que se trata da quantidade que compreendemos dentro do nosso limiar auditivo em uma conversa. Os parâmetros de Articulation index também são considerados durante o tratamento de dados na escala dBA[7].

Outro aspecto a se considerar é a análise de vibrações dentro de um veículo, uma vez que a quantidade de vibração (torcional ou não) produzida nos componentes veiculares influencia diretamente nas tratativas de problemas e até mesmo na decisão final do cliente. Oscilação (Vibração) pode ser explicada como qualquer movimento com repetição em determinado intervalo de tempo. Dentro das avaliações em uma medição internal noise (ruído interno) de NVH para veículos automotores, deve-se considerar a normativa ISO 2631 que traz formulações e parâmetros acerca da exposição humana de vibrações de corpo inteiro. Além destes parâmetros deve-se levar em consideração a exposição humana a vibrações transmitidas às mãos e aos braços contidos na ISO 5349[13,14].

Definir limites para emissões de ruído e vibração em veículos automotores no Brasil vêm sendo tratado por normativas como a NBR 15145 e a resolução do CONAMA n° 1, de 11 de fevereiro de 1993. Sendo que elas têm feito referência a ruído de passagem (Passbynoise)[15,16].

## MATERIAIS

Com o intuito de ter dados métricos, utilizou – se um padrão de equipamentos e configurações para gerar confiabilidade nas medições. A aquisição de dados com:

- 4 microfones (que possuem pré-amplificadores) de ½" e flutuação sonora próxima ao limiar humano;
- 2 acelerômetros triaxiais (captando as ondulações em X, Y e Z);
- 1 módulo para computar os dados;
- 1 tacógrafo para registro de dados rotacionais (RPM);
- O software signatureaquisition do conjunto simcenter testlab desenvolvido pela empresa Siemens.

**Figura 2:** Microfone e acelerômetro.
**Fonte:** SIEMENS [17], PCB [18]

**Figura 3:** Speedsensor.
**Fonte:** KMT [20]

O posicionamento dos microfones ajustado com a referência de 75 centímetros (verticalmente) do assento até a metade do encosto de cabeça do banco, partindo deste ponto mais 13 centímetros até a ponta do microfone no sentido horizontal, e da haste de suporte o microfone 8 cm para fora (evitando interferências com o suporte). Todos os microfones calibrados para 94dBA (configuração de fábrica).Os acelerômetros configurados com as fórmulas de ponderação contidas nas normativas ISO 2631 (SW12h – *Steering Wheel at 12 hours posistion*) e ISO 5349 (Dfost - *Driver front outboardseat track*). Sendo posicionados o Dfost no assoalho do veículo e o SW12h no volante para captar as vibrações de corpo inteiro e mãos e braços respectivamente. O tacógrafo conectado a entrada OBD do veículo e o módulo de aquisição de dados[13,14,19].

## AQUISIÇÕES DE DADOS

Este estudo avaliou os veículos em modo estacionário (na marcha drive) com o ar condicionado ligado, e em velocidade de cruzeiro. O teste de idle (conhecido como ocioso/ estacionário) é coletado relacionando tempo e ruído produzido. Durante 10 segundos será captada uma medição de insuflamento (com o ar ligado). Cinco medições são realizadas, objetivando prever possíveis descartes por adversidades externas ou configurações e ruídos anormais no veículo, em trecho de asfalto.

Em cruise (como o próprio nome diz "velocidade de cruzeiro") as medições realizadas em trecho de concreto a 120 km/h. Este também terá a aquisição de 5 medições em cada condição de velocidade, uma vez que as variações também serão consideradas nas análises das curvas de dBA por tempo.

## PROCESSAMENTOS DE DADOS

Após mensurados os dados, e processados no software simcentertestlab 19.1 versão desktop advanced obteve - se os SN (Single Numbers). Estes números baseiam-se nas corridas realizadas e nas ponderações por meio de filtros de cálculo das normativas ISO5349 e ISO2631. Com as médias energéticas (Single numbers) submetidas

à análise sigma, considerando $k$ = 1,5 por se tratar de uma distribuição normal gaussiana os dados foram tratados utilizando o Sisvar[13,14,21].

Análises de limiares produtivos vêm sendo produzidas pelo método seis sigma, considerando uma distribuição normal de variáveis. O CEP (Controle Estatístico do Processo) Este tipo de estudo estatístico se baseia no desvio padrão multiplicado por um fator (K).

$$\sigma = k * desvpad \quad \text{(Eq.01)}$$

Entretanto considerando K como 3 ou 1,5 tem-se valores próximos ao limite superior da amostra estudada remetendo a uma distribuição gaussiana. Esta análise é comumente utilizada para delimitar limites do processo e gerenciamento da qualidade[22-24]. Ao partir da hipótese que a variável que se quer controlar segue uma distribuição normal, objetiva-se ter controle sobre o desvio padrão e a média. Caso não exista variação ao longo do tempo, tal dado pode ser caracterizado como um "processo sobre controle". Os dados aquisitados também seguiram o princípio da distribuição gaussiana, visando traçar o limite máximo para os parâmetros de ruído e vibração, partindo das seguintes equações:[25-27].

$$Limitemáx = média + \sigma \quad \text{(Eq.02)}$$

$$\%\ devariaçãodaamostra = \frac{\sigma}{média} \quad \text{(Eq.03)}$$

Os cálculos de limites máximos foram baseados também na diferença significativa de Tukey. Método desenvolvido por John Tukey em 1953, embasado na comparação de variáveis, levando em consideração uma amostra normalizada de médias, partindo da atribuição da mínima diferença significativa e a amplitude estudentizada e não o percentual como no método sigma. Representado por:

$$TSD = q\alpha.(k, n-k).\sqrt{\frac{QME}{n}} \quad \text{(Eq.04)}$$

A TSD (Tukey significant diference – Diferença significativa de Tukey) se baseia na amplitude estudentizada (G ou k,k-n), no quadrado médio dos resíduos (QME) e número de replicas do nível (n).Para tamanhos amostrais balanceados, o teste de Tukey declara duas médias significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças não ultrapassar a amplitude (diferença do menor e maior valores mensurados neste comparativo), como representado por:

$$Ymáx - Ymín > TSD \quad \text{(Eq.05)}$$

Partindo da correlação entre a igualdade da amostra e sua distribuição, os limites foram então calculados, visando ter uma amplitude estudentizada para suprir a variação dos valores de vibração nas condições propostas e parametrizar este valor para todos os modelos participantes do estudo.

# Resultados e Discussão

Após mensurar todos os veículos até se alcançar uma quantidade para se obter confiabilidade nos resultados estatísticos, a amostra contou com 30 veículos de quatro modelos com diferentes versões, totalizando cinco medições de cada tipo de veículo. As marcas e modelos foram ocultadas e substituídas por letras a fim de resguardar o autor e a empresa parceira quanto a possíveis divulgações de informações reais. Os valores de ruído característico, obtidos (dBA) e vibração (m/s²) também foram ocultados dos resultados gráficos afim de mostrar neste apenas o comportamento da amostra, e também evidenciar a importância de correlacionar os métodos e a vantagem de ter utilizado o método de Tukey para tal parâmetro. Este limite tem como intuito servir de base para a correlação subjetiva.

Os padrões analisados para este estudo estatístico se baseiam na análise de desvio padrão e escala três sigma, comparada com o método de Tukey. Trazendo para os

dados acústicos as métricas por meio do software Sisvar.

A necessidade de adotar um método estatístico auxiliar se deu devido à variação de amplitude da amostra ao considerar dados de vibração no assoalho e no volante, uma vez que há uma considerável diferença entre ambos. Este comportamento de vibração em assoalho (Dfost) é bem característico e como esperado maior se comparado a vibração em mãos e braços – Volante (SW12H), uma vez que adotada a amplitude estudentizada baseada na variação do desvio padrão amostral.

Já para os dados de ruído interno, os dois métodos tiveram resultados positivos, uma vez que a análise sigma apenas consideraria a diferença amostral e traria bons resultados para este parâmetro logaritmo. Entretanto, os valores foram parametrizados através da adoção da melhor amplitude estudentizada pelo método de Tukey. Para ambos os valores característicos o método considerou o descarte de corridas que estivessem fora do percentual, fazendo com que os veículos além de serem da mesma classe só seriam válidos para o projeto caso nenhuma intempérie interferisse nas corridas, como ressonância, deterioração e velocidade do vento alta.

O teste de Tukey pôde ser apresentado nas linhas gráficas abaixo, remetendo a diferença do limite definido utilizando uma amostra apenas pelo método três sigma, e pela análise sigma combinada com a comparação de médias de Tukey.

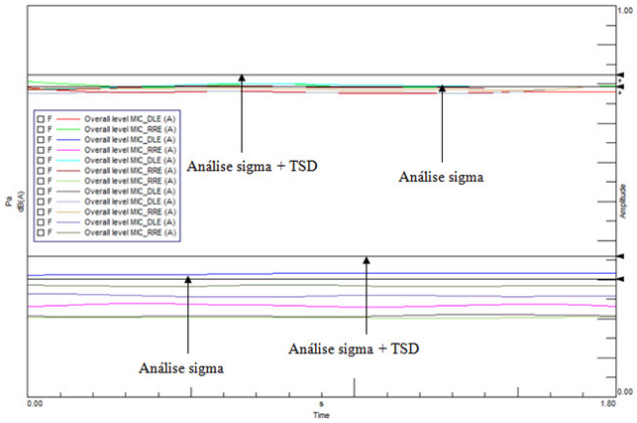



**Gráfico 1:** Resultados obtidos em dispersão para pressão sonora. **Fonte:** Autor

No Gráfico 1 nota-se que o comportamento inferior (ruído mais baixo) se refere aos testes de idle, enquanto que as linhas na parte superior do gráfico se referem ao teste de Cruise. Partindo da dispersão apresentada pelas medições, infere-se que ao utilizar apenas a análise sigma para este parâmetro os resultados seriam satisfatórios, porém próximos aos valores mensurados. A linha superior em ambos os casos se trata do resultado utilizando o método de Tukey, como observado não detendo grande variação e atendendo aos parâmetros dos quatro modelos mensurados.

No Gráfico 2 tem-se uma amostra da diferença em se tratar dados utilizando apenas o método três sigma, e ao correlacionar tais parâmetros com o método de John Tukey. Ao utilizar apenas a análise sigma em alguns pontos o LMS (Limite máximo superior) tange a linha mensurada, remetendo a um limite dentro da amostra. Seguindo esta ideologia a abrangência da utilização de métodos combinados foi proporcional tanto em ensaios de ruído quanto e dados de vibração (Gráfico 3).

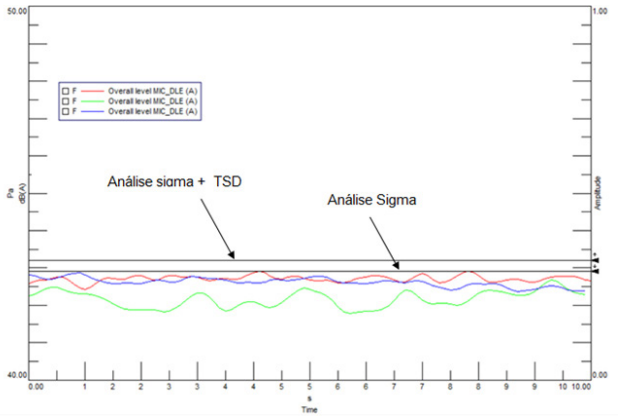



**Gráfico 2:** Correlação para ruído de teste em modo estacionário dos dados estatísticos. **Fonte:** Autor

Os parâmetros demonstrados representativamente a seguir trazem à tona a principal contribuição da análise realizada, uma vez que permeou a representação e o cálculo

independente do modelo, ano ou mesmo nota acústica, pois tal correlação depende somente da amplitude estudentizada e análise de desvio padrão para classificação amostral.

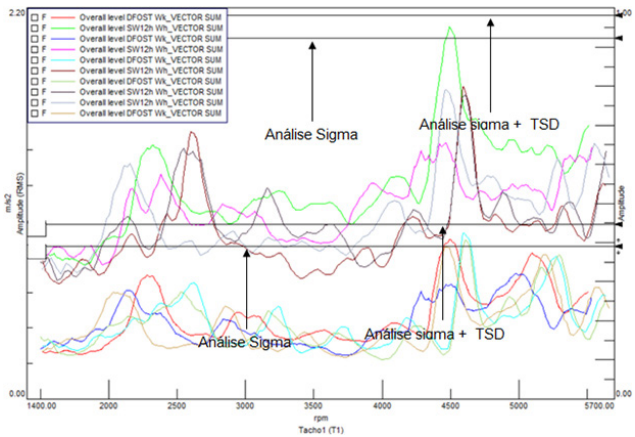



**Gráfico 3:** Correlação para vibração em corpo inteiro e mãos e braços.
**Fonte:** Autor

# Conclusões

O método de Tukey é constantemente utilizado no meio acadêmico, entretanto para o ambiente industrial a análise de limites por meio do cálculo sigma é mais modesto seu emprego. Com a padronizaçãoda análise de ruído interno, além de sanar reclamações de campo, contribuiu-se com ocontrole de qualidade, uma vez que ao se obter um estudo de NVH, frequentemente a qualidade acústica do veículo estará sendo aprimorada. Portanto, para o nosso teste, com variáveis balanceadas (em mesma quantidade), o método de Tukey foi adequado para realizar estas comparações entre médias, levando em consideração que temos dados em vários parâmetros, o que acarretaria testes percentuais diferentes.

O método é utilizado para testar toda e qualquer diferença entre duas médias de tratamento, comumente aplicado em tratamento de ANOVA (Análise de variância) por ter como base a DMS (diferença mínima significativa), além de poder ser utilizado aliado a outros métodos como no referido experimento.

Ações de benchmarking tem levado em consideração tais estudos, visando aumentar a confiabilidade e a qualidade do produto final. Partindo desta premissa o controle acústico e a análise estatística confrontando dados é uma prática imprescindível de NVH.

Deste modo conclui-se que para os dados de vibração, a padronização da amplitude estudentizada utilizada no método de Tukey gerou uma unificação nos limites, fazendo com que as variações de modelo e versões de veículos, dentro de cada categoria avaliada fossem atendidas. A aplicação da dispersão amostral foi satisfatória para avaliação do ruído interno, fazendo com que os limites (embora não demonstrados numericamente neste) possibilitassem utilizar apenas o método três sigma ou a combinação de ambos.

# Referências


1. PEREIRA.Rayann .Importância da probabilidade e estatística para os profissionais de engenharia civil. Disponívelem:<http://anais.unievangelica.edu.br/index.php/cifaeg/article/view/572>. Acesso em: 15 Nov.**2019**
2. TOLEDO, Geraldo Luciano. OVALLE, Ivo Izidoro. Estatística Básica. 2 ed. São Paulo: Atlas, **1995**.
3. WERKEMA, M.C.C. Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, **2006**.
4. CAMPOS, Vicente F. TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo Japonês). Rio de Janeiro: Bloch Ed, **2004**.
5. CORDEIRO,GaussM.Históriadaestatística.Disponívelem:<file:///C:/Users/User/Downloads/hist%C3%B3ria%20da%20estat%C3%ADstica.pdf>.Acesso em: 11 Nov. **2019**
6. SURIANO, Márcia Thais. Ferramenta de apoio à decisão para o controle da poluição sonora urbana Disponível em:< http://www.scielo.br/pdf/csc/v20n7/1413-8123-csc-20-07-2201.pdf>.Acesso em:15 Nov. **2019**.
7. MCDERMOTT, J. Sound and the Ear, MIT OCW, **2004**
8. ABDEL-RAHMAN, E.M.; NAYFEH, A.H.; ZIYAD N.M. Dynamics and Control of Cranes: A Review, A Review Journal of Vibration and Control; 9: 863 - 908, **2003**.
9. MAFFRA, Sérgio Alvares Rodrigues de Souza. Propagação de som em ambientes acústicos virtuais bidimensionais. Disponível em:<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3723/3723_1.PDF>. Acesso em: 25 Ago. **2019**.

10. PERCON. Teste NVH. Disponível em: < www.acessopercon.com>. Acesso em: 08 de Abr. de **2019**.

11. FAU. Db, Pressão, Potência e intensidade. Disponível em: < http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0278/Aulas/AUT0278%20Aula%2004%20-%20dB%20Press%C3%A3o%20Pot%C3%AAncia%20Intensidade.pdf>.Acesso em: 22 de Abr. de **2019**.

12. ZAVALA, Paulo. Treinamento em avaliação e controle de ruído e vibração veicular. Anápolis – GO. Agosto de **2018**.

13. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO2631: Guide for evaluation of human exposure to whole – body vibration. United States. **1978**

14. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO5349: Guide for evaluation of human exposure to hands vibration. United States. **1979**.

15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR15145: Acústica: Medição de ruído emitido por veículos rodoviários automotores em aceleração: Método de engenharia. Rio de Janeiro **2004**.

16. RES, D. E.; Perigosos, P. Resolução CONAMA no 001, de 11 de fevereiro de **1993** Publicada no DOU n. , p. 495–498, **1993**.

17. BRUEL&KJAER. Desenvolvimento de ruído, vibração e aspereza(NVH) em veículos. Disponível em: <https://www.bksv.com/ptBR/Applications/vehicle-noise-vibration-and-harshness-development>.Acesso em: 09 de Abr. de **2019**.

18. PCB. Acelerômetro triaxial. Disponível em:< https://i.ytimg.com/vi/2w3A9Az9u0k/maxresdefault.jpg>. Acesso em : 03 Nov. **2019**.

19. SIEMENS.Simcentertestlab.Disponívelem:<https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/products/simcenter/testlab.html >. Acesso em: 13 de Mai. de **2019**.

20. KMT.Speedsensor.Disponívelem:<https://www.kmttelemetry.com/fileadmin/media/Downloads/SpeedRPM/RPM-8000-OBD2-UM.pdf - manual>.Acesso em: 12 Nov. **2019**.

21. Ferreira, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. Ciência e Agrotecnologia, v. 38, n. 2, p. 109–112, **2014**. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542014000200001&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 22 Mai. **2019**.

22. Aguiar, S. Integração das ferramentas da qualidade ao PDCA e ao programa seis sigma. Editora de Desenvolvimento Gerencial Belo Horizonte, **2002**.

23. Fernandes, M. M. Análise doprocesso de seleção de projetos seis sigma em empresas de manufatura no Brasil. Universidade Federal de Itajubá, **2006**.

24. Nortegubisian.Controle estatístico do processo. Disponível em:<https://www.nortegubisian.com.br/blog/controle-estatistico-do-processo-cep>. Acesso em: 09 de Out. **2019**

25. Slack, Nigel. Administração de Produção. São Paulo: Atlas, **2002**

26. Martins, Petrônio G.; Laugeni. Fernando P. Administração da Produção. São Paulo : Saraiva, 5ª Ed., **2005**.

27. Blog da Qualidade. Controle estatístico de processo. Disponível em: < https://blogdaqualidade.com.br/controle-estatístico-de-processo-cep/>. Acesso em: 09 de out. **2019**

## Lays E. Cunha* & Fábio S. Gomes

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: lays1207@hotmail.com

# Determinação de Parâmetros Otimizados na Soldagem a Ponto por Resistência Utilizando Duas e Três Chapas em uma Indústria Automobilística

Kennedy R. Rosario, João C. R. Costa, Sérgio M. Brandão, Márcio J. Dias, Rosemberg F. N. Rodrigues & Wilson P. Silva

Os parâmetros utilizados no processo de soldagem são fatores determinantes para obtenção de soldas com qualidade, sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo a determinação de parâmetros otimizados para o processo de RSW (resistance spot welding) com duas e três chapas, utilizadas em uma indústria automobilística. Baseando-se nos três principais parâmetros da soldagem a ponto, corrente, força e tempo, o estudo foi dividido em 3 etapas, para cada mix de chapas, realizando a análise individual da influência de cada um dos parâmetros. Através de ensaios de tração foram obtidos valores de força máxima e diâmetro médio das lentilhas, sendo determinados parâmetros otimizados para o processo de soldagem, tendo os valores para a soldagem de duas chapas corrente de 8,0kA, pressão de 2,5kN e tempo de 250ms, e para três chapas corrente de 8,5kA, pressão de 3kN e tempo de 250ms.

**Palavras-chave:** *soldagem a ponto; parâmetros; resistência a tração.*

The parameters used in the welding process are determining factors for obtaining quality welds, so this study aimed to determine parameters optimized for the RSW process (resistance welding point) with two and three sheets, used in an auto industry. Based on the three parameters of spot welding, current, force and time, the study is divided into 3 stages, for each mix of sheets, performing an individual analysis of the influence of each of the parameters. Through tensile tests the values of maximum force and average diameter of the lentils were obtained, being determined parameters optimized for the welding process, having the values for the welding of two sheets current of 8.0kA, pressure of 2.5kN and time 250ms, and for three plates current of 8.5kA, pressure of 3kN and time of 250ms.

**Keywords:** *spot welding; parameters; tensile strength.*

# Introdução

Este estudo surge da necessidade de capabilidade do processo de soldagem por resistência em indústrias automotivas, onde grandes volumes de pontos de solda são realizados em um curto período de tempo, o que limita a checagem dos pontos realizados com inspeções visuais e esporadicamente testes de destacamento, fazendo com que a parametrização correta das máquinas de solda seja um item de extrema importância para garantia da qualidade do processo. Na confecção da carroceria de um automóvel são dados cerca de 4500 mil pontos de solda, sendo o processo de soldagem por resistência o mais utilizado por apresentar qualidade e resistência satisfatórias, feitos por sistemas robóticos ou manuais. A RSW (Resistance spot welding) trata-se da união de chapas metálicas sobrepostas ou em contato topo a topo através de uma solda formando um ponto de fusão (lentilha de solda), devido ao calor gerado pela resistência do material à passagem de corrente elétrica (efeito joule) com a devida pressão dos eletrodos[1,2].

Segundo Emílio Wainer a energia térmica total gerada durante o processo de soldagem depende das resistências do conjunto, passagem e duração da corrente, podendo ser calculada pela lei de Joule, conforme a Equação 1.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot T \qquad \text{(Eq. 01)}$$

Em que: $Q$ = Calor gerado (joules); $I$ = Intensidade da corrente (amperes); $R$ = Resistência elétrica (Ohms); $T$ = Tempo de passagem da corrente (segundos).

Os valores da Intensidade da corrente ($I$), assim como do tempo de passagem dessa ($T$) podem ser alterados pelos ajustes dos controles de solda, enquanto a resistência das peças que estão sendo soldadas é mantida fixa. Todas as resistências elétricas do circuito secundário são relevantes ao processo, devido aos elevados valores de correntes de soldagem, sendo a resistência total ($RT$) obtida pela soma das parciais, conforme a Equação 2[3]:

$$RT = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 \qquad \text{(Eq.02)}$$

Em que: $R1$ = Resistência de contato entre eletrodo superior e peça superior; $R2$ = Resistência da peça superior; $R3$ = Resistência de contato entre peça superior e peça inferior; $R4$ = Resistência da peça inferior; $R5$ = Resistência de contato entre eletrodo superior e peça inferior.

Como mostrado na Figura 1 o ponto R3 representa a região na qual se tem a maior resistência do circuito entre peça superior e peça inferior é também onde se tem o maior aquecimento, realizando a fundição de maneira contínua até formar a lentilha de solda. Sendo o ponto de resistência mais significativo após o contato entre as peças, o contato entre eletrodo e peça sofre grande aquecimento, mas sem atingir seu ponto de fusão, pois durante o processo sofre rápida refrigeração devido ao resfriamento dos eletrodos que geralmente é feito com água[2].

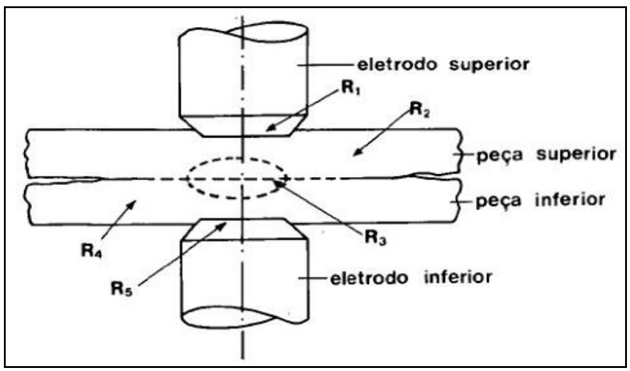



**Figura 1**. Resistencia elétrica de contato. **Fonte:** referência [3].

Conforme se observa na Figura 2, as regiões de 2 a 6 são os locais que sofreram transformações metalúrgicas. E representada pela região 1, a área da peça que não foi termicamente afetada pelo calor gerado durante a soldagem[3]. Sendo os processos de soldagens sujeitos a variabilidades, suas variações podem ser provenientes da matéria-prima,

máquinas e equipamento, métodos de trabalho, condições ambientais e a mão de obra envolvida, mas ainda assim devem possuir rigorosos valores dimensionais para dar condição aos processos seguintes.

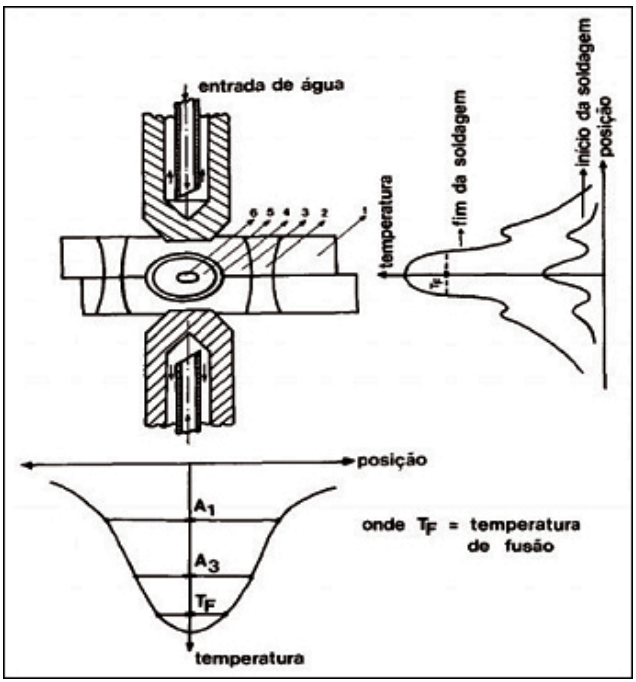



**Figura 2:** Distribuição da temperatura em uma soldagem por ponto. **Fonte:** referência [3].

## PARÂMETROS

A formação da lentilha de solda está diretamente ligada a parâmetros, como: corrente, pressão e tempo de soldagem, controlando a quantidade de calor gerada na transformação de energia elétrica em térmica. A correta combinação desses  define boa qualidade de solda obtendo uma resistência mecânica proporcional à seção de corte das peças fundidas, caso contrário apresentará baixa resistência e diversos defeitos[4,5].

## CORRENTE DE SOLDAGEM

A corrente é a variável que mais possui influência sobre a soldagem, em que possui um limite inferior e superior no qual, se seus valores aplicados não forem altos o suficiente para a fusão do material não ocorrerá a formação da lentilha, assim como se excedidos podem gerar a expulsão de material e uma excessiva penetração dos eletrodos nas chapas, reduzindo a vida útil do eletrodo e produzindo soldas com baixa qualidade. Seu valor deve ser ajustado para compensar as perdas por condução durante a soldagem, com valor de corrente utilizado logo abaixo do valor no qual ocorre a expulsão de material fundido[5,6].

A corrente de soldagem pode variar sua densidade na face da junta a ser soldada com relação ao diâmetro de face do eletrodo utilizado, podendo aumentar quando se tem um aumento do diâmetro do eletrodo reduzindo o calor gerado na junta da solda, assim como a redução do diâmetro do eletrodo gera um aumento da densidade da corrente podendo gerar expulsão de material ocasionando possíveis vazios internos rebarbas ou excessivas indentações[7].

## PRESSÃO DE SOLDAGEM

As superfícies dos materiais a serem soldados apresentam defeitos e impurezas que impedem o contato total entre o metal-metal, como: rugos idade; óxidos; umidade; gordura; poeira; etc., portanto diminuem a área de contato que consequentemente aumenta a densidade da corrente na região a ser soldada, assim para melhorar o assentamento dos materiais são aplicadas as forças dos eletrodos. As forças dos eletrodos estão relacionadas as etapas do ciclo da solda, sendo responsáveis por fixar e aproximar as peças reduzindo as possíveis folgas entre chapa-chapa e chapa-eletrodo, assim como forjar os metais quando eles se encontram no estado plástico. A pressão de soldagem tem como uma das funções refinar a estrutura dos grãos tornando as propriedades físicas do ponto de solda iguais ou até mesmo superiores às do metal deorigem.[5,6].

## TEMPO DE SOLDAGEM

É a duração do fornecimento da corrente de soldagem, que determina o calor total para realização do ponto de solda. Na grande maioria sendo tempos muito curtos para evitar a perda de calor por condução, uma vez que as perdas de calor aumentam conforme seja aumentado o tempo de soldagem,

tornando-se necessários elevados valores de correntes para atingir o calor para a fusão dos materiais[6-8].

## CICLO DE SOLDAGEM.

O ciclo de soldagem se inicia pelo tempo de compressão que é finalizado quando se incia a passagem da ocorre, sendo dividido em duas etapas: tempo de fechamento dos eletrodos (acostamento) e tempo de pré-pressão, indicados na Figura 3 por (a) e (b) respectivamente. O tempo de compressão deve ser longo o suficiente para a aproximação dos eletrodos sem que haja um impacto muito grande e para que a força dos eletrodos se estabilize nos valores determinados. Sendo imprescindível uma correta sincronização entre o início da soldagem e o tempo de compressão, pois se o tempo de pré-pressão for muito curto pode levar a grandes expulsões de materiais das regiões fundidas, assim como tempo longo pode aumentar significativamente o custo da produção devido ao tempo excessivo do ciclo de soldagem[6].

O tempo de soldagem é o tempo de aplicação da corrente de soldagem para gerar a fusão e deformação dos materiais, indicando na Figura 3 como ponto (c), seguido do tempo de resfriamento, também denominado de pós-pressão, em que as pinças mantem a pressão após a passagem da corrente elétrica para que a lentilha de solda possa se resfriar e solidificar até sua adequada resistência mecânica, evitando rompimento e deformações da região soldada, mostrado pelo ponto (d)[9].

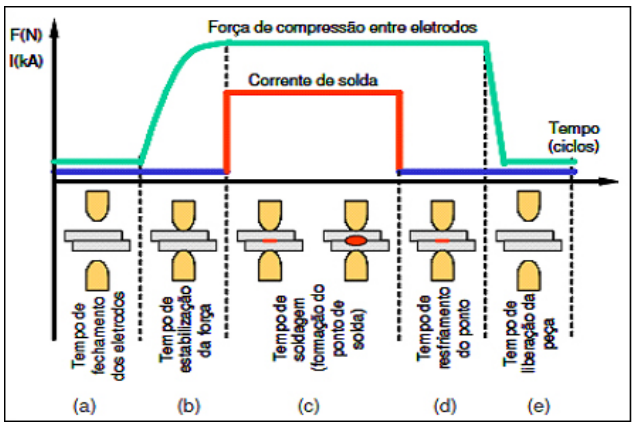



**Figura 3:** Ciclos da soldagem. **Fonte:** referência [7].

## DEFEITOS

Os defeitos de soldagem presentes em linhas de produção são considerados itens graves, em que muitas vezes são controlados diariamente a fim de garantir a qualidade final do produto. Entre os defeitos mais críticos estão: Corrente de desvio (efeito shunt), excessiva indentação, expulsão de material (salpico) que por muitas vezes acabam gerando rebarbas ou até mesmo furos nas chapas, ponto solto, lentilha pequena e descontinuidade interna (falha no ponto). Alguns exemplos destes defeitos são mostrados na Figura 4[4].

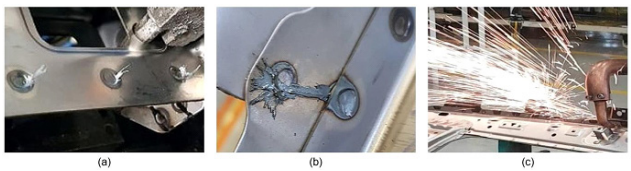



**Figura 4.** (a) Rebarba na superfície, (b) rebarba na interface e (c) salpico. **Fonte:** Dos autores

## DIÂMETROS DO ELETRODO

Segundo Emílio Wainer, para determinar o diâmetro dos eletrodos para soldagem de chapas com a mesma espessura, em que o calor gerado em ambas as peças deva ser igual, considera-se que as faces de contato dos eletrodos com a peça seja aproximadamente 1,6 mm maior que o diâmetro do ponto de solda, conforme a Equação 3:

$$D = 5 \cdot S1/2 \qquad \text{(Eq. 03)}$$

Em que: $D$ = Diâmetro do ponto (mm); $S$= Espessura da chapa (mm).

Já para soldagem de peças com espessuras diferentes ou materiais dissimilares são necessários diâmetros diferentes para adequar a geração de calor na região a ser soldada. No caso de espessuras diferentes, o eletrodo com menor diâmetro deve ser colocado em contato com a peça de menor espessura. Para peças dissimilares, apresentam condutibilidades diferentes, mas com mesma espessura o

eletrodo de menor diâmetro deverá ficar com a peça que apresentar maior condutibilidade, podendo ser calculada a área de contato, conforme a Equação 4[3]:

$$G1A1/e1 = G2A2/e2 = GnAn/en \quad \text{(Eq. 04)}$$

Em que: $G1, G2...$ = Condutibilidade elétrica das peças; $A1, A2...$ = Área de contato dos eletrodos; $e1, e2...$ = Espessura das peças.

A Figura 5 apresenta um comparativo de possíveis variações do diâmetro dos eletrodos em função da condutibilidade específica da peça que está sendo soldada.

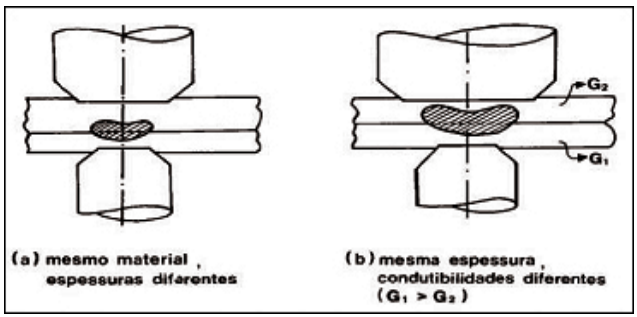



**Figura 5:** Diâmetro do eletrodo em função da soldagem de metais de espessura ou condutibilidade diferentes. **Fonte:** referência [7].

## INSPEÇÕES

Durante o processo de fabricação utilizando a soldagem a ponto por resistência, podem ser utilizados alguns métodos para validação da qualidade da lentilha da solda, sendo ensaios de natureza destrutiva e não destrutivas. Dentre os ensaios não destrutivos temos, as inspeções visuais e ultrassonografia que geralmente são realizadas na peça pronta validando a solda realizada. Já nos ensaios destrutivos, temos: teste de tração, arrancamento, destacamento, tensão cisalhante, torção e ensaios metalográficos (macrografia e micrografia).

# Metodologia

O presente trabalho foi dividido em duas partes, em ambas foram feitas as soldagens e análise de 80 corpos de prova de aço carbono, sendo que na primeira parte os corpos de prova eram compostos por duas chapas com espessura de 0,8 mm, na segunda parte eram formados por três chapas sendo duas de 0,8mm e uma de 0,6 mm.

As duas partes foram divididas em três etapas cada, ocorrendo a soldagem dos corpos de prova com variação dos parâmetros no qual a corrente, força ou tempo tiveram seus valores alterados, sendo que dois dos três foram mantidos constantes e um sofreu alterações. Deste modo os corpos foram submetidos a ensaios de tração, para que a força máxima suportada pelo ponto de solda e o diâmetro da lentilha após o arrancamento pudessem ser analisados e assim determinar o parâmetro ideal para dar sequência as próximas etapas como mostrado no fluxograma, apresentado na Figura 6:

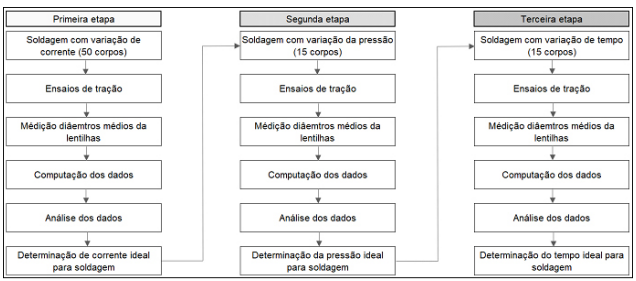



**Figura 6:** Fluxograma das etapas de soldagem. **Fonte:** Dos autores.

Pelo fato de a corrente ser o parâmetro mais influente na geração de calor na junta soldada, como mostrado pela Equação 1, foram utilizados um maior número de corpos de prova para a determinação de seu valor otimizado, possibilitando ensaios com um maior range de alteração, permitindo o melhor acompanhamento das suas influências na resistência mecânica da solda e na curva de soldabilidade. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de soldagem de ambas às partes.

**Tabela 1:** Parâmetros da soldagem. **Fonte:** Dos Autores

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Primeira parte | Corrente(kA) | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 10,0 | 10,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| | Tempo(ms) | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| | Força(kN) | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,2 | 2,6 | 3 | 3,4 | 3,8 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Segunda parte | Corrente(kA) | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 10,0 | 10,5 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| | Tempo(ms) | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| | Força(kN) | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 1,6 | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 2,8 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| | Nº Corpos de prova | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

Primeira etapa  Segunda etapa  Terceira etapa

## PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram feitos com peças de montagem das carrocerias, cortadas seguindo as dimensões impostas pela norma EN-ISO 14273. Finalizado os cortes dos corpos de prova, esses foram conformados e tiveram suas extremidades lixadas para garantir um bom assentamento das chapas quando sobrepostas, reduzindo o gap entre elas. Na Figura 7 é possível verificar as dimensões dos corpos de prova, em milímetros, impostas pela norma para o mix utilizados em ambas partes do projeto.

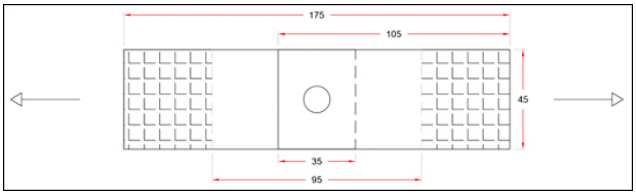



**Figura 7:** Dimensão dos corpos de prova. **Fonte:** Dos autores.

## SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Realizou-se o processo de soldagem nos corpos de prova, através da RSW (solda a ponto) com a utilização de uma máquina manual e pinça do tipo C, comando de solda com 1000hz (média frequência) sendo o controlador de solda da Bosch. No programa BOS6000 foi feita a parametrização e acompanhamento das curvas de soldagem durante o processo. Para assegurar a correta parametrização foi realizada a calibração da ponteadeira com o auxílio do Weld tester Myachi M380A, para que os valores solicitados pelo programa fossem os encontrados na saída do circuito secundário garantindo a soldagem. Outro equipamento utilizado como auxílio na soldagem foi uma morsa na qual os mix foram presos evitando a fuga de corrente, acidentes e mal sobreposição dos corpos de prova.

O eletrodo utilizado na soldagem possui liga de CuCrZr com condutibilidade de 77 e dureza de 80Hrb, foi condicionado no decorrer da soldagem dos corpos de prova com a ajuda de um dressador manual, garantindo seu dimensional durante todo o processo de soldagem, checado com um gabarito de 6mm de diâmetro efetuando essa usinagem a cada 10 pontos, conforme a Figura 8.

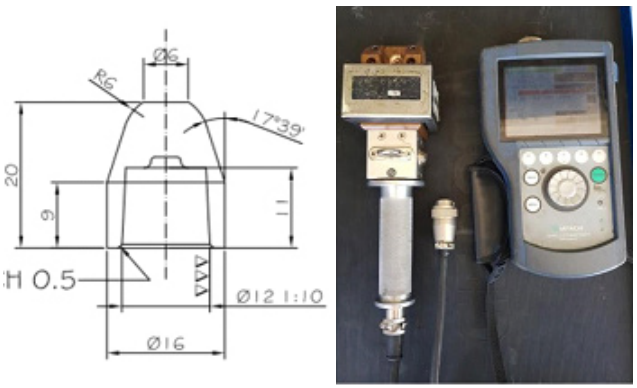



**Figura 8:** Dimensões do eletrodo e Weld Tester. **Fonte:** Dos autores.

## ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em uma máquina modelo Instron com célula de carga com capacidade de 30kN. Os ensaios foram utilizados para avaliar as propriedades mecânicas e resistência à tração dos corpos de prova soldados onde a velocidade de deslocamento do ensaio foi de 10mm/minuto para os dois mix. Na Figura 9, é mostrado a máquina de tração que foi utilizada neste trabalho.

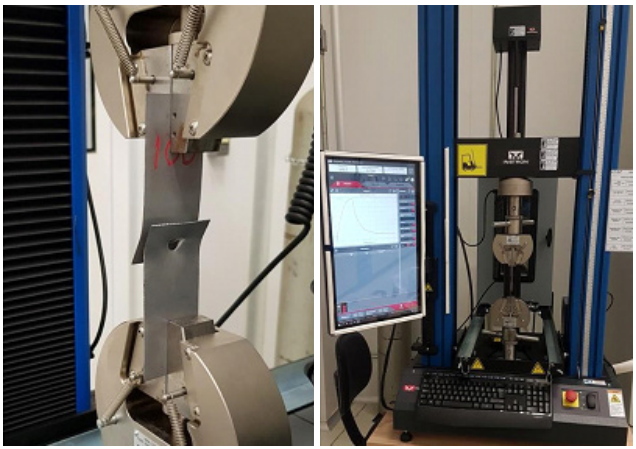


**Figura 9:** Tracionadora Instron. **Fonte:** Dos autores

# Resultados e Discussão

## SOLDAGEM DE 2 CHAPAS

Os resultados de força máxima e diâmetro das lentilhas obtido com ensaios de tração na primeira etapa estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Forças máximas e diâmetro médio dos pontos pela variação da corrente. **Fonte:** Dos Autores

| Corrente (kA) | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | F.Máx (N) | D.Médio (mm) | F.Máx (N) | D.Médio (mm) | F.Máx (N) | D.Médio (mm) | F.Máx (N) | D.Médio (mm) | F.Máx (N) | D.Médio (mm) |
| 6,0 | 2904 | 3,5 | 3305 | 3,5 | 3444 | 3,2 | 2904 | 3,7 | 3496 | 3,8 |
| 6,5 | 3181 | 4,0 | 3555 | 4,4 | 3257 | 4,4 | 3145 | 4,3 | 3542 | 4,3 |
| 7,0 | 3501 | 4,5 | 3995 | 4,5 | 3628 | 4,7 | 3989 | 5,0 | 3925 | 4,9 |
| 7,5 | 4183 | 5,2 | 3720 | 4,9 | 4114 | 5,1 | 4027 | 5,5 | 3904 | 5,2 |
| 8,0 | 4288 | 5,7 | 4055 | 5,4 | 4236 | 5,8 | 4139 | 5,4 | 4229 | 5,6 |
| 8,5 | 4315 | 6,0 | 4202 | 5,5 | 4111 | 5,3 | 4332 | 5,9 | 3994 | 5,7 |
| 9,0 | 3770 | 4,5 | 4716 | 5,3 | 3533 | 3,4 | 4499 | 5,9 | 4552 | 6,3 |
| 9,5 | 4611 | 6,0 | 4760 | 6,4 | 3580 | 3,7 | 4118 | 4,6 | 3907 | 5,3 |
| 10,0 | 4644 | 6,1 | 4509 | 6,7 | 4518 | 5,2 | 4276 | 4,4 | 4687 | 6,2 |
| 10,5 | 4863 | 6,8 | 4596 | 6,1 | 4842 | 6,7 | 4523 | 5,6 | 4614 | 5,7 |

Com as médias dos valores da Tabela 2, foi possível a elaboração de um gráfico de soldabilidade do mix proposto para melhor análise dos resultados com as correntes de soldagem, como mostrado no Gráfico 1.

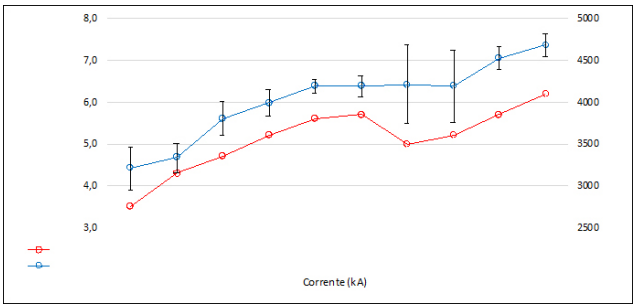



**Gráfico 1:** Relação de força máxima e diâmetro do ponto com variação de corrente. **Fonte:** Dos Autores

Analisando o Gráfico 1, observa-se uma tendência de aumento tanto da força máxima quanto no diâmetro do ponto de solda de acordo com o aumento da corrente. Segundo[10,11], o diâmetro da lentilha influência na resistência da junta soldada no ensaio de tração e cisalhamento, aumentado sua resistência mecânica com o aumento do diâmetro. Foi observada durante a soldagem com 8,5 kA a ocorrência de um salpico, enquanto que nas correntes subsequentes na grande maioria dos pontos, foi evidenciado a expulsão de material, gerando rebarbas intersticiais. Desta forma, a presença do salpico pode ter influenciado na redução do diâmetro médio e no aumento do desvio padrão das forças máximas resistidas.

De acordo com a norma EN-ISO 14273, o diâmetro mínimo para o mix soldado é de 4,48mm valor este que somente foi obtido nas soldagens com correntes acima de 7kA. Segundo[12] a máxima corrente corresponde ao início da expulsão de material na junta soldada e o mínimo se vê determinada ao diâmetro imposto pelas normas, sendo assim, a região de soldabilidade foi limitada para valores de corrente entre 7 a 8,0 kA. Levando-se em consideração também a alta resistência e diâmetro apresentado atrelado a um baixo desvio padrão, a partir da análise desses critérios a corrente de 8 kA foi a mais adequada para realização das etapas subsequentes.

Os resultados de força máxima e diâmetro das lentilhas obtidos através dos ensaios de tração da segunda etapa estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Forças máximas e Diâmetro médio dos pontos pela variação da força. **Fonte:** Dos Autores

| Força (kN) | 1 | | 2 | | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | F. Máx(N) | D. Médio(mm) | F. Máx(N) | D. Médio(mm) | F. Máx(N) | D. Médio(mm) |
| 1,6 | 3420 | 3,5 | 3737 | 4,4 | 3789 | 4,1 |
| 1,9 | 3736 | 4,0 | 4229 | 5,9 | 3825 | 4,2 |
| 2,2 | 4220 | 4,5 | 3549 | 5,4 | 4212 | 5,8 |
| 2,5 | 4283 | 6,1 | 4206 | 5,8 | 4257 | 5,7 |
| 2,8 | 3992 | 5,1 | 4046 | 4,9 | 4398 | 5,4 |

Com as médias dos valores da Tabela 3, foi possível a elaboração de um gráfico de curva da soldabilidade do mix proposto para melhor análise dos resultados das forças de soldagem, como mostrado no Gráfico 2.

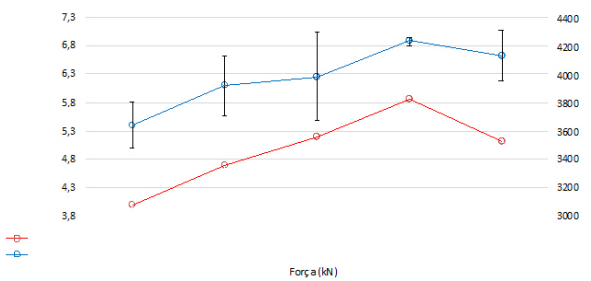



**Gráfico 2:** Relação de força máxima e diâmetro do ponto com variação de pressão. **Fonte:** Dos Autores

No Gráfico 2 também pode-se observar um aumento dos valores de força e diâmetro do ponto de solda de 1,6 a 2,5kN, comum a leve redução em 2,8kN, diferenciando-se da curva de corrente por apresentar as expulsões de material no início do diagrama de soldabilidade, comos valores de 1,6 e 1,9kN. Sendo assim, a curva de soldagem foi limitada entre 2,2kN a 2,8kN, que por sua vez foi selecionada a força de 2,5kN devido à maior resistência, diâmetro médios e menor desvio padrão dos demais valores ensaiados.

Os resultados de força máxima e diâmetro das lentilhas obtidos através dos ensaios de tração da terceira etapa estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4:** Forças máximas e Diâmetro médio dos pontos pela variação do tempo. **Fonte:** Dos Autores

| Tempo (ms) | 1 | | 2 | | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | F. Máx(N) | D. Médio(mm) | F. Máx(N) | D. Médio(mm) | F. Máx(N) | D. Médio(mm) |
| 150 | 4038 | 5,2 | 4052 | 5,2 | 4011 | 5,2 |
| 200 | 3554 | 4,5 | 3781 | 4,4 | 3752 | 4,5 |
| 250 | 4224 | 5,4 | 4236 | 5,7 | 4171 | 5,4 |
| 300 | 4293 | 5,5 | 4248 | 5,5 | 3906 | 4,7 |
| 350 | 4238 | 5,6 | 4252 | 5,2 | 4103 | 5,5 |

Com as médias dos valores da Tabela 4, foi possível a elaboração de um gráfico de curva da soldabilidade do mix proposto para melhor análise dos resultados dos ensaios, como mostrado no Gráfico 3.

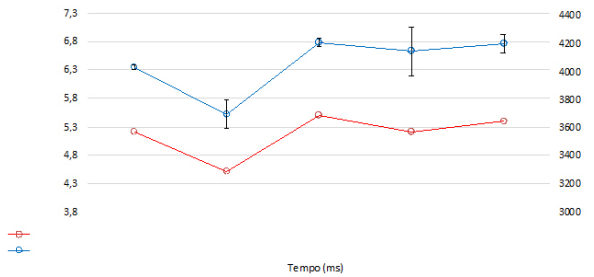



**Gráfico 3:** Relação de força máxima e diâmetro do ponto com variação de tempo. **Fonte:** Dos Autores

Por meio do Gráfico 3 pode-se observar que o tempo de soldagem, dentre os três parâmetros, apresentou menor influência nos valores obtidos nos ensaios de tração, apresentando nas 5 faixas de ensaios diâmetros satisfatórios. Fato que pode ter sido decorrente da correta parametrização da corrente e força de soldagem, tornando a soldagem mais estável. De acordo com[13], foi observado que a zona fundida aumenta com o aumento do tempo, chegando a um limite em que após isso, a zona fundida reduz de tamanho, devido à passagem de calor para as zonas vizinhas do ponto de solda fato que não se teve presente no trabalho pelos baixos valores de tempo ensaiados. Assim com força máxima e diâmetro da lentilha da solda superiores aos demais tempos de soldagem atrelado a uma constância dos dados obtidos foi atribuído o tempo de 250 ms para a execução do ponto otimizado.

Deste modo, os 3 parâmetros bases otimizados para a soldagem de duas chapas de 0,8mm ficam sendo: corrente de soldagem de 8kA, força dos eletrodos de 2,5 kN e tempo de soldagem de 250 ms. Tendo o ponto otimizado uma média de força máxima de 4211 N e um diâmetro de 5,5mm.

## SOLDAGEM 3 CHAPAS

Os resultados de força máxima e diâmetro das lentilhas obtidos através dos ensaios de tração da primeira etapa na soldagem com três chapas estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Forças máximas e diâmetro médio dos pontos pela variação da corrente. **Fonte:** Dos Autores

| Corrente (kA) | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio |
| 6,0 | 2830 | 3,8 | 680 | 0,0 | 2454 | 3,8 | 2778 | 4,1 | 2767 | 4,0 |
| 6,5 | 3157 | 4,8 | 3388 | 4,8 | 3233 | 5,3 | 3455 | 5,0 | 3343 | 5,0 |
| 7,0 | 3250 | 5,5 | 3216 | 5,0 | 2962 | 5,0 | 3405 | 5,4 | 2866 | 4,8 |
| 7,5 | 3078 | 5,5 | 2978 | 5,3 | 3336 | 6,1 | 3017 | 5,1 | 2953 | 4,9 |
| 8,0 | 3767 | 5,2 | 3264 | 5,3 | 3212 | 5,3 | 3193 | 5,0 | 3042 | 5,2 |
| 8,5 | 3273 | 5,6 | 3222 | 5,8 | 3085 | 5,6 | 3250 | 5,0 | 3292 | 5,7 |
| 9,0 | 3737 | 6,2 | 3254 | 5,9 | 3228 | 6,2 | 3133 | 5,7 | 3259 | 5,6 |
| 9,5 | 3225 | 5,8 | 3336 | 5,9 | 3254 | 5,5 | 3339 | 5,2 | 3313 | 6,0 |
| 10,0 | 3550 | 5,6 | 3213 | 5,9 | 3307 | 6,1 | 3395 | 6,4 | 3487 | 6,3 |
| 10,5 | 3703 | 7,1 | 3820 | 6,8 | 3623 | 6,6 | 3426 | 6,4 | 4411 | 6,6 |

A partir da média dos valores apresentados na Tabela 5 foi possível realizar um gráfico da curva de soldabilidade para uma melhor visualização da corrente a ser utilizada para o mix, conforme apresentado no Gráfico 4.

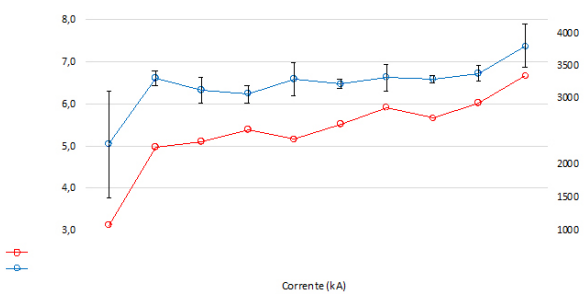



**Gráfico 4:** Relação de força máxima e diâmetro do ponto com variação de corrente. **Fonte:** Dos Autores

Durante a soldagem dos corpos de prova a presença de salpicos se deu em toda a faixa de corrente percorrida, criando certa instabilidade nos valores coletados de força máxima suportada e diâmetro da lentilha da solda, fato bastante perceptível através da análise do Gráfico 4. Levando-se em consideração que fora adotado um tempo de pré-pressão de 1000ms, que se mostrou suficiente, por meio da análise com o Weld tester, para a estabilização da pressão exercida pelas pinças, leva a crer que a expulsão de material foi provocada pela baixa força utilizada na soldagem, em que os 2,6 kN adotados não foram suficientes para um correto assentamento entre as 3 chapas.

Devido à instabilidade apresentada pelos resultados, foram feitos novos ensaio utilizando 3 correntes que se destacaram, sendo elas 8,5; 9,0 e 9,5kA, pelo baixo desvio padrão, força e diâmetro do ponto satisfatório nesta faixa. Portanto através de arrancamentos manuais e medição do diâmetro de soldagem foi determinado que a corrente de 8,5kA apresentava valores mais constantes de diâmetro.

Dando sequência aos ensaios com a corrente previamente determinada de 8,5kA foi realizada a segunda etapa para determinação da pressão de soldagem, os valores obtidos estão na Tabela 6.

**Tabela 6:** Forças máximas e Diâmetro médio dos pontos pela variação da força. **Fonte:** Dos Autores

| Pressão (kN) | 1 | | 2 | | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio |
| 1,6 | 3233,6 | 5,20 | 3357 | 5,35 | 3331 | 5,45 |
| 1,9 | 3178,8 | 5,40 | 3275 | 5,40 | 3749 | 5,60 |
| 2,2 | 3564,0 | 5,40 | 3704 | 5,75 | 3825 | 5,60 |
| 2,5 | 3470,6 | 5,70 | 3650 | 5,80 | 3495 | 5,60 |
| 2,8 | 3315,4 | 5,10 | 3720 | 5,70 | 3762 | 5,70 |

A partir da média dos valores apresentados na Tabela 6 foi possível realizar um gráfico da curva de soldabilidade do mix proposto para melhor análise dos resultados das forças de soldagem, como mostrado no Gráfico 5.

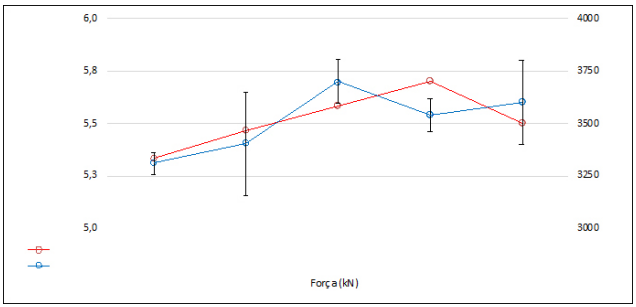



**Gráfico 5:** Relação de força máxima e diâmetro do ponto com variação de pressão. **Fonte:** Dos Autores

Como o esperado a soldagem com pressão de 2,2 e 2,6 kN apresentou expulsões de material, consequentemente diâmetros da lentilha e força máximas suportadas inferiores as demais forças ensaiadas, assim limitando a soldagem para valores de 3 a 3,8 kN[1]. Observou em seu estudo que os diâmetros das lentilhas de solda tendem a ser menores com a redução da pressão de soldagem.

Deste modo, considerando diferença de apenas em 0,1mm e 159N entre a pressão de 3,0 e 3,4kN, foi determinado que a etapa subsequente fosse realizada com 3kN buscando minimizar a indentação ocorrida no ponto de solda, alinhando aos interesses de indústrias automobilísticas, onde muito é presado pela qualidade superficial dos pontos de solda sem alteração significante na qualidade da soldagem.

Os dados de forças máximas e diâmetro médio dos pontos pela variação do tempo da terceira etapa estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Forças máximas e Diâmetro médio dos pontos pela variação do tempo. **Fonte:** Dos Autores

| | 1 | | 2 | | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tempo (ms) | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio | F. Máx | D. Médio |
| 150 | 3359,2 | 5,40 | 3432 | 5,75 | 3749 | 5,75 |
| 200 | 3924,1 | 6,05 | 3707 | 5,85 | 4074 | 5,90 |
| 250 | 3865,7 | 5,65 | 3842 | 5,90 | 3753 | 6,25 |
| 300 | 3841,7 | 6,10 | 4229 | 6,20 | 3904 | 6,10 |
| 350 | 3950,2 | 6,60 | 4097 | 6,25 | 4038 | 6,70 |

Com as médias dos valores da Tabela 7, foi possível a elaboração de um gráfico de curva da soldabilidade do mix proposto para melhor análise dos resultados dos ensaios, como mostrado no Gráfico 6.

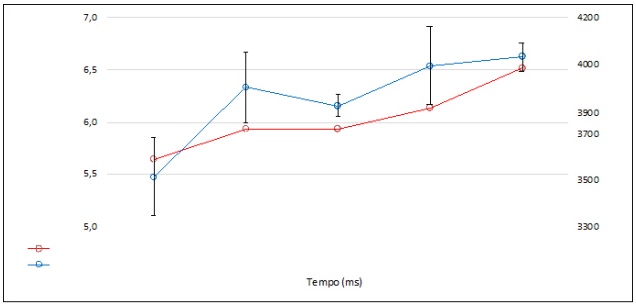



**Gráfico 6:** Relação de força máxima e diâmetro do ponto com variação de tempo. **Fonte:** Dos Autores

Na terceira etapa foi possível verificar que assim como na soldagem de 2 chapas, o tempo também foi o parâmetro que menos impactou na soldagem, apresentando poucas variações do diâmetro dos pontos e a forças máximas suportadas. Segundo[3,14] as soldas realizadas com um menor tempo apresentam melhores rendimentos térmicos sendo o valor total das perdas de calor proporcional a raiz quadrada do tempo de soldagem. Assim fazendo com que a determinação do parâmetro otimizado leve em consideração não somente suas propriedades mecânicas como também sua velocidade de produção e rendimento térmico, tendo em vista a alta demanda esperada.

Deste modo apresentando valores de força máxima e diâmetros satisfatórios o tempo de 250ms foi determinado como sendo o mais eficiente para a soldagem em questão. De modo que fiquem sendo os parâmetros otimizados para a soldagem do mix de 3 chapas, corrente de soldagem de 8,5kA; Força de 3,0kN e um tempo de 250ms.

# Conclusão

O presente estudo, que teve como objetivo a obtenção de parâmetros de soldagem otimizados para os 2 mix de chapas

propostos, com base nos resultados obtidos revelou-se que:

- Durante os ensaios foi observado que a força máxima suportada pela junta soldada e diâmetro médio das lentilhas apresentaram correlação em função da corrente e tempo de soldagem, com os maiores valores obtidos nos finais das faixas de soldabilidade.
- Dentro dos corpos de prova avaliados foi notada uma tendência de aumento dos desvios padrões quando evidenciada a expulsão de material durante o processo de soldagem, muitas vezes não significando redução do diâmetro da lentilha, mas com uma menor variação da força máxima suportada.
- Nota-se que a soldagem com valores adequados para corrente e pressão apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias e baixa variação dos diâmetros das lentilhas em toda a faixa de soldabilidade dos tempos ensaiados, tornando possível a determinação do seu valor de acordo com a necessidade do processo em questão.
- Os parâmetros otimizados para a soldagem de duas chapas são: corrente de soldagem 8,0kA; pressão de 2,5 kN e tempo de soldagem de 250ms.
- Para a soldagem do mix de três chapas os parâmetros encontrados foram: corrente de soldagem 8,5 kA; pressão de 3,0 kN e tempo de soldagem de 250ms.

# Referências


1. Ruiz, D. C.; Batalha, G. F. Estudo de um critério de modo de falha para solda a ponto por resistência. Escola Politécnica da USP, n. 2, **2005**.
2. Kavamura, H. A. Aplicação de Solda Laser em Carrocerias Automotivas: Estudo Comparativo entre a Solda Laser e a Solda Ponto por Resistência. p. 108, **2007**.
3. SOLDAGEM - PROCESSOS E METALURGIA (Emílio Wainer, Sérgio Brandi e Fábio Décourt Homem de Mello).pdf. [s.l: s.n.].
4. Paulo, S. Danilo Stocco caracterização de solda por resistência a ponto através deavaliações não destrutivas. **2010**.
5. WELINGTON APARECIDO DOS SANTOS Estudo da Influência dos Parâmetros de Regulagem na Soldagem por Resistência na Indústria Automobilística São Caetano do Sul **2013**.[s.d.].
6. Aures, J. E. V. ESTUDO DA FORMAÇÃO, GEOMETRIA E RESISTÊNCIA DO PONTO NA SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA: UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA. p. 164, **2006**.
7. Batista, M. Estudo comparativo da soldabilidade de chapas para indústria automotiva utilizando dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência. 17 Oct. 2011. Universidade de São Paulo. 17 Oct. **2011**.
8. Antônio, M.; Junior, P.; Ponto, S. Avaliação das Juntas Soldadas Utilizando o Processo. p. 1–15,[s.d.].
9. Jong, Y.-S. *et al*. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Ultra High Strength Steel Containing Boron. Materials Transactions, v. 52, n. 6, p. 1330–1333, **2011**.
10. Jong, Y. S. *et al*. Microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded ultra high strength steel containing boron. Materials Transactions.Anais... **2011**.
11. Pouranvari, M. Susceptibility to interfacial failure mode in similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 dual phase steel and low carbon steel during cross-tension and tensile-shear loading conditions. Materials Science and Engineering: A, v. 546, p. 129–138, Jun. **2012**.
12. Resistance Welding. [s.l.] CRC Press, **2005**.
13. Penteado, K. M. Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE). p. 93, **2011**.
14. Machado, I. G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. [s.l:s.n.].



**Kennedy R. Rosario*, João C. R. Costa, Sérgio M. Brandão, Márcio J. Dias, Rosemberg F. N. Rodrigues & Wilson P. Silva**

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: kennedyreis97@gmail.com

# Termografia para Determinação do Limite de Fadiga em Aço de Médio Carbono

João V. C. G. Alves, Felipe A. V. Araújo, Gabriel A. Honorato, Marcio José Dias, Rosemberg F. N. Rodrigues & Hélio S. Queiroz

A determinação do limite de fadiga é um grande desafio, métodos comuns demandam muito tempo e investimento. Um método foi desenvolvido por La Rosa e Risitano, conhecido como Método de Risitano. O objetivo do trabalho foi definir o limite de fadiga do aço SAE 1045 Normalizado pela análise termográfica em ensaios dinâmicos. Sua utilização foi devido à ampla necessidade industrial na fabricação de componentes que necessitam de alta resistência mecânica e sofrem ações de forças cíclicas. De forma geral, o limite de fadiga do aço definido possui em torno de 210 MPa. Para dar mais credibilidade ao novo método a obtenção dos valores demonstra uma clareza de resultados promissora de 208,85 MPa, utilizando-se uma menor quantidade de espécimes e obtendo menor desvio padrão. O método se mostrou rápido, objetivo e usual em ambientes reais.

**Palavras-chave:** *limite de fadiga; termografia; aço SAE 1045.*

The determination of fatigue limit is a big challenge, Common methods require a lot of time and investment. A method was developed by La Rosa and Risitano, known atRisitano Method. The objective of this work was to define the fatigue limit of SAE 1045 Steel Normalized by thermographic analysis in dynamic tests. Your utilization was due to the wide need of the industrial to manufacture components that require high mechanical resistance and suffer from cyclic forces. Generally, the steel fatigue limit is around 210 MPa. To give more credibility for this new method, obtaining the values demonstrates a promising clarity of results of 208.85 MPa, using fewer specimens and obtaining a lower standard deviation. The method proved to be fast, objective and usual in real environments.

**Keywords:** *fadigue limit; thermography; steel SAE 1045.*

# Introdução

O modo de falha por fadiga afeta muitas das estruturas e dos componentes mecânicos industriais, tanto para estruturas estáticas quanto para dinâmicas. Ao longo dos anos, vários métodos de determinação do Limite de Fadiga ($S_L$) foram desenvolvidos por diferentes pesquisadores. Tais métodos podem gerar grandes dispersões e possuir difícil aplicabilidade. O mais tradicional é o de Wohler, desenvolvido em 1858, que apresentou a curva S – N (amplitude de tensão – número de ciclos). A determinação e perfil da curva estão expressas na Figura 1. A partir daí outros métodos foram desenvolvidos, como o método de Prot na década de 40 e o método de Nixon, ou staircase, na década de 60 junto à análise estatística de Dixon e Mood[1].

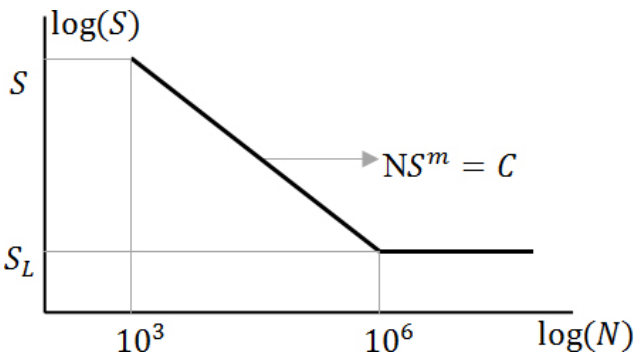



**Figura 1:** Curva SN de acordo com Método de Wholer. **Fonte:** Adaptado de 2Manhães PRB. Estudo da fadiga em Policarbonato com o uso da Termografia. 2016:1-49

Nota-se que, em determinado ponto da curva, ela se torna horizontal, não variando a amplitude de tensão ($S\ ou\ \sigma_a$) à medida que se aumenta a quantidade de ciclos , sendo assim, o ponto correspondente é definido como o limite de fadiga do material[2].

As curvas do método Wohler resultam em médias com alto desvio padrão, com grande erro de porcentagem. Os resultados exibidos por Prot, embora vantajoso comparado ao de Wohler, necessitam de muitos corpos de prova (CP) e de elevado tempo disponível pois são feitos a partir da variação da amplitude de carregamento até a falha do corpo. Por fim, o método de Nixon consiste em estimar um valor de limite de fadiga e carregar o CP, dependendo do resultado, o próximo corpo será carregado com um valor menor ou maior que o anterior, este método também é conhecido por up-and-down pois forma um gráfico com tais características. Em todos os métodos citados o longo tempo aplicado, além do grande número de espécimes a serem analisados, gerando um alto custo, são questões levadas em consideração antes de se iniciar uma pesquisa neste segmento[1-3].

No final da década de 90, Risitano e La Rosa propuseram um método para rápida determinação desse limite de fadiga, onde comprovam o uso da termografia para caracterizar propriedades dinâmicas de materiais. O método de Risitano utilizou a termografia para explorar o mapa térmico sobre a superfície de um espécime e com isso conseguiu determinar seu limite de fadiga, foi utilizado em 1986 e posteriormente melhorado e refinado para explorar seu grande potencial, o que gerou algumas patentes e, oficialmente, o Método de Risitano foi criado em 2000. Essa técnica é vantajosa em relação às três anteriores pois demanda poucos corpos de prova e não se utiliza de vasto tempo de aplicação. Sua definiçãoé feita através da termografia ativa e pode servir também para determinar a curva S – N[1,2,4].

# Referência Bibliográfica

Segundo La Rosa e Risitano[4], é possível determinar o limite de fadiga de um material seguindo a análise de temperatura de sua superfície[3], além de receber informações sobre a energia retida no corpo. Outras definições desenvolvidas por La Rosa e Risitano foram que a área na qual a temperatura aumentar desde o início dos esforços cíclicos, ocorrerá a subsequente falha, além disso, caso o estresse seja maior que o limite de fadiga do material, a temperatura será acrescida durante a primeira parte (fase I) do teste, permanecerá constante por um longo período de tempo (fase II) e então apresentará um repentino aumento de temperatura imediatamente antes da fratura (fase III)[5].

Para cargas acima do limite de fadiga, a taxa crescente de temperatura com o número de ciclos na fase I, tem relação

direta com o aumento de tensão em relação ao limite desse. A temperatura constante da fase II acresce de acordo com o aumento de tensão aplicada em relação ao limite de fadiga[5].

Risitano, *et. al*., propuseram uma metodologia para encontrar o limite de fadiga dos materiais por meio de uma análise térmica da superfície da amostra durante um teste de tração axial clássico. Sabendo que a fadiga ocorre para uma carga capaz de induzir a plastificação local na amostra ou componente, eles definiram como o limite de fadiga, o carregamento correspondente à mudança da inclinação da curva de temperatura em um teste uniaxial de tração estática e propuseram encontrá-lo por um simples teste clássico acompanhando a temperatura da superfície de análise[5,6].

A fase I foi limitada a um número muito baixo de ciclos em comparação com o número subsequentemente necessário para atingir a falha. Usando frequências de carregamento ou tensões de carregamento diferentes para os diferentes espécimes, o aumento na temperatura, naturalmente, aumenta com a frequência, mas a interseção da linha com o eixo de tensão não varia[5].

A pesquisa atual visa utilizar o método de Risitano e La Rosa para a determinação do limite de fadiga de um aço 1045 Normalizado por meio de ensaios axiais, verificando o desvio padrão dos resultados. Abrangendo a fadiga como um todo, pode-se dizer que há falhas em máquinas que estão relacionadas às cargas que variam no tempo, e não de esforços estáticos. Falhas essas, em níveis de tensão inferiores aos da resistência de escoamento do material. Assim, a utilização da teoria de falha considerando apenas esforços estáticos, pode levar a um projeto falho quanto à solicitação de esforços dinâmicos. A fadiga, então, é o fenômeno de ruptura progressiva a ciclos repetidos de tensão ou deformação,[3,7] ou ainda, uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes[8].

Porém as trincas se iniciam com a variação de tensões aplicadas ao corpo enquanto que, sua propagação são as variações das intensidades de tensões. Em falhas axiais, forças tensoras são aplicadas ortogonais à área da secção transversal do corpo. Logo, para se descobrir a resistência à propagação de trincas do material, mede-se a taxa de crescimento por ciclo de carga dependente do fator de intensidade de tensões [3].

De acordo com Shigley[3,9], a falha é representada em três estágios:

- O primeiro (nucleação) remete ao início das micro trincas (pequena duração), formadas devido deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica. Corresponde ao período gasto para a formação e o crescimento inicial das trincas até que seu comprimento seja considerado macroscópico. Essa formação se inicia mais facilmente em regiões que haja porosidade, descontinuidade, inclusões e outras microfissuras que podem ser geradas no processo de fabricação dos corpos. A plasticidade na ponta da trinca é influenciada pela característica do material[9,10].
- O segundo corresponde à propagação das trincas (maior tempo de vida da peça e maior parte da área superficial da fratura), acontece a progressão de micro a macro trincas, formando superfícies de fratura com platôs paralelos (na direção da máxima tensão de tração), separados por sulcos também paralelos (chamadas marcas de praia). Durante o carregamento cíclico, tais superfícies fissuradas abrem e fecham, em atrito entre si, e a aparência das marcas de praia dependem das mudanças no nível e na frequência do carregamento, bem como da natureza corrosiva do meio. Não há período definido entre a nucleação e a propagação, mas há uma ordem de tamanho da trinca para os grãos, variantes entre 0,1 e 1,0 $\mu m$ para aços[9,11].
- O terceiro corresponde à ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca (instantâneo, sem aviso prévio), que ocorre no ciclo de carga final (quando o material remanescente não pode suportar as cargas). Com a fratura as marcas de praia resultam em linhas de divisa que apontam para a origem das trincas iniciais[9,12].
- O aço 1045 normalizado, sobre processo de fabricação semelhante ao utilizado na pesquisa, possui suas características padronizadas conforme a Tabela 1, retirada do endereço eletrônico www.matweb.com/[13], o site, com finalidade acadêmica ou para de base de projetos, funciona como um banco de dados internacional que

coleta informações sobre as propriedades de polímeros, metais, cerâmicas, madeiras, fibras, lubrificantes e outros materiais diversos, definidas em pesquisas científicas ou informadas pelos próprios produtores.

**Tabela 1:** Características do aço 1045 Normalizado. **Fonte:** http://www.matweb.com/[13]

| Tipo do Aço | Teor de Carbono (%) | Limite de Elasticidade (GPa) | Limite de Escoamento (Mpa) | Limite de Resistencia à Tração (Mpa) | Alongamento (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| SAE 1045 | 0,460 – 0,500 | 210 | 280 – 320 | 600 - 660 | 16 |

A possibilidade da termografia estar relacionada com a fadiga vem da teoria em que a mesma utiliza-se da captação de uma radiação não ionizante, na fração invisível do espectro eletromagnético, que está contígua aos comprimentos de ondas longas (infravermelha) através de câmeras termográficas. A medição e controle da emissividade é de suma importância, uma vez que ela determina a capacidade que um corpo tem de emitir radiação eletromagnética. A emissividade depende do comprimento de onda ($\lambda$) e da temperatura ($T$). A emissividade de metais é alta, e aumenta conforme a elevação da temperatura[4].

O método de obtenção de dados é o Thermoelastic Stress Analysis (TSA), que se caracteriza pelo stress térmico ocasionado pela variação de cargas no material estudado. A termografia passiva independe de uma fonte de calor externo, já que a variação de calor $\Delta T$, é causada pelo deslocamento das redes cristalinas do material testado[6]. Permitindo a medição da temperatura do corpo medido, em contrapartida da termografia ativa, submete o corpo a estímulos de temperatura externos, sendo assim, a propagação de calor nestes corpos é dependente de suas propriedades térmicas.

A variação de temperatura, mesmo que seja mínima, depende das tensões aplicadas sobre o material e da troca de calor que ocorre no interior do mesmo. Logo[6],

$$\dot{\boldsymbol{T}} = \frac{\boldsymbol{T_0}}{\boldsymbol{\rho c_\epsilon}} \times \frac{\boldsymbol{\partial \sigma_{ij}}}{\boldsymbol{\partial T}} \times \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{\boldsymbol{ij}} + \frac{\dot{\boldsymbol{Q}}}{\boldsymbol{\rho c_\epsilon}}, \qquad \text{(Eq. 01)}$$

Anulando-se o segundo termo da Equação 1 utilizando uma frequência onde não ocorra condução de calor entre pontos do corpo, é obtido:[14]

$$\boldsymbol{\sigma_{ij}} = \boldsymbol{2 \times \mu \times \dot{\epsilon}_{ij} + (\lambda_{\epsilon_{kk}} - \beta \partial T) \partial_{ij}}, \qquad \text{(Eq. 02)}$$

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{2(1+v)}} \boldsymbol{\lambda} = \frac{\boldsymbol{vE}}{\boldsymbol{(1+v)(1-2v)}} = \boldsymbol{(3\lambda + 2\lambda)\alpha}. \qquad \text{(Eq. 03)}$$

Deriva-se a Equação 2 em função de $\boldsymbol{T}$, sem variação da constante linear em relação a temperatura, e logo após, utiliza-se substituições para posterior integração, deduzindo:

$$\Delta \boldsymbol{T} = \frac{\boldsymbol{a_l \times T_0}}{\boldsymbol{\rho \times c_p}} (\boldsymbol{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}). \qquad \text{(Eq. 04)}$$

Os fenômenos termodinâmicos envolvidos no processo são de suma importância para o entendimento da relação entre a variação da temperatura e a deformação do material. Para materiais que independem da direção cristalográfica, apresentam a mesma natureza e são isolados de qualquer troca de calor, essa variação de temperatura ($\Delta T$) pode ser definida pela somatória das principais tensões atuantes em relação ao limite de fadiga do material ($\sigma_1$,$\sigma_2 e \sigma_3$), representada pela Equação 4[15].

Em carregamentos cíclicos, parte da energia do processo produz micro deformações plásticas no material, gerando uma variação de energia interna por unidade de volume $\Delta E_i$. Outra parte da energia gerada é liberada em forma de calor. Sendo assim, a variação de energia interna é definida pelo produto da capacidade calorifica pela massa específica do material vezes a integral da temperatura variando nos ciclos:

$$\Delta E_i = c_v \times \rho \times \int_0^{N_f} T(N) \partial N. \qquad \text{(Eq. 05)}$$

Sendo $c_v$ e $\rho$ constantes, a variação de energia interna é considerada um parâmetro energético, definido por $\phi$, e tem valor igual ao último termo da Equação 5. O parâmetro $\varphi$ é definido por uma fração do parâmetro $\phi$,

e estará associado a um número de ciclos menor que $N_f$. A Figura 2 exibe uma melhor elucidação das relações termodinâmicas com as tensões[16].

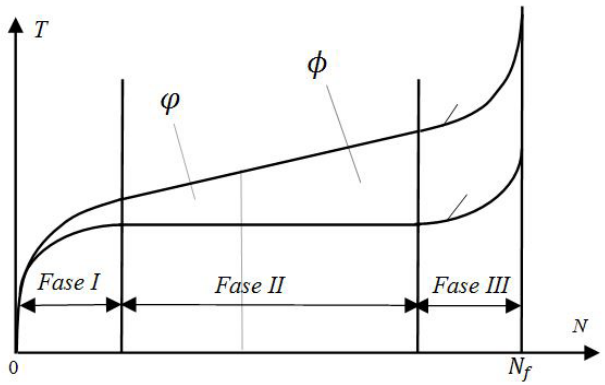



**Figura 2:** Determinação das 3 fases térmicas de um corpo. **Fonte:** Adaptado de 16 Thermographic Method Based Accelerated Fatigue Limit Calculation for Steel Subjected to Rotating Bending

Observando-se a Figura 2, para ambas as curvas, A e B, a única diferença além do valor nominal da temperatura ocorre durante a fase II, na qual também pode ser caracterizada pela constante taxa de aumento de temperatura ou pela não variação da temperatura[1]. Caso a amplitude de tensão ($\sigma_a$) seja menor que a fadiga ($S$) relacionada à tensão, a temperatura do corpo variará tão pouco que poderá ser aproximada à 0, o que representa a não geração de dano por fadiga[17]. Sendo assim, Risitano propõe avaliar somente a primeira fase da curva $TxN$ para diferentes amplitudes de tensão ($\sigma_a$) em um mesmo corpo, determinando assim, a região de transição sem danos até a que apresentar danos por fadiga ($\sigma_a < S_L$ até $\sigma_a \geq S_L$)[1].

De acordo com Risitano a falha por fadiga incide quando a energia dissipada atinge o valor limite $\Delta E_i = E_l$, que depende implicitamente do material utilizado. Dessa forma, pode se relacionar a geração de trincas internas no material com a variação da temperatura, que caracteriza a liberação de energia do processo[5].

A energia gerada no processo de tensão cíclica, em forma de calor, é emitida através da radiação, sendo assim, é uma função da temperatura do material. Quanto maior a temperatura, maior a intensidade da energia infravermelha emitida[18]. Levando-se em consideração a última observação e que a falha por fadiga se inicia quando a energia dissipada atinge o valor limite do material[5], a hipótese de que a temperatura do corpo está relacionada com seu limite de fadiga se torna plausível.

A energia de radiação pode ser dissipada de três maneiras: absorção, transmissão e reflexão[18,19]. Cada um destes fenômenos possui um parâmetro para defini-lo, sendo a somatória de todos os três iguais a 100% da energia dissipada. Um material opaco não dissipa energia por transmissão e um corpo negro, além da transmissão, também não dissipa por reflexão[18].A energia de absorção representa a energia interna radiada pelo corpo, sendo relacionada aos conceitos desenvolvidos por Risitano[5], supõe-se que a relação da radiação infravermelha com a energia interna do CP é diretamente proporcional à proximidade de características do corpo negro.

A câmera termográfica relaciona a energia infravermelha do corpo com sua temperatura superficial, sendo assim, para se obter a temperatura correta da superfície do material, é preciso reduzir ao máximo as emissões de energia refletidas e transmitidas, proporcionando então uma leitura apenas da absorção de energia do corpo. Para se reduzir a refletância do corpo, é preciso envolvê-lo com material que aumente sua emissividade para mais próximo de 1 sem que altere suas características mecânicas. Em contrapartida, a redução da transmitância é feita pela modificação do ambiente em que o corpo se encontra, reduzindo as gerações de calor externa e aproximando-se a câmera do objeto[18].

A termografia é baseada somente da transferência de calor por radiação, contudo, é claro que existem outras formas de transferência de calor, como a condução e a convecção. Tais meios de transferência de calor são irrelevantes para a análise da termografia dos aços e para a relação de energia emitida com fadiga do material, isso se deve devido às taxas de transferência de calor para cada meio. De acordo com a Equação 6 de Stefan-Boltzmann, exibida em termos de comprimento de ondas de luz, por Usamentiaga[18], é mostrada que a energia emitida de calor por radiação de um corpo cinza depende de duas variáveis: a emissividade do corpo e a temperatura ao qual se encontra.

$$W = \varepsilon \times \sigma \times \Delta T^4, \qquad \text{(Eq. 06)}$$

Tal equação apresenta a energia emitida de forma pontual em determinador corpo, sendo assim, para se determinar a quantidade de energia emitida pela superfície de um corpo através do calor, basta multiplicar-se pela área do objeto[18,20].

Sendo assim, a taxa de fluxo de calor de radiação, expressa em Watts, é definida pela Equação 7 [20]:

$$q = \varepsilon \times \sigma \times A \times \Delta T^4, \qquad \text{(Eq. 07)}$$

Assim como há a taxa de fluxo de calor para radiação, também há a taxa de fluxo de calor para convecção e condução, estas estão descritas, resumidamente, na Equação 8 e 9 [20]:

$$q = \varepsilon \times h \times A \times \Delta T, \qquad \text{(Eq. 08)}$$

$$q = \varepsilon \times k \times A \times \Delta T, \qquad \text{(Eq. 09)}$$

Sendo h e k, respectivamente, os coeficientes de transferência de calor por convecção e condução. Comparando-se as equações 7, 8 e 9, percebe-se uma semelhança em suas denominações, exceto pela constante de transferência térmica e pela taxa de fluxo de calor por radiação ser mais dependente da variação de temperatura do corpo do que as demais, devido à sua quarta potência.

Pode-se supor que, pela taxa de fluxo de calor por radiação ser cubicamente maior que a taxa de fluxo de calor por condução e convecção, não é necessário considerar a transferência de calor por demais meios durante a análise termográfica infravermelha de um corpo. Em contrapartida, para baixas temperaturas (temperatura ambiente ou menor), os efeitos de radiação são insignificantes devido ao pequeno valor expresso pela constante de Stefan – Boltzmann, em relação às outras duas constantes. Mas tal determinação não se torna plausível à medida que se eleva a temperatura do corpo[20].

# Materiais e Métodos

Quatro corpos de prova foram utilizados para todas as amplitudes de tensão definidas anteriormente, não sendo necessário o teste até seu rompimento e sim com o número de ciclos suficientes para se atingir a estabilização de temperatura na fase II, com a medida de estabilização da temperatura na superfície traçaram-se os pontos para reta ajustada de acordo com a tensão aplicada. BANDEIRAS (2017) utiliza, em sua metodologia para análise por método de Risitano, 4 espécimes, em aproximadamente 40 horas de experimento e obteve um desvio médio, em relação aos definidos em bibliografias, de 0,8. Seus corpos de prova possuem geometria semelhante aos utilizados nesta pesquisa.Ao se realizar o experimento por meio do método de Nixon, foram utilizados 25 espécimes submetidas a 140 Hz por 5.106 ciclos, totalizando aproximadamente 250 horas de experimento e obtendo resultados com desvio padrão de 1,1. RISITANO (2011) utiliza 4 espécimes, sendo a primeira para caracterização da fase estática, a segunda para caracterização da fase de fadiga e as outras duas para a análise termográfica de limite de fadiga. Entre os dois corpos, com geometria reta, foi obtido um erro de 10%.

A câmera térmica, calibrada pela equipe técnica da Fluke®, está dentro da data de validade de calibração, registrada até o final deste ano, com precisão garantida de 2%. Durante todo o ensaio de fadiga, foi feito o monitoramento e a gravação utilizando a câmera Fluke®, modelo VT04 A com resolução de 0,1 °C e intervalo de temperatura de -10 °C até 250 °C. Um diferencial importante deste equipamento de medição é a sua mesclagem de mapa infravermelho, o visor permite sobrepor imagens de forma 0%, 25%, 50%, 75% ou até totalmente infravermelho, permitindo visualização dupla do experimento. Outro diferencial é a configuração para que as fotos sejam tiradas com cronometragem automática em, no mínimo, 30 segundos. A desvantagem deste modelo se dá pela forma de informação, a câmera informa a temperatura no ponto focado do CP durante o

teste, sendo necessário o direcionamento manual no ponto de maior temperatura.

Sendo a relação entre energia infravermelha e temperatura superficial, para se aumentar a precisão do experimento e reduzir variações causadas por fontes de calor externas, coloca-se um manto escuro envolto a máquina axial e a câmera e também se aproxima o equipamento do espécime. Desligar o máximo de aparelhos que possam gerar ou retirar calor do meio durante o processo experimental auxiliou, juntamente com sua aproximação, na redução da transmitância de energia do corpo. Para se reduzir a refletância, é preciso tornar os corpos o mais próximo possível das características de um corpo negro, sendo assim, o CP foi pintado com tinta preta para aumentar sua emissividade. A câmera é regulada para emissividade igual a 0,95, logo a tinta fosca preta é ideal para o experimento pois possui uma emissividade entre 0,95 e 0,98, além de não alterar as características mecânicas do material.

A validação da máquina de teste de fadiga deve ser feita por meio da verificação de seu funcionamento, a máquina usada nesta experiencia exerce uma força axial vertical no corpo. Sua frequência de aplicação de carga é regulada através de controles automáticos de Servo motor que seguem os valores definidos pelo operador, sua estrutura é composta com uma garra superiora fixada em uma haste rígida e uma garra inferior fixada em uma haste hidráulica, responsável por realizar os movimentos cíclicos. Com o objetivo de se reduzir as variáveis do teste, a frequência de aplicação da carga foi mantida equalizada em 12 Hz durante todos os experimentos. A máquina, aplicará então a $\sigma_a$ definida de forma alternada, realizando o movimento cíclico desejado, com tensão definida pela relação da força axial pelo diâmetro do corpo.

O material para constituição dos corpos de prova passou pelo tratamento térmico de normalização com objetivo de se obter as propriedades mecânicas naturais do aço SAE 1045, os corpos de prova já cortados em tamanhos adequados foram postos dentro do forno pré-aquecido à 850 °C por tempo suficiente paratemperatura do núcleo atinga o mesmo valor da superfície, em seguida foram retirados e resfriados à ar a temperatura ambiente.

A geometria do corpo de prova foi feita conforme norma ASTM E606-04, com comprimento total de 130 mm, cada cabeça possui um comprimento de 30 mm e diâmetro de 15 mm, o modelo em ampulheta garante que apenas um ponto da secção transversal possua diâmetro de 8 mm, facilitando a marcação do ponto na qual a câmera termográfica deve ser focada,exibidopela Figura 3, usinados em Torno CNC afim de se garantir um dimensionamento menos instável, com avanço lento, baixa profundidade de corte e baixa velocidade (no último passe). Apesar de ser feito em CNC, o torneamento ainda sim pode gerar rugosidade descontínua e propiciar rupturas mais facilmente, então após usinagem, para se evitar as microfissuras, um lixamento é realizado utilizando-se as lixas de número 240, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2500 respectivamente, obtendo rugosidade inferior à 0,2 micrômetros. O processo de lixamento pode gerar mudanças (mesmo que mínimas) na microestrutura do material e alterar sua dureza ou resistência, para se corrigir tais alterações, um novo processo de normalização deve ser feito, o eletro-polimento é um processo que proporciona uma normalização com mesmo aspecto além de reduzir a rugosidade do CP.

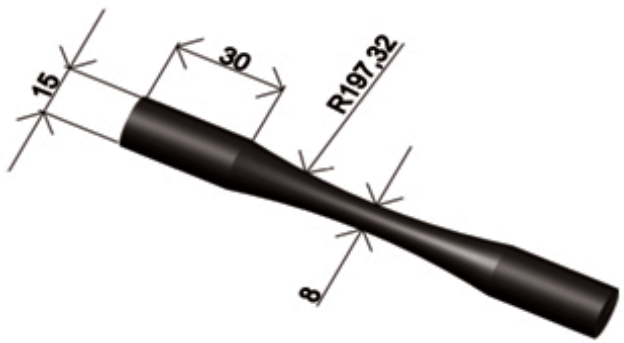



**Figura 3:** Projeto do Corpo de Prova. **Fonte:** Do autor

Com os CP finalizados, o teste de fadiga, através do método de Risitano, necessita de um primeiro carregamento empírico para determinação do ponto de partida da amplitude de tensão ($\sigma_a$). BANDEIRAS (2017) utilizou

como primeiro carregamento, a relação 30% entre $\sigma_a$ e limite de fadiga. Utilizando-se do limite de resistência a tração,considerado pela Tabela 1, o limite de fadiga pode ser definido, de acordo com a literatura básica de Norton e outros afins de Resistência dos Materiais, utilizando-se a relação de 50% para limites de fadiga fletores multiplicado pela correção de 70% para axiais. Isto significa que o limite de fadiga axial equivale à 35% do valor do limite de resistência a tração do mesmo aço, sendo assim para nosso caso, equivale a 210 MPa. Para se reduzir o desvio padrão o valor inicial do primeiro carregamento a ser usado nos testes foi estimado em 200 Mpa, com um incremento de aproximadamente 10% para cada número de ciclos até o seu rompimento.

BANDEIRAS (2017) sugere um teste com um número de 10000 ciclos. Com a obtenção de valores de gradiente de temperatura ($\Delta T$) é calculada a variação de temperatura entre o ponto central e as extremidades dos corpos. Devido à questão da garra inferior da máquina de fadiga ser hidráulica, uma quantidade constante de calor é dissipada no corpo de prova, para se evitar impactos nos resultados e, ainda assim, levar em consideração a temperatura da garra, antes de se calcular a variação de temperatura do corpo, é preciso definir um valor médio para a temperatura das extremidades (garras) que é dissipada no CP.

Após a definição da temperatura média nas extremidades do corpo, juntamente às temperaturas centrais obtidas por meio da câmera termográfica, é calculado $\Delta T$ que o corpo de prova sofreu durante todo o ensaio em relação ao ciclo de trabalho da máquina de tração. Esta diferença de temperatura pode ser chamada de gradiente pois define um grau de variação da temperatura do corpo.

O primeiro corpo de prova, foi aplicado um aumento de amplitude de tensão na casa dos 10 MPa, enquanto que os demais CP's a aplicação é entre 10 e 20 Mpa até o rompimento. A aplicação de tal metodologia tem por objetivo uma maior clareza da linha de limite de fadiga, com um número maior de pontos disponíveis, a dispersão da reta se reduz e sua precisão aumenta. O aumento das quantidades de $\sigma_a$ aplicadas ao corpo significa também um aumento no tempo de experimento e no custo de hora máquina, a hipótese do método de Risitano define uma redução em ambas as características, dessa forma, vale-se avaliar se os demais CPs, que possuem menor quantidade de pontos também tendem ao mesmo valor de fadiga que seus anteriores.

O gráfico traçado por intermédio dos valores tabelados de $\Delta T$ X N é similar ao demonstrado na Figura 2, sendo que, propositalmente, o gráfico "finaliza" dentro da fase II, fase correspondente ao limite da zona elástica do material. A fase II é caracterizada pelo gradiente de temperatura ser nulo ou próximo de 0. Dessa forma, uma temperatura média aproximada, também chamada de temperatura de estabilização, é definida para cada amplitude de tensão aplicada ao mesmo corpo. Um segundo gráfico é feito a partir de ambas informações "amplitude de tensão ($\sigma_a$) x Variação da Temperatura de Estabilização da Fase II ($\Delta T_{est}$)". A quantidade de ciclos utilizados por BANDEIRAS (2017) foi suficiente para atingir a fase II, sendo assim, também é o valor estipulado para este trabalho.

Aumentando-se a $\sigma_a$ do corpo de prova até seu rompimento, é possível definir de 4 a 8 pontos da curva SN para limite de fadiga. O gráfico característico é formado por duas retas concorrentes, sendo a primeira com inclinação quase nula e a segunda com inclinação significativa. O ponto concorrente é determinante para a obtenção do limite de fadiga, podendo-se estender a linha inclinada até que a mesma atinja o eixo das abscissas e assim definir o limite de fadiga ou, para autores menos conservadores, refletir o valor do ponto concorrente no eixo das abscissas e definir um maior limite de fadiga do material.

# Resultado

Desenvolvendo a metodologia descrita, os valores encontrados para os quatro corpos de prova condizem com a literatura atual. As tabelas a seguir relaciona os valores da $\sigma_a$ aplicado com a variação da temperatura de estabilização da Fase II ($\Delta T_{est}$):

**Tabela 2:** Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 1. **Fonte:** Autor

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Corpo 1 | $\sigma_a$[MPa] | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 |
| | $\Delta T_{est}$ [°C] | 0,47 | 1,37 | 2,85 | 12,71 | 17,92 | 18,65 | 34,61 | 42,10 | 52,79 |

A Tabela 2 exibe os valores de temperatura de estabilização do primeiro corpo de prova, pode-se observar a obtenção de 8 amplitudes de tensão aplicadas, iniciando-se em 200 MPa e indo até sua ruptura em 280 MPa, além da temperatura de estabilização de 52,79 °C.

**Tabela 3:** Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 2. **Fonte:** Autor

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Corpo 2 | $\sigma_a$ [MPa] | 200 | 220 | 240 | 260 | 270 | 280 | 290 |
| | $\Delta T_{est}$[°C] | 0,14 | 3,66 | 7,18 | 15,35 | 19,17 | 23,84 | 32,37 |

Para o corpo 2, apresentado na Tabela 3, foram usadas 7 amplitudes de tensão. Para definir um padrão na coleta dos resultados, os primeiros valores seguiram acréscimo de 20 MPa, ao atingir 260 MPa os acréscimos passaram a ser de 10 MPa até seu rompimento. A $\sigma_a$ onde ocorreu o rompimento do corpo equivale à 290 MPa em temperatura de estabilização de 32,37 °C.

**Tabela 4:** Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 3. **Fonte:** Autor

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Corpo 3 | $\sigma_a$ [MPa] | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 | 300 |
| | $\Delta T_{est}$ [°C] | 0,23 | 0,18 | 3,31 | 19,16 | 18,91 | 45,30 |

O terceiro corpo de prova, apresentado na Tabela 4, foi configurado para o padrão de 10% de acréscimo, contudo não foi rompido ao atingir 280 MPa, sendo necessária a aplicação de uma amplitude de tensão superior. Para se manter o padrão estabelecido, a amplitude submetida foi de 300 MPa, embora a convergência das linhas de tendência do Gráfico 1 se aproxime de 210 MPa, é observado um aumento súbito de temperatura, equivalente à 45,30 °C, para a amplitude de 300 MPa que condiz com o comportamento da relação.

**Tabela 5:** Relação amplitude de tensão x Temperatura de estabilização do CP 4. **Fonte:** Autor

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Corpo 4 | $\sigma_a$ [MPa] | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 |
| | $\Delta T_{est}$ [°C] | 0,51 | 3,20 | 19,59 | 19,32 | 35,60 |

A Tabela 5 exibe os valores do quarto corpo de prova, seguindo o padrão definido no teste anterior, rompendo-se a 280 MPa e temperatura estabilizada de 35,60 °C. Pode-se notar que o corpo não atingiu uma variação da temperatura de estabilização excessiva em comparação à mesma amplitude de tensão do CP 1, contudo, o valor se aproximou do CP 2.

O Gráfico 1, feito em software específico, exibe a dispersão dos pontos para cada corpo de prova e calcula sua linha de tendência. A linha de tendência exibe o perfil de fadiga do corpo e através dela pode-se definir o limite de fadiga do material.

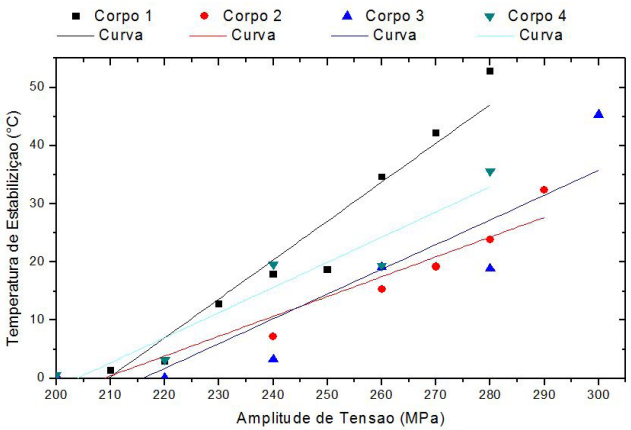



**Gráfico 1:** Tendência de Fadiga. **Fonte:** Autor

O Gráfico 1 gera, juntamente aos cálculos da linha de tendência, a equação que caracteriza a inclinação da reta. Os valores obtidos na Tabela 6 foram retirados conforme as mesmas equações e exibe as equações características de cada corpo, em termos de x e y, onde x representa a Amplitude de Tensão $\sigma_a$ aplicada ao corpo e y, a Variação da Temperatura de Estabilização $\Delta T_{est}$.

**Tabela 6:** Limite de Fadigaa. **Fonte:** Autor

| Espécimes | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 |
|---|---|---|---|---|
| $S_L$[MPa] | 209,47 | 208,61 | 215,82 | 203,74 |
| Inclinação | y = 0,6682x - 139,970 | y = 0,3402x - 70,970 | y = 0,4249x - 91,704 | y = 0,4315x - 87,914 |
| $R^2$ | 0,9376 | 0,9233 | 0,8292 | 0,9181 |

LA ROSA e RISITANO (2000) definem que o Limite de Fadiga do corpo é definido quando, não importando o número de ciclos realizados pelo carregamento da força, a variação da temperatura estabilizada se torna nula, ou seja, a temperatura do corpo não se variou desde o início do teste. Sendo assim, é válido considerar pela hipótese que, ao definir o valor de y igual a 0, os valores resultantes de x indicam a amplitude de tensão onde não se há variação da temperatura do corpo e, sendo assim, o limite de fadiga $S_L$ do material.

Pode-se observar, pelo Gráfico 1 e pela Tabela 6, que os CPs convergem para um valor de 210 MPa, embora aqueles que possuem menor quantidade de pontos tratados ($\sigma_a$ aplicada) estão mais dispersos que os demais. Ao se aplicar uma média dos valores de limite de fadiga, pode-se definir um valor de 208,85 MPa com um Desvio Padrão Amostral de 4,48. Em comparação à bibliografia básica, na qual os valores para o limite de fadiga flexional do Aço SAE 1045 Normalizado equivalem à 50% do limite de Resistência a Tração do próprio aço e que, para fadigas axiais é necessário aplicar uma correção de 0,7 na relação matemática, é obtido um desvio de 0,55%. É possível relacionar, então, que a precisão dos valores obtidos pelo Método de Risitano se torna maior à medida que são aplicados mais números de $\sigma_a$.

A problematização inicial encontrada, foi o impacto da temperatura da garra hidráulica em relação ao ponto central medido. A avaliação da temperatura do corpo durante os experimentos não pôde ser feita sem que se levasse em consideração o aquecimento gerado pela garra hidráulica. Contudo, conforme descrito pelas equações 7 a 9, a interferência da garra hidráulica só se torna válida durante o início dos testes, em que a temperatura do corpo ainda está relativamente baixa. Mesmo que em momentos definidos, ajustes nas tratativas dos dados foram feitos para se corrigir o erro da garra.

Antes de se regular a posição da câmera termográfica para captar o ponto central dos corpos de prova, essa foi posicionada para captar a temperatura da garra superior, em seguida, após a máquina axial ligada, a câmera foi posicionada para captar a temperatura da garra hidráulica inferior, após a obtenção de ambas as temperaturas que a câmera foi posicionada ao centro do corpo de prova. Obteve-se então, três valores de temperatura, a temperatura da garra superior, a temperatura da garra inferior e a temperatura do centro.

Observou-se que ambas as temperaturas das garras permanecem constantes durante a operação da máquina, sendo assim, é válido calcular um valor médio de temperatura de ambas as garras e realizar a diferença com a temperatura do centro do corpo. Este valor foi definido, anteriormente, como o gradiente de temperatura. No primeiro ciclo de cada carregamento de força é definido o gradiente de referência, ou gradiente zero, todos os demais ciclos tomam seu valor de temperatura conforme a variação gerada a partir da referência do gradiente zero. Dessa forma,

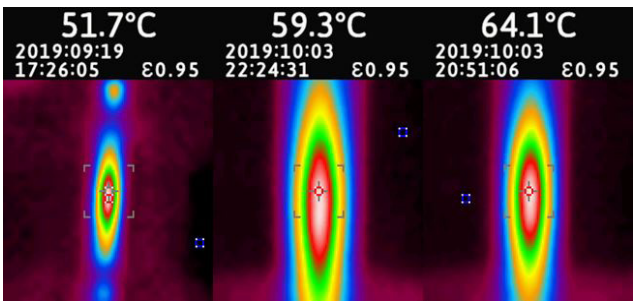



**Figura 4:** Perfil de temperatura do corpo de prova. **Fonte:** Autor

a diferença de temperatura das garras se torna insignificante para a tratativa dos dados obtidos no ponto central do corpo de prova, pois o valor constante é levado em consideração em todos os cálculos de cada ciclo.

Durante todo o processo de trabalho da máquina axial, a câmera termográfica captura a temperatura central do corpo, a Figura 4 mostra um exemplo de medição feita pela câmera termográfica.

Nela é possível ver que a hipótese de que, para temperatura elevadas, a transmissão de calor por condução e convecção se tornam insignificantes, é verdadeira. Pode-se notar também que o perfil de temperatura do corpo demonstra uma maior temperatura no centro, onde posteriormente ocorre a falha do material e, conforme se afasta em direção às extremidades, vai se reduzindo a temperatura. A câmera termográfica foi posicionada exatamente no centro do corpo de prova, porém o perfil oval de temperatura demonstra um leve deslocamento para a direção inferior, onde está localizada a garra hidráulica de maior temperatura, demonstrando a leve interferência que a temperatura das garras pode causar no Método de Risitano.

Porém, tal forma de se tratar os dados não exibe, na definição dos gráficos, a temperatura real do corpo de prova durante o teste, e sim a variação do gradiente de temperatura desde a temperatura ao qual o corpo possuía no início do mesmo. Pegando como exemplo a variação da temperatura de estabilização do corpo 1 sujeito à $\sigma_a$ de 280 MPa, conforme a Tabela 2, o valor descrito não indica a temperatura à qual o corpo de prova estava sujeito, mas sim que o corpo possui 52,79 °C a mais do que quando havia começado o ciclo de trabalho na mesma amplitude de 280 MPa.

Os valores obtidos do gradiente de temperatura foram utilizados para a criação dos Gráficos em que se é definido o perfil de fases para cada amplitude de tensão, por meio do perfil pode-se observar, empiricamente, qual o ponto onde se inicia a fase II (fase de estabilização de temperatura) e calculado a temperatura média de estabilização para obtenção das Tabelas 2 a 5. O Gráfico 2 mostra o perfil de fase para cada amplitude de tensão do CP 1:

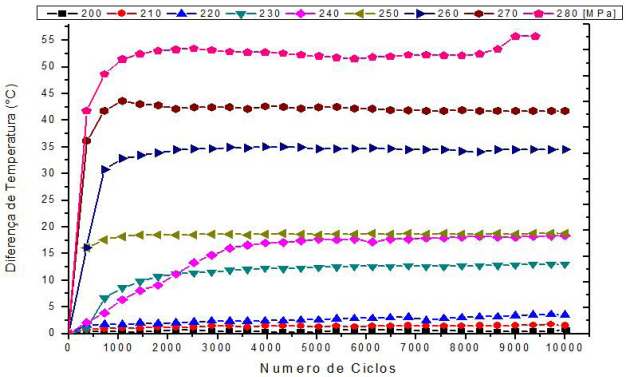



**Gráfico 2**: Perfil de Fase do CP 1. **Fonte:** Autor

A partir do gráfico, é possível verificar que a maioria dos carregamentos atingiram a fase II entre 1000 e 2000 ciclos de trabalho, com exceção das cargas de 200, 230 e 240 MPa. O primeiro carregamento, por estar próximos do limite de fadiga do material, apresentou pequena variação do gradiente de temperatura e atingiu a fase de estabilização térmica antes dos 1000 ciclos. O carregamento de 230 e 240 MPa atingiu a temperatura de estabilização apenas no ciclo 5040, embora o retardo ao atingir a temperatura de estabilização tenha sido grande, comparando-se com o Gráfico 1, a amplitude que não demonstrou um padrão nos resultados foi a amplitude de 250 MPa, isso por que a amplitude de tensão não obteve uma variação do gradiente de temperatura de estabilização tão elevada quanto as demais em relação à amplitude imediatamente anterior. A curva de 280 MPa, no ciclo 8640, pode-se observar um aumento súbito de gradiente de temperatura no perfil da curva, imediatamente antes da falha do corpo, caracterizando a fase III conforme a Figura 2. A Tabela a seguir mostra o ciclo onde foi atingida a temperatura de estabilizaçãoe o desvio padrão amostral que indica a precisão da temperatura:

**Tabela 7:** Ciclo de Estabilização e Desvio Padrão da Temperatura de Estabilização. **Fonte:** Autor

| Amplitude deTensão [MPa] | | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CP1 | N° Ciclo de Estabilização | 360 | 1080 | 2520 | 5040 | 5040 | 1440 | 2160 | 2160 | 1800 | * | * |
| | Desvio Padrão Amostral | 0,15 | 0,16 | 0,43 | 0,17 | 0,32 | 0,10 | 0,25 | 0,33 | 0,56 | * | * |
| CP2 | N° Ciclo de Estabilização | 360 | * | 1800 | * | 3240 | * | 1800 | 2520 | 2160 | 1080 | * |
| | Desvio Padrão Amostral | 0,14 | * | 0,22 | * | 0,45 | * | 0,24 | 0,20 | 0,61 | 0,55 | * |
| CP3 | N° Ciclo de Estabilização | 360 | * | 360 | * | 2880 | * | 3240 | * | 1800 | * | 1800 |
| | Desvio Padrão Amostral | 0,23 | * | 0,15 | * | 0,48 | * | 0,24 | * | 0,23 | * | 1,17 |
| CP4 | N° Ciclo de Estabilização | 360 | * | 3240 | * | 3240 | * | 1800 | * | 2880 | * | * |
| | Desvio Padrão Amostral | 0,41 | * | 0,57 | * | 0,21 | * | 0,74 | * | 1,24 | * | * |

Os valores marcados com "*", na Tabela 7, indicam que aquele corpo de prova não foi submetido à amplitude de tensão relacionada. Observa-se que somente em dois carregamentos a temperatura de estabilização foi atingida após os 5000 ciclos, representando que não é necessário um grande número de ciclos para a resolução dos testes de fadiga através do Método de Risitano. O desvio padrão amostral dos valores de gradiente de temperatura de estabilização indica a precisão das medições. Vale observar que apenas o CP 3, quando submetido a 300 MPa, e o CP 4, quando submetido a 280 MPa, apresentaram um desvio padrão elevado, ao relacioná-los com o Gráfico 1, é possível verificar que são os pontos que mais se dispersaram da linha de tendência de fadiga, embora ainda assim representem uma aproximação aceitável de acordo com a bibliografia básica dos testes de fadiga.

Apesar dos valores de número de ciclo na qual a estabilização do gradiente foi atingida possa parecer dispersa, representa pouca variação de acordo com as medições feitas pela câmera, isso se dá pela relação entre a frequência de aplicação de força da máquina e pelo time de captura da câmera, em que a primeira foi regulada à uma constante de 12 Hz e a câmera termográfica, regulada ao seu time mínimo de 30 segundos por captura de imagem. Portanto, para cada uma das amplitudes submetidas a cada um dos corpos, foi coletado um total de 28 temperaturas distintas.

De acordo com LA ROSA e RISITANO (2000), o corpo de prova rompe onde a temperatura aumentará desde o início do teste. Para que as temperaturas coletadas fossem mais precisas, os corpos de prova, além de lixados, polidos e pintados, também foram feitos em perfil diferente, conforme exibe a Figura 5.

**Figura 5:** Perfil do CP após rompimento. **Fonte:** Autor

O corpo de prova em formato ampulheta, para as análises termográficas, proporcionou maior precisão aos testes, a câmera termográfica possui a limitação da necessidade de direcioná-la ao ponto de maior temperatura (não há uma varredura térmica nas imagens), logo, com um corpo ampulheta, o ponto de menor secção teoricamente é o ponto de rompimento e também o ponto onde há a maior variação térmica. Os resultados das fotos termográficas, como a Figura 4, confirmam tal hipótese, exceto que os corpos não romperam no ponto de menor secção. Relacionando a Figura 5 com a Figura 4, é valido considerar que a garra hidráulica inferior influenciou no ponto de rompimento, mesmo que minimamente.

# Conclusão

Esta pesquisa relatou e realizou uma análise comprobatória da metodologia para rápida determinação do limite de fadiga do aço médio carbono SAE 1045, as bibliografias têm utilizado esse método a mais de 15 anos. Baseia-se basicamente no aumento da temperatura quando o stress atinge valores acima do limite de fadiga, devido à conversão de parte do calor do sistema em deformações das redes cristalinas do material. Os resultados obtidos pelo Método de Risitano, ao serem comparados com demais, se mostraram receptivos e coesos, quanto às bibliografias básicas e métodos mais antigos, pode-se determinar a utilização de menores quantidades de corpos de prova e tempo útil.

Em relação ao tempo de experimento e custos necessários, pode-se concluir que o método de Risitano se mostrou eficiente em relação ao subitamente anterior, Método de Nixon. BANDEIRAS (2017), ao realizar o experimento do Método de Nixon, utilizou-se de 25 espécimes e pouco mais de 250 horas de experimento enquanto que, no mesmo experimento, utilizou-se de 4 espécimes e 40 horas de experimento para o Método de Risitano, uma redução de 84% do tempo e custo. Neste experimento também foram ensaiados 4 CPs num tempo útil de máquina de aproximadamente 10 horas, uma redução de 84% no custo de matéria prima e 96% do custo de tempo útil da máquina em relação a um experimento padrão de Método de Nixon.

Em relação à confirmação dos resultados, os desvios obtidos por meio de Nixon e Risitano de BANDEIRAS (2017) são respectivamente 1,1 e 0,8 em relação aos teóricos definidos em bibliografias, enquanto que neste experimento foi encontrado um desvio de 0,55 da bibliografia básica teórica de 210 MPa. RISITANO (2011), apesar de ter usado somente 2 corpos para a real determinação do limite de fadiga, obteve um desvio padrão amostral de 10 % entre seus resultados. Os valores obtidos referentes ao experimento demonstraram um desvio padrão amostral entre os corpos de prova de 4,49%, contudo foram feitos 4 espécimes.

Devido às conclusões, é válido definir que o Método de Risitano se torna mais preciso a medida que se aumenta a quantidade de Corpos de Prova usados, contudo mesmo em quantidades baixas de corpos de prova, o método se mostrou mais eficiente que os métodos mais antigos, como o de Nixon (up-and-down).

O método de Risitano, em geral, mostrou-se coeso quanto às definições teóricas de fadiga. O Gráfico 2 demonstra claramente as fases 1, 2 e 3 onde são definidas as características da trinca durante um rompimento por fadiga. As Figuras 4 e 5 demonstram as relações das irradiações dos corpos durante os ensaios e seu ponto de ruptura. Por fim, a termografia se mostra um promissor ramo de análises para estruturas metálicas e não-metálicas, ao passo que as definições de energia interna e energia irradiada por corpos é mais explorada dentro da comunidade científica.

# Referências Bibliográficas


1. Bandeira CFC, Kenedi PP, Castro JTP de. Determinação do limite de fadiga de um aço carbono trefilado a frio utilizando o método termográfico. **2017**;
2. Manhães PRB. Estudo da fadiga em Policarbonato com o uso da Termografia. **2016**;1–49.
3. Castro JTP de, Meggiolaro MA. Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. **2009**.
4. Rosa G La, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. Int. J. Fatigue. **2000**;22(1):65–73.

5. Risitano G, Risitano A, Clienti C. Determination of the fatigue limit by semi static tests. Igf Xxi. **2011**;322–330.

6. Assis AAO de. Estudo da fadiga em Aço Carbono com o uso da Termografia Agradecimentos. PUC - RJ. **2017**;

7. Branco C, Fernandes A, Castro P. Fadiga de Estruturas Soldadas. 1st ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian; **1999**.

8. Callister WDJ, Rethwisch DG. Ciência e Engenharia do Materiais: Uma Introdução. 9th ed. Iwoa - Utha: **2018**.

9. Dudynas RG, Nisbett JK. Shigley´s Mechanical Engineering Design. 10th ed. New York: **2016**.

10. Schettini LCV, Ribeiro GDO. Análise Estrutural da Propagação Mecânica De Trincas Em Uma Viga da Estrutura do Forno de Reaquecimento. UFMG. **2016**;6:117.

11. Guimarães SR, Pertence AE de M. Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para previsão de vida de eixos de mandris de bobinadeiras de laminação a frio submetidos a danos acumulados por fadiga. UFMG. **2009**;(2).

12. Pêcego AL, Pereira MVS. Análise Fractográfica e Metalográfica de uma Região de Fratura. PUC - RJ. **2015**;13(3):1576–1580.

13. MatWeb: Online Materials Information Resource [Internet]. **2019**;Available from: http://www.matweb.com/

14. Barber JR. Elasticity (Solid Mechanics and Its Applications). Springer; **2010**. p. 219–225.

15. Corigliano P, Crupi V, Epasto G, Guglielmino E, Risitano G. Fadigue assessment by thermal analysis during tensile tests on steel. Procedia Eng. **2015**;109:210–218.

16. Lipski A. Thermographic Method Based Accelerated Fatigue Limit Calculation for Steel X5CrNi18-10 Subjected to Rotating Bending. Polish Marit. Res. **2015**;22(4):64–69.

17. Fargione G, Geraci A, Rosa G La, Risitano A. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. Int. J. Fatigue. **2002**;24(1):11–19.

18. Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, Molleda J, Bulnes FG. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. Sensors (Switzerland). **2014**;14(7):12305–12348.

19. Howell JR, Siegel R, Menguc MP. Thermal Radiation Heat Transfer. 5th ed. New York: CRC Press; **2010**.

20. Kreith F, Manglik R, Bohn M. Princípios de Transferência de Calor. 2nd ed. Rio de Janeiro - RJ: Cengage Learning; **2010**.

**João V. C. G. Alves*, Felipe A. V. Araújo, Gabriel A. Honorato, Rosemberg F. N. Rodrigues & Hélio S. Queiroz**

Departamento de Engenharias, Cursos de Engenharia Mecânica. Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: joaocarcute1@gmail.com

# Análise de Eficiência Solar em Painéis Fotovoltaicos

Gabriel V. Barbosa, Matheus F. S. Alcântara, Matheus R. G. Araújo, Tiago T. Fonseca, Rosemberg F. N. Rodrigues & Márcio J. Dias

A energia elétrica vem se tornando a cada dia mais indispensável para sobrevivência humana, pois vivemos uma sociedade dependente das tecnologias e que buscam melhorias constantes. Dessa forma, a busca por maior produção de energia limpa e sustentável ao meio ambiente cresce de uma maneira agressiva, partindo desse princípio a energia eólica (força do vento), energia solar (irradiação solar) apresenta uma proposta de energia alternativa, contribuindo assim para preservação do meio ambiente. Este trabalho teve como objetivos encontrar as condições ideias, por meio de estudos da melhor posição dos módulos de produção em uma residência familiar do município de Vianópolis-Goiás. A metodologia utilizada foi realizar medições das produções em intervalos de uma hora (07h às 18h), entre os dias 16/09/2019 a 20/09/2019, alterando o ângulo de inclinação de fixação dos módulos. Os dados foram tratados estatisticamente com o auxílio de software para demonstrar os resultados graficamente. Os painéis analisados foram de material policristalino da empresa Byd Company Limited com potência máxima 330 W. Após a análise estatística dos dados, foi evidenciado que os resultados que apresentaram melhores posicionamento foram das placas no sentido norte, com inclinação 16° sendo também observado que a maior produção foi correspondida entre o período compreendido entre 11h às 13h.

**Palavras-chave**: *energia; eficiência; fotovoltaica*.

Electricity hasbe come increas inglyin dispensable for humans urvival, because welive in a technology-dependent society that seeks constantim provements. Thus, thesearch for greater production of clean and sustainable energy tothe environment grow saggressively, starting from this principle windenergy (wind force), solar energy (solar irradiation) presents analternative energy proposal, thus contributing to the preservation of the environment. This work aimed to find the ideal conditions, through studies of the best position of production modules in a family residence in the municipal it yof Vianópolis-Goiás. The methodology used was to perform me asurements of production sat interval so fone hour (07:00 to 18:00 hours), between 16/09/2019 and 09/20/2019, changing the angle of attachment inclination of the modules. The data were statistically treated withtheaid of software to demonstrate the results graphically. The panel sanaly zed werepoly cry stalline material of byd company limited with maximum power 330 W. After statistical analysis of the data, it was evidenced that the results that presented better positioning were of the plates in thenorth directio.

**Keyword:** *energy; efficiency; photovoltaic.*

# Introdução

Com o aumento gradativo do consumo de energia, diversos métodos são explorados a fim de obter um rendimento sustentável. Diante disso, as fontes de energias renováveis conseguem suprir toda essa necessidade, devido ao fato de seus recursos serem abundantes no planeta Terra, além de não degradar o meio ambiente, tendo como principais fontes de energias renováveis: oceânicas, geotérmica, biomassa, hídrica, eólica e solar.

A energia solar se destaca por ter um potencial maior do que os outros processos, apresenta crescimento rápido e altos níveis de investimento envolvido, tendo seu recurso (irradiação) disponível e de fácil acesso em diversos países. Além disso, podem ser instalada tanto em grandes demandas, quanto pequenas, a relação espaço eficiência é ótima devido ao fato de não utilizar muito espaço, tornando-a assim mais compacta.

A conversão de raios solares em eletricidade é feita efetuada de duas formas, uma pelo efeito fotovoltaico em que os fótons contidos na luz através da excitação dos elétrons quando a luz entra em contato com o material do módulo e se transforma em energia, e com o efeito termoelétrico em que a transformação se obtém pela a diferença de potencial de dois metais com determinadas condições.

Para um rendimento de máxima eficiência do módulo fotovoltaico, devem-se observar as variáveis presentes no processo de captação da energia solar, entre elas, a irradiação no local ao decorrer do tempo, o posicionamento correto em relação ao Sol com a sua face voltada ao norte, o ângulo de instalação onde varia de acordo com a latitude local, a escolha do material do módulo que age diretamente para determinação da eficiência desejada. Em residências e comércios a frequência de instalação de painéis tem sido cada vez maior, para que despesas sejam menores, além desse investimento obter um retorno rápido.

O objetivo do trabalho é observar o desempenho dos painéis em diferentes residências, analisando a eficiência gerada em diferentes ângulos de inclinação e posicionamento, afim de identificar em qual condição se encontra a melhor produção em painéis fotovoltaicos fixos.

# Revisão Bibliográfica

A energia fotovoltaica é uma junção proveniente da obtenção de uma energia renovável sendo ela a solar, em que por meio de um processo de transição passado pelas placas solares, irá transformá-la em uma energia que poderá ser aproveitada. A energia fotovoltaica vem se tornando viável para grandes empresas onde há um processo maior e para lugares onde não tem chegado facilmente energia elétrica[1]. A Figura 1 representa o esquema básico de captação de energia solar, desde a produção no painel fotovoltaico a distribuição por meio da corrente alternado.

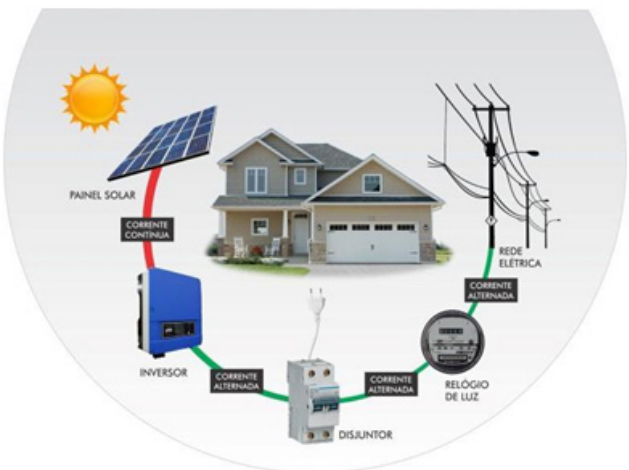



**Figura 1:** Modelo esquemático da construção de energia em uma casa. **Fonte:** Layer Solar. Sistema

Este tipo de energia renovável tem se tornado uma grande aliada na diminuição da energia comum produzida por hidrelétricas, pois anda lado a lado no modo de produção sustentável, e tem impacto direto na diminuição de poluentes produzidos no processo de obtenção de energia[1].

## PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Os efeitos da radiação (calor e luz) sobre materiais semicondutores ou silício, fazem a conversão direta de energia

solar para energia elétrica, são destacados os com efeitos fotovoltaico e termelétrico. Sendo o primeiro que os fótons contidos na luz solar são transformados em energia elétrica, através da excitação dos elétrons dos materiais com presença de luz. E no segundo e a junção de dois metais causando uma diferença de potencial em determinadas condições[2].

De acordo com o físico francês Edmund Bequerel, o princípio do funcionamento de uma célula fotovoltaica é através do fotoelétrico, na qual a energia luminosa é absorvida por elétrons do material, tendo em vista que um tipo certo de material pode ser melhor condutor do que outros materiais, apresentando princípio visíveis em gráficos[3].

Praticamente todas células fotovoltaicas que têm uma tensão de fato é desenvolvida, que se tem uma incorporação uma junção PN num semicondutor. A Figura 2 representa a junção PN e a parte principal dessa célula, em que a porção de recepção de luz é material do tipo N na peça e abaixo o material e de tipo P, tendo o material P com falta de elétrons e o material N com um número excessivo de elétrons. Devido a essa diferença os elétrons da camada N fluem para a camada P formando um campo elétrico, conhecido também como barreira de potência, e que se tem uma grade e uma base metálica, onde é feita a coleta da corrente elétrica produzida pela a ação de luz[3-7].

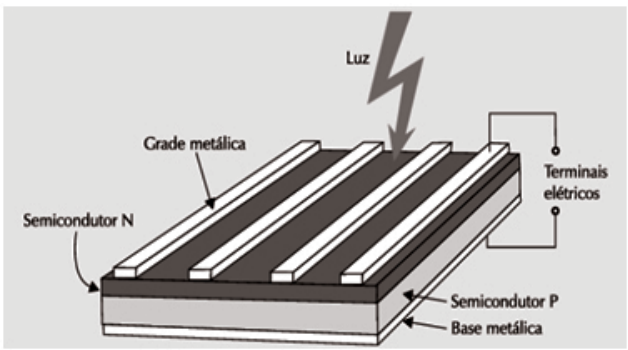



**Figura 2:** Esquema da captação de energia solar. **Fonte:** Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012)

Conforme a Ministério de Minas e Energia (MME), o Brasil possuía, ao final de 2016, 81 MWp de energia solar fotovoltaica instalados, o que vem a representar cerca de 0,05% da capacidade instalada total no país. Do total de 81 MWp existentes em 2016, 24 MWp correspondiam à geração centralizada e 57 MWp à geração distribuída[2].

As células de silício monocristalino são frutos de uma produção em fornos especiais e possui uma eficácia na conversão da luz solar em eletricidade, superior a 12%. Já as células de silício poli cristalino proporciona uma eficiência pouco menor que as de monocristalino (entre 10% a 11%).[10]

As placas fotovoltaicas agem diretamente de acordo com as suas condições de funcionamentos ambientais, dentre elas magnitude da irradiação solar, temperatura, ângulo de inclinação, dentre outras. Para uma performance melhor diante da sua eficiência energética, o ângulo de inclinação dos painéis e o tipo de módulo são parâmetros fundamentais[8].

A Eficiência da energia fotovoltaica se deve diretamente, do aproveitamento da energia gerada pelo Sol, em que as placas transformam essa luz recebida em energia elétrica, utilizando dessa fonte como alternativa energética mais promissora de transformação de energia. Essa energia solar apesar de ser um meio alternativo, pode ser não ser uma solução completa para produção de energia[9].

Contudo, os painéis fotovoltaicos apresentam perdas significativas, causadas pelo efeito da massa de ar atmosférica, no inversor de frequência e no armazenamento de energia. Desta forma, apresentando uma regularidade de manutenção nessas variáveis, a perda pode ser diminuída, aumentando assim o seu ganho energético[9].

A baixa utilização de energia solar no Brasil deve ser sinal de atenção, pois possui expressivo potencial para geração de energia elétrica a partir da fonte solar, contando com níveis de irradiação solar maiores que demais países onde possui uma infraestrutura disseminada, como Alemanha, França e Espanha[10].

A preocupação com a geração de energia por fontes renováveis vem sendo questão de debate nos últimos tempos pois no ano de 2015, o Brasil assumiu um compromisso de

redução de emissões de gases em 2025 e 2030, resultando em 43% em relação aos níveis de 2005[11].

## EFEITOS DO USO DA ENERGIA RENOVÁVEL X ENERGIA ELÉTRICA

A energia fotovoltaica é uma junção proveniente da obtenção de uma energia renovável solar, por meio de um processo de transição passado pelas placas solares, que irá transformá-la em uma energia que poderá ser aproveitada. Com a obtenção deste tipo de energia, o retorno não poderá ser viável financeiramente, pois necessita de um grande poder aquisitivo a curto prazo sendo remunerado apenas em longo prazo. Apesar de o custo ser um pouco demasiado, a energia fotovoltaica vem se tornando viável para grandes empresas onde possuem um processo maior e para lugares onde não tem chegado facilmente energia elétrica.

Este tipo de energia renovável tem se tornado uma grande aliada na diminuição da energia comum produzida por hidrelétricas, pois anda lado a lado no modo de produção sustentável, e tem impacto direto na diminuição de poluentes produzidos no processo de obtenção de energia[1].

## IRRADIAÇÃO

A radiação solar e a energia total incidente sobre a superfície da Terra, onde sua carga depende da posição no tempo e latitude local, isso se tem devido ao movimento de rotação e de translação. Com esses fatos há uma variação de duração solar do dia em períodos do ano e regiões. Sendo uma inesgotável fonte de energia, com um potencial enorme de utilização na captação e conversão em outras formas de energia, para ter seu máximo aproveitamento deve se ajustar o coletor ou painel solar em uma posição seguindo a latitude e o período do ano onde necessita de mais energia, a Figura 3 mostra as a média anual de horas de insolação diária no Brasil[2]:

A radiação também e dependente das condições climáticas e atmosférica, com a reflexão e absorção de raios solares pela a atmosfera da Terra, radiação solar tem somente uma parte em contato com a superfície terrestre,

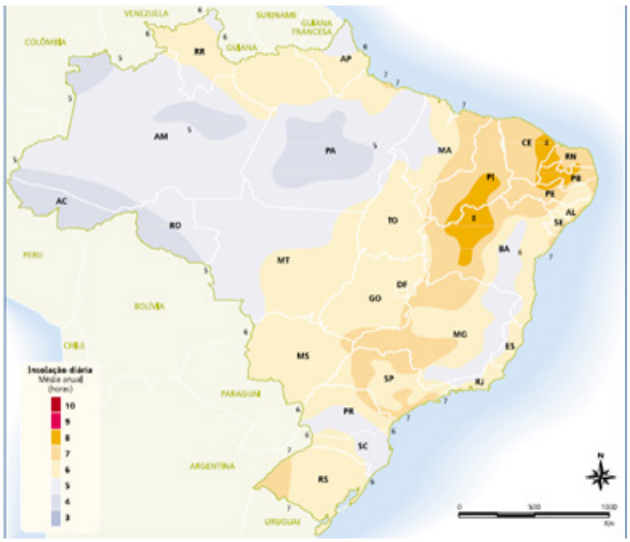



**Figura 3:** Distribuição da insolação diária no Brasil. **Fonte:** Aneel. Energia solar[10].

e estima-se que a atmosfera terrestre recebe por ano 1,5 x $10^9$ *TWh* de energia solar, e seu consumo mundial anual e 10 mil vezes menor da quantidade incidente na superfície[5].

## INSTALAÇÃODOS PAINÉIS SOLARES

A composição de um painel solar contém um ou mais módulos fotovoltaico que estão conectados eletricamente, em que cada um é composto por diversas células fotovoltaicas individuais, integrado com hardware de balanço de sistema (BOS), tendo com componentes inversores, estantes, desconexões, compartimentos, fiação e transformadores, a função de transformadores, inversores e combinadores e converter a corrente contínua de baixa voltagem em alta tensão de corrente alternada[5].

Há dois tipos de sistemas solar o on grid eo off grid, a grande diferença e que o off grid e autônomo e não necessita ser ligado a uma rede de energia, enquanto o on grid não se sustenta sozinho e tem que ser conectado a uma rede local[10].

## POSICIONAMENTO E ÂNGULO

Módulos fotovoltaico sem um sistema de rastreamento solar, tem sua melhor orientação defina em direção

norte, devido ao Sol nascer no leste e se pôr no oeste, e com o decorrer do ano a altura solar tem alterações em cada estação, tendo o norte com maior contato com os raios solares durante o decorrer do dia e do ano, como é apresentado nas Figuras 4 (a) e 4 (b)[12].

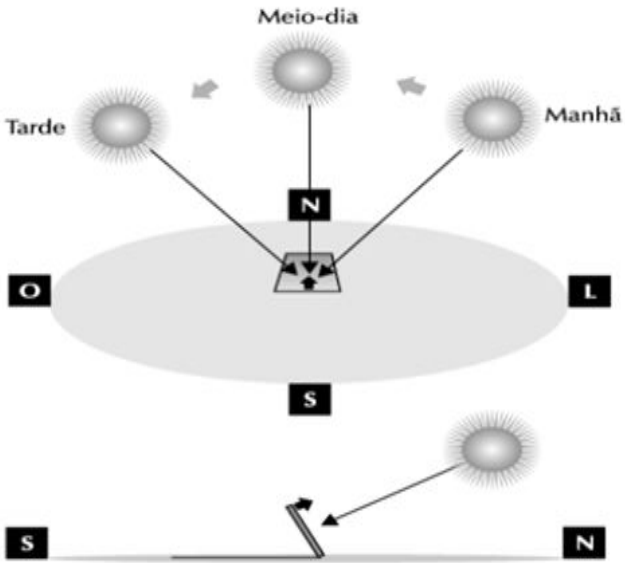



**Figura 4 (a)**: Posição do Sol relativo aos pontos cardeais.

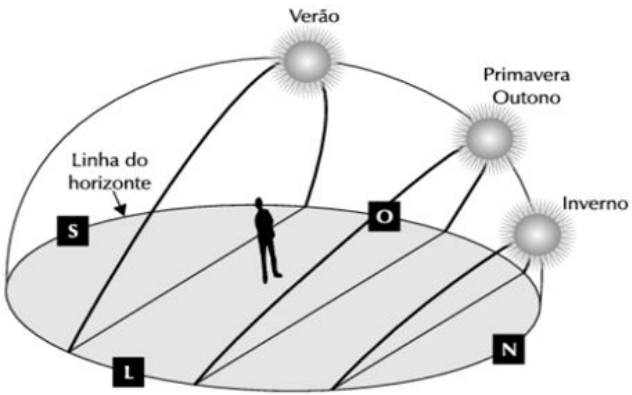



**Figura 4 (b):** Posição do Sol relativo as 4 estações. **Fonte:** Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012)

Os raios solares incidentes na superfície terrestre variam ao longo do dia, mostrado na Figura 5, um módulo que está instalado com um ângulo de inclinação α em relação a solo e com a face virada para o norte[12].

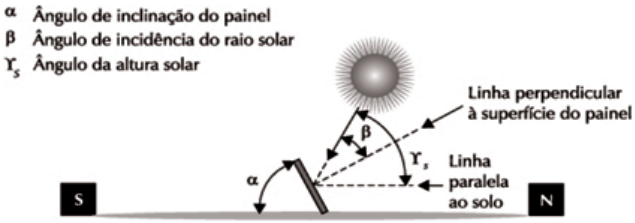



**Figura 5:** Módulo com ângulo de inclinação. **Fonte:** Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012)

O ângulo de incidência solar no módulo solar e representado pela sigla β, e definido uma linha reta traçada perpendicular à superfície do módulo, sendo que a passar dos dias a ocorrendo uma variação em relação à altura solar ϒs, fazendo que a o ângulo dado pela incidência solar seja diferente[16].

O melhor aproveitamento dos raios solares tem-se quando o ângulo β = 0, devido à incidência estar a linha perpendicular ao módulo, tendo assim a máxima captação da energia solar, por isso a inclinação do módulo deve ser ajustada em relação à altura ϒs solar do dia, mas maior parte dos módulos fotovoltaicos são instalados com ângulo fixo, então deve-se ser escolhido esse ângulo usando algum critério[12].

| Latitude Geográfica do local | Ângulo de inclinação recomendado |
|---|---|
| 0° a 10° | α = 10° |
| 11° a 20° | α = latidude |
| 21° a 30° | α = latidude + 5° |
| 31° a 40° | α = latidude + 10° |
| 41° ou mais | α = latidude + 15° |

**Quadro 1:** Representação do ângulo de inclinação em relação à latitude geográfica. **Fonte:** Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações (2012)

O critério mais utilizado se dá pela latitude do local onde se está sendo instalado o painel para que se tenha uma boa produção de energia ao longo do ano, a Tabela apresentada mostra um ângulo recomendado para certas latitudes, não se recomenda ângulo menor que 10° por ocorrer acúmulo de poeira nas placas[12].

**TRACKER OU SEGUIDOR SOLAR**

O seguidor solar ou tracker é um dispositivo que faz que os painéis fiquem em uma posição favorável para captar o máximo de irradiação diária. Com isso, sua produção de energia seja maior, sendo utilizado com frequência em usinas fotovoltaicas, podendo aumentar seu desempenho na produção cerca de 28% onde existe abundância em incidência solar e 16% onde não se tem, apesar de acrescentar cerca de 20% no custo total de um sistema de geração fotovoltaica[13].

# Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida no município de Vianópolis, em cinco residências com ângulo e posicionamento diferentes, que tinham instaladas painéis fotovoltaicos da empresa Byd Company Limited, tipo de módulo é BYD335PHK-36, avaliado com potência máxima (Pmáx) de 335W, tensão de circuito aberto de 45,44V e de Pmáx de 38,10V, com corrente de curto circuito de 9,25A e para Pmáx 8,79A, a temperatura normal de operação e de 45°C com variação de 2°C. Os módulos têm dimensão de 1992 x 992 x 35 mm, com o peso de 22,2 kg, sua célula e 4 Bus Bar Solar HalfCeel 156,75 x 78,735mm, estrutura de liga de alumínio anodizado e com o vidro frontal temperado de 3,2 mm com revestimento de AR.

Devido o experimento ocorrer na mesma região a irradiação é uma variável que não sofre alteração de um módulo para outro, sendo ela considerada por um média 5,422 kWh/m$^2$ por dia. A potência elétrica resulta pela multiplicação da tensão e corrente, e a eficiência do sistema depende do ângulo de inclinação e do posicionamento em relação ao Sol, então para fazer uma análise expressiva dos dados aplicou as três variáveis.

Para ter o desempenho dos sistemas fotovoltaicos coletou-se a potência dos módulos em intervalo de duas horas, então os horários foram: 9h, 11h, 13h, 15h e 17h. Utilizou quatro sistemas de monitoramento que acompanhavam os painéis através de seus inversores, foram eles: Canandian, Growatt, Fronius, Solar View.

# Resultados

Os gráficos a seguir são representações dos dados colhidos durante a semana nas respectivas residências, nos períodos de 9h, 11h, 13h, 15h, 17h. Foram coletadas a potência elétrica por módulo e total, ângulo de inclinação, quantidade de painéis, direcionamento em relação ao Sol.

A primeira residência obtinha de 10 módulos, todos posicionados para o norte, com um ângulo de inclinação de 14°, apresentando uma média de 183,30W, com seu monitoramento efetuado pelo sistema Canandian. Sua média foi de 183,30W, o dia que maior apresentou potência foi o dia 16/09/2019 com média de 194,84W sendo a maior potência elétrica gerada de 256,472W às 13h, conforme o Gráfico 1 a seguir representa:

**Gráfico 1:** Coleta dos dados da Produção da energia gerada na residência 1. **Fonte:** Autores

O Gráfico 2, faz parte da segunda residência, fez parte um sistema de 90 módulos fotovoltaicos, sendo 24 apontados para o norte, 16 para o sul e 50 para o leste. O ângulo de inclinação é de 9° para todos os painéis, para acompanhamento foi utilizado o sistema de monitoramento da Canandian. A média de potência gerada do módulo para os dias analisados foi de 172,28 W, com o maior no dia 16/09/2019 com 184,11W e média maior às 11h com valor de 254,133W.

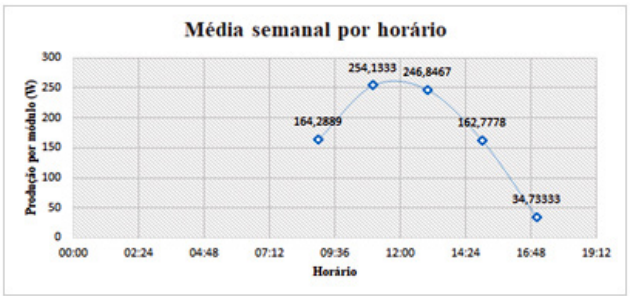



**Gráfico 2:** Coleta dos dados da Produção da energia gerada na residência 2. **Fonte:** Autores

A partir de 16 módulos, a terceira residência disponibilizava de 9 módulos para leste e 7 módulos para oeste, a inclinação era de 7° para todos. O sistema para acompanhar foi o WEG. A potência média da semana foi de 172,13W, e melhor dia igual as outras residências, com média no dia de 184,36W, e maior produção as 11h como mostrado no Gráfico 3 com valor de 244,26W.

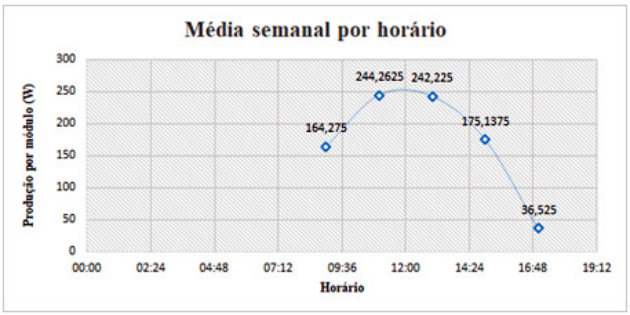



**Gráfico 3:** Coleta dos dados da Produção da energia gerada na residência 3. **Fonte:** Autores

A quarta residência teve 26 módulos, com o posicionamento de 14 para leste e 12 para oeste, com 10° grau de inclinação, monitorado por sistema Fronius. A potência média como mostrado no Gráfico 4 foide 160,65W, e com o dia 16/09/2019 gerando 174,31W sendo a maior potência da semanae com produção máxima de 237,93W às 13h.

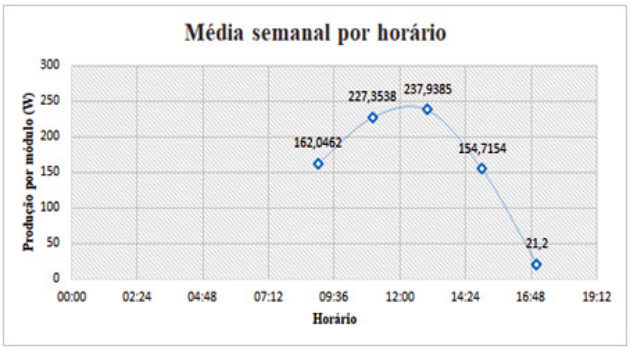



**Gráfico 4:** Coleta dos dados da Produção da energia gerada na residência 4. **Fonte:** Autores

O Gráfico 5 foi resultado de uma média da quinta residência onde apresentava 8 módulos todos apontados para o norte, com 11° de inclinação, e acompanhado pelo sistema Growatt, com potência média de 139,22 W, com melhor rendimento no mesmo dia das outras residências sendo de 144,9 W, maior média de potência de 218,50W às 13h. Sua geração de potência foi menor devido ao um sombreamento na parte da manhã nos painéis, afetando sua produção.

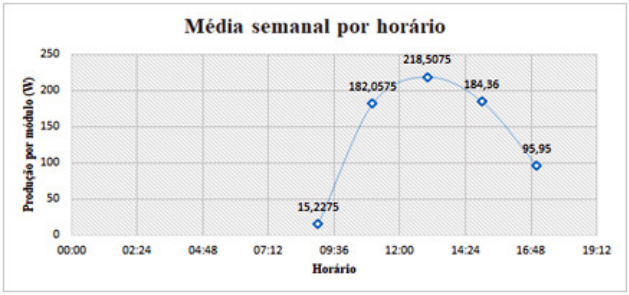



**Gráfico 5:** Coleta dos dados da Produção da energia gerada na residência 5. **Fonte:** Autores

Com os resultados obtidos, foi possível observar que a residência com maior eficiência solar foi a primeira casa, com 14° de inclinação com todos posicionados para o norte e média de 183,30W e geração máxima de potência nos horários

coletados de 269,37W. Sendo assim, percebe-se que devido à diferença de potência gerada em relação às outras casas, leva a crer que com estas configurações é o ideal para conseguir mais eficiência nesta região.

Constata-se também que o horário de pico se dá em uma margem entre 11h ás 13h, e levando em consideração sua geração de potência ideal de 330W, a primeira moradia obteve um percentual de rendimento de 77,57%, enquanto a segunda teve 75,90%, e as demais 73,70%,70,49% e 60,69%.

Vale ressaltar em relação à quinta casa por que teve seus dados alterados devido a um sombreamento que ocorreu durante a parte da manhã no momento em que estava sendo colhidos os dados e além dos painéis estarem com sujeira[14].

# Conclusão

Por meio da analise dos resultados, conclui-se que para a região de Vianópolis o melhor posicionamento para o módulo fotovoltaico é com sua face voltada para a direção norte, e quanto mais próximo o ângulo de inclinação da latitude, maior será a geração de potência. Observa-se que o horário de pico de irradiação é no período das 11h as 13h durante o decorrer do dia.

# Referencial Bibliográfico


1. Cabral, Isabelle; Vieira, Rafael. Viabilidade econômica x viabilidade ambiental do uso de energia fotovoltaica no caso brasileiro: uma abordagem no período recente. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **2012**.
2. ANEEL. Energia solar 3. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf>. Acesso em: 10 de Abril de **2019**.
3. Groth, Júlio Augusto.; Usina de Geração Fotovoltaica: Custo de Implantação, Operação e Taxa de Retorno do Investimento. Porto Alegre, **2013**.
4. MIT. **2015**. Integration of Solar Generation in Wholesale Electricity Markets. The Future of Solar Energy, 175–205.
5. Layer Solar. Sistema Fotovoltaico. Disponível em <http://www.layersolar.com.br/?page_id=47>. Acesso em 13 de Outubro de **2019**.
6. Nascimento, C. Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, Lavras. **2004**. 23 f.
7. Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. **2017**. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74 (December **2016**), 590–601.
8. Souza, A. de, & Aristone, F. **2017**. ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO. Inter Espaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade, 2 (7), 115.
9. Vitti, D.C.; Alvares, L.M.; AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Brasília, **2006**.
10. Bortolo, V. A., Souza, A., Goes, G., Martins, M. A., Berghe, M. J., & Kimura Montanha, G. **2017**. Geração de Energia Solar On Grid e Off Grid.6.
11. COGEN, **2012**. Inserção a Energia Solar no Brasil. São Paulo, 77.
12. Gradela, M. A.; Rafael, J. G; Energia solar fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, **2012**.
13. Blaszczak, V., ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE PAINEL FOTOVOLTAICO COM SISTEMA TRACKER SEGUIDOR SOLAR, Erechim, **2017**.
14. Urbanetz Jr, J.; Casagrande Jr, E.; Tiepolo, G. M. Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. **2014**a.



**Gabriel V. Barbosa, Matheus F. S. Alcântara*, Matheus R. G. Araújo, Tiago T. Fonseca, Rosemberg F. N. Rodrigues & Márcio J. Dias**

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: matheusrg70@gmail.com

# Condensação da Água Atmosférica com Peltier

Igor T. B. Medeiros, Matheus S. Oliveira
& Victor E. N. A. Pericoli

O trabalho consiste na análise de simulações para obtenção de água do ar atmosférico com uso de módulos peltier e dissipadores, testando a eficiência da temperatura na extensão das aletas e na condensação da água, ambos com influência de ventilação forçada e umidade. Os resultados mostram que sem o uso da ventilação é possível atingir a temperatura do ponto de orvalho até a extremidade das aletas em situações de baixa umidade, com alta umidade tal temperatura atingiu a extremidade tendo ou não o uso da ventilação forçada, porém a fração de água condensada foi prejudicada conforme o aumento da ventilação.

**Palavras-chave**: *ponto de orvalho; módulos peltier; condensação*.

This work consists of the analysis of simulations to obtain water from atmospheric air using peltier modules and heatsinks, testing the efficiency of the temperature in the extension of the fins and the condensation of water, both with the influence of forced ventilation and humidity. The results show that without the use of ventilation it is possible to reach the dew point temperature to the fins end in low humidity situations, with high humidity this temperature reached the extremity with or without the use of forced ventilation, but the fraction of Condensed water was impaired as ventilation increased.

**Keywords:** *dew point; peltier modules; condensation.*

# Introdução

Segundo especialistas, em 2012, a previsão era que mais de 40% da população mundial não teria acesso à água potável naquele mesmo ano. A demanda é crescente devido ao aumento populacional, à produção agrícola e a outros usos, tornando um cenário enxertado de incertezas e conflitos, sem contar a demanda mundial, a qual aumentará em torno de 55% até 2050 ameaçando aumentar os riscos de embates no mundo[1].

De acordo com a OMS (Organização Mundial da Saúde), em 2015, 5,2 bilhões de pessoas tiveram água potável para o seu uso. Os 2,1 bilhões restantes, tiveram que se deslocar no mínimo 30 minutos para a sua coleta, outros consumiram água duvidosa de poças e nascentes ou usaram água não tratada de lagos, rios, córregos e poças [2]. Como resultado, 361 000 crianças abaixo de 5 anos morrem devido à diarreia todo o ano, como também outras doenças como cólera, disenteria, hepatite A e febre tifoide podem ser transmitidas por conta de água imprópria para consumo[3]. E com o aumento da população, mudanças climáticas e má urbanização já se mostram um desafio para a distribuição de água,sendo a previsão para o ano de 2025 que metade da população vá sofrer pela falta de água[2].

Os lugares que mais sofrem a escassez de água são locais secos no qual aquela região a quantidade é limitada e lugares pobres, onde existe quantidade suficiente para a população, porém não possui tratamento adequado por questões econômicas, políticas ou guerrilhas[3,4]. A distribuição para essas regiões é inviável economicamente, enquanto o vapor d'água está sempre presente, em maior quantidade próximo ao equador e menor quantidade longe dele[5], podendo ser uma melhor solução para o futuro. Existem algumas maneiras para se retirar água do ar, como resfriando esse ar abaixo da temperatura do ponto de orvalho, ou absorvendo água com um liquido ou sólido dessecante e logo depois evaporar essa água absorvida e condensar o vapor [6].

Atualmente, existem produtos no mercado que realizam esse tipo de serviço, como Veragon, Skywater, WaterFrom Air, entre outras. Porém são máquinas grandes e com um grande consumo de energia, sendo seu uso ideal em aglomerados de pessoas. Algumas pesquisas foram feitas utilizando módulos peltier para condensar a água. Abraham Mansouri *et al*[7] criaram um protótipo para a condensação da água atmosférica observando os resultados da ventilação forçada e natural, conseguindo 116 $ml/hr$ de água, concluindo que a ventilação forçada dificulta a condensação da água em grande parte dos casos, mas podendo ajudar quando as condições estiverem boas.

Enquanto Shanshan Liu *et al*[8] conseguiram uma máximo de 25,1 $g/h$ de água, concluindo que com o aumento do fluxo de ar junto com a alta umidade, obtém-se maior quantidade de água condensada, porém uma menor taxa de condensação, sendo as principais condições paratal taxa, a baixa capacidade de resfriamento, área de liquefação, pouco tempo de contato com o ar e a adesão das gotas na aleta de resfriamento. Muñoz-García *et al*[9] armazenou energia produzida por placas solares para suprir os módulos peltier em horários específicos e condensar a água alimentando mudas de árvores, conseguindo valores de 2 - 4 mL após 1 hora.Também encontraram as melhores horas para a coleta, entre às 5 e 8 horas, com pressuposto de que abaixo de 20% de umidade relativa não seria ideal para a coleta.

A maior contribuição deste trabalho envolve a simulação computacional da estrutura responsável pela condensação, sendo parte de um produto portátil, pensado para regiões com falta de água, proporcionando a retirada desta através do ar atmosférico, apresentando resultados parciais, revelando a possibilidade do uso de um aparato tecnológico para esta função.

# Referencial Teórico

Segundo a NASA (2017), a composição atmosférica do ar no Planeta Terra é de 78,08% Nitrogênio, 20,95% Oxigênio, 9340 ppm de Argônio, 400 ppm de Dióxido de carbono, 18,18 ppm de Neón, 5,25 ppm de Hélio, 1,7 ppm de Criptón e 0,55 ppm de Hidrogênio [10]. Existe também material sólido disperso, como poeira, pólen, micro-organismos, entre outras coisas, e uma pequena parcela de vapor d'água, ou em forma condensada como nuvens, neblinas e chuvas [11]. Essa quantidade é maior com o aumento da temperatura. Em geral, próximo ao equador, a umidade absoluta do ar pode

chegar a 20 $g/m^3$ numa média por ano, enquanto nos polos esse valor chega a 3 $g/m^3$ [5].

De forma básica, a condensação é a transformação do gás ou vapor em líquido, ocorrendo quando o gás entra em contato com uma região fria. A água, como todas as matérias, é formada por moléculas equando aquecida, elas começam a se agitar até se transformarem em vapor, ou seja, movem-se rapidamente permanecendo afastadas uma das outras. Quando o vapor encontra algum gás ou uma superfície fria, as moléculas de água agitadas começam a perder energia, e por estarem com menos movimento, a força intermolecular se torna mais forte, agrupando-as, ocorrendo assim a condensação [12].

As moléculas de $H_2O$ mostrada na Figura 1 vão se unindo através de uma força intermolecular chamada Ligação de Hidrogênio,um tipo especial de atração dipolo-dipolo que ocorre especificamente com as ligações do hidrogênio ligado ao oxigênio, nitrogênio e flúor[13]. Essa força intermolecular é mais fraca que a força intramolecular, sendo ela quem define os estados da matéria,com energia necessária de 40,67 kJ/mol acontece a quebrada ligação transformando-a em vapor, e do mesmo modo acontece a condensação, mas com a perda desta energia[14] que pode ser alcançada com a utilização de um termoelétrico.

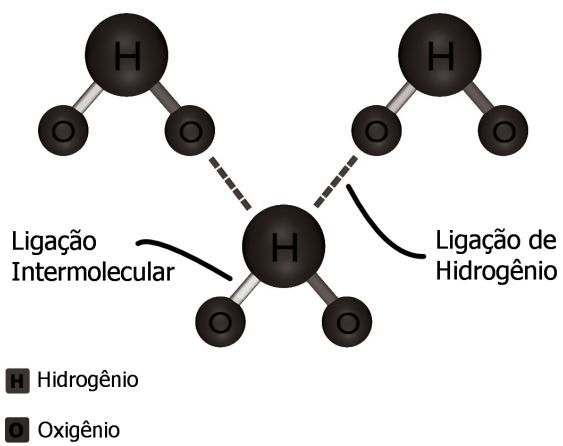



**Figura 1:** Ligação Intramolecular e Intermolecular. **Fonte:** referência [13].

Basicamente "O efeito termoelétrico é literalmente associado com os fenômenos térmicos e elétricos. Esse efeito pode converter diretamente energia térmica em energia elétrica ou vice-versa"[15]. Os módulos que estão presentes no mercado hoje se utilizam do efeito peltier, conhecidas como pastilha de Peltier, Figura 2, sua construção se baseia em um grande número de semicondutores dopados com o tipo-N e tipo-P, ligados em série eletricamente e paralelos termicamente, placas de cerâmica de alta condutividade térmica e baixa condutividade elétricas usadas em ambos os lados para formarem o módulo[15]. O material do tipo-P possui um déficit de elétron enquanto o material do tipo-N possui excesso de elétrons. Os elétrons do tipo-P se movem para o material do tipo-N absorvendo energia (lado frio), e quando os elétrons fluem do material do tipo-N para o material do tipo-P, libera energia (lado quente). Esse princípio se baseia nos níveis de energia dos elétrons [16]. Apesar do seu baixo coeficiente de performance (COP), existem algumas vantagens. Não existem partes móveis, tento menos risco de falhar durante a operação, são compactas e silenciosas [17].

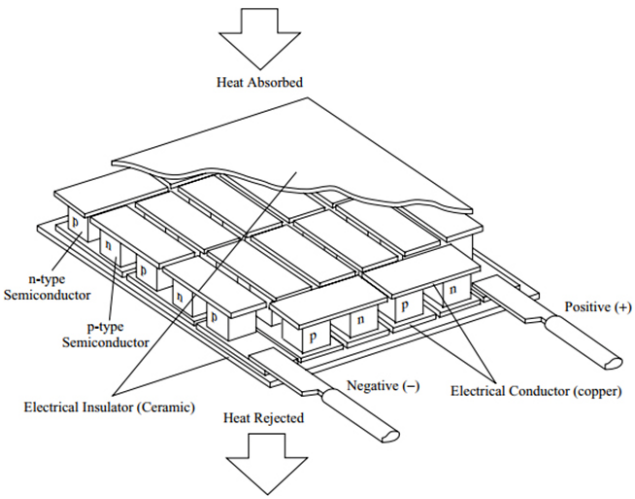



**Figura 2:** Módulo Peltier. **Fonte:** referência [15].

Tanto para a condensação da água quanto para dissipação de calor, é necessária a transferência de energia entre o módulo peltier e os dissipadores por meio da condução e convecção. Condução é a transferência de energia da molécula mais agitada para a menos agitada de um material, sem que ocorra transporte de matéria, enquanto na convecção ocorre também a transferência de energia, porém com movimento do fluído, se não existe tal movimento o processo volta a ser definido como condução[18].

A temperatura da aleta estará maior que a temperatura do lado frio do peltier, assim ocorre a transferência de calor até que a extremidade do dissipador fique na temperatura do ponto de orvalho, enquanto o lado quente do peltier do mesmo modo estará transferindo energia térmica para a aleta responsável pela dissipação do calor. O movimento de fluido nos dissipadores aumenta a sua taxa de propagação térmica[18], resfriando o lado quente do peltier evitando a queima do termoelétrico e o equilíbrio entre os lados quente e frio. Apesar de a ventilação ajudar na dissipação de energia térmica e aumentar o fluxo de ar, ela mostrou interferir na condensação da água, tendo variações, como de acordo com experimentos realizados por Abraham Mansouri *et al*[7], em que a utilização da ventilação forçada de 1 $m/s$ e 2 $m/s$ com umidade de 60% impactou negativamente enquanto para umidade de 80% a ventilação mostrou ser efetiva, também mostrado por Shanshan Liu *et al*[8], com o aumento do volume de ar entrando, se teve um aumento de água condensada com umidades altas.

# Metodologia

O modelo proposto no trabalho foi desenvolvido para condensar e verificar a quantidade de água coletada, sendo elaborado no Solidworks, software baseado em computação paramétrica, dando a possibilidade de criação de formas tridimensionais através de operações geométricas, e simulado no Ansys, software utilizado para projetar produtos, como também utilizado para simulações de distribuição de temperatura, movimento de fluidos, teste de resistência de materiais bem como outros, observando o ponto de orvalho do sistema baseado na temperatura ambiente, umidade relativa, além da dissipação de calor, de acordo com o sistema proposto.

## SUPERFÍCIE ESTENDIDA LADO FRIO

Foram definidos alguns parâmetros para a dimensão do dissipador. A base deve ter as mesmas medidas da placa peltier, $40x40\ mm$. Para as aletas, definiu-se a quantidade de 07 (sete), com espessura de $1{,}9\ mm$ e espaçamento entre elas de $4{,}45\ mm$, espaço suficiente para não reter água devido a sua capilaridade[19]. Para definir o tamanho da aleta $(L = x)$ foi utilizada a Equação 01, analisando a temperatura (T) na extremidade da aleta. Supondo condições ruins para a condensação da água, temperatura ambiente de $T_{\infty} = 35°C$, umidade relativa de $HR$=20%, coeficiente convectivo de $h = 20\ W/m^2K$ e condutividade térmica da aleta de $k = 177\ W/mK$, devido material ser Alumínio Liga 2024-T6. Nessas condições, o ponto de orvalho $(PO)$ é de $8{,}66\ °C$ no qual seria a temperatura da base $T_b$. Em que $P$ é o perímetro e $A_{tr}$ a área transversal dá aleta.

$$T = \left( \frac{\cosh\left(m(L-x)\right) + \left(\frac{h}{mk}\right) senh\ (m(L-x))}{\cosh(mL) + \left(\frac{h}{mk}\right) senh\ (mL)} \right) (T_b - T_{\infty}) + T_{\infty}. \quad \text{(Eq. 01)}$$

$$m = (hP/kA_{tr-})^{1/2} \quad \text{(Eq. 02)}$$

Uma margem de erro de -2°C na temperatura do peltier foi adicionada para manter todo o dissipador na temperatura do ponto de orvalho. Como se pode observar na Figura 3, se o peltier começar na temperatura de condensação, as aletas estarão acima desta. Ajustando a temperatura, faz com que o dissipador tenha sua estrutura abaixo do tal ponto.

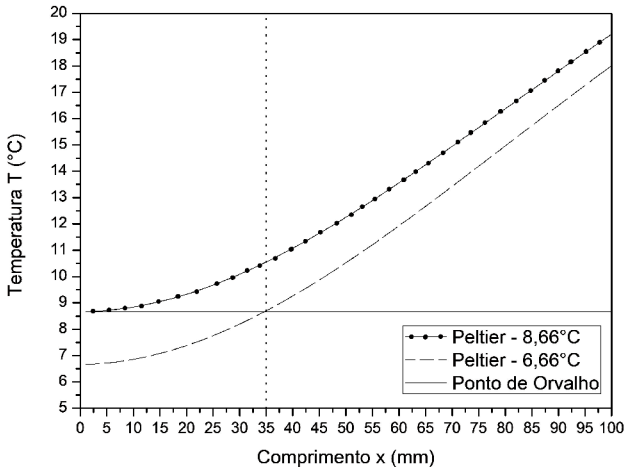



**Figura 3:** Eficiência da aleta. **Fonte**: Autor.

Pela Figura 3, é possível observar o comprimento ideal da aleta para o projeto 35 $mm$, sendo, por ser a medida limite de alcance da temperatura até a sua extremidade. Isso não significa que não possa ter outra dimensão, mas para os testes propostos, esta será a dimensão usada. A Figura 4 mostra o modelo 3D com unidades em $mm$.

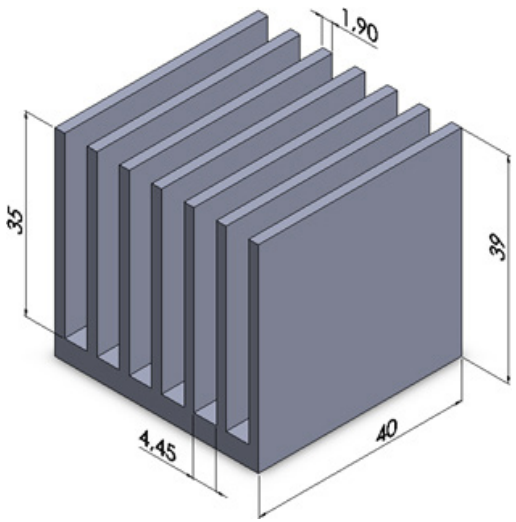



**Figura 4:** Dissipador de calor lado frio. **Fonte:** Autor.

Deve-se observar que com o aumento da condutividade e difusividade térmica do dissipador de calor, mais eficiente se torna o processo de condução, possibilitando desta maneira o uso de comprimentos maiores das aletas, e como consequência, mais área de contato do ar com a superfície fria[20].

## SUPERFÍCIE ESTENDIDA LADO QUENTE

Como discutido anteriormente, é necessário o uso de um dissipador de calor no lado quente do módulo peltier. Com as equações a seguir, é possível determinar a taxa de transferência de calor $Q$, a Equação 7 determina a taxa para uma única aleta, em que $t, w$ e $L$, e são a espessura, largura e comprimento da aleta respectivamente, $L_c$ é o comprimento corrigido, $A_{aleta}$ é a área superficial e $\eta_{aleta}$ é a sua eficiência.

$$m = \sqrt{\frac{2h}{kt}}. \quad \text{(Eq. 03)}$$

$$L_c = L + \frac{t}{2}. \quad \text{(Eq. 04)}$$

$$A_{aleta} = 2wL_c. \quad \text{(Eq. 05)}$$

$$\eta_{aleta} = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}. \quad \text{(Eq. 06)}$$

$$\dot{Q} = \eta_{aleta} h A_{aleta}(T_b - T_\infty). \quad \text{(Eq. 07)}$$

$$\dot{Q}_{total,aleta} = \dot{Q}_{não\ aletada} + \dot{Q}_{aleta}. \quad \text{(Eq. 08)}$$

$$\dot{Q}_{total,aleta} = hA_{não\ aletada}(T_b - T_\infty) + \eta_{aleta} h A_{aleta}(T_b - T_\infty). \quad \text{(Eq. 09)}$$

$$\dot{Q}_{total,aleta} = h(A_{não\ aletada} + \eta_{aleta} A_{aleta})(T_b - T_\infty). \quad \text{(Eq. 10)}$$

Entretanto, é necessário considerar a parte não aletada da superfície, sendo assim, a taxa de transferência de calor para superfície contendo naletas podem ser expressa pela Equação 10.

## PONTO DE ORVALHO

Para obtenção do ponto de orvalho, é necessário um sistema de observação, obtenção e controle de informações, podendo ser utilizado um microcontrolador,trabalhando junto a um sensor de umidade e temperatura, o qual

transmite informações necessárias para condensação, porém isto não foi desenvolvido neste trabalho. Assim, é calculado por meio da Equação 12, a temperatura que o módulo peltier deve atingir paratransferir ao dissipador do lado frio, $T_{po} = Temperatura\ ponto\ de\ orvalho$, utilizando as constantes 237,7 e 17,27, $UR = Umidade\ Relativa\ e$ $*T*bs* = Temperatura\ de\ Bulbo\ Seco$, também conhecida como temperatura ambiente, além do ajuste de -2°C para o sistema de refrigeração, como já mencionado.

$$T_{PO} = \left( \frac{237{,}7 \cdot \left[ \ln\left(\frac{UR}{100}\right) + \frac{17{,}27+T_{BS}}{237{,}7+T_{BS}} \right]}{17{,}27 - \left[ \ln\left(\frac{UR}{100}\right) \frac{+17{,}27+T_{BS}}{237{,}7+T_{BS}} \right]} \right) - 2. \qquad \text{(Eq. 12)}$$

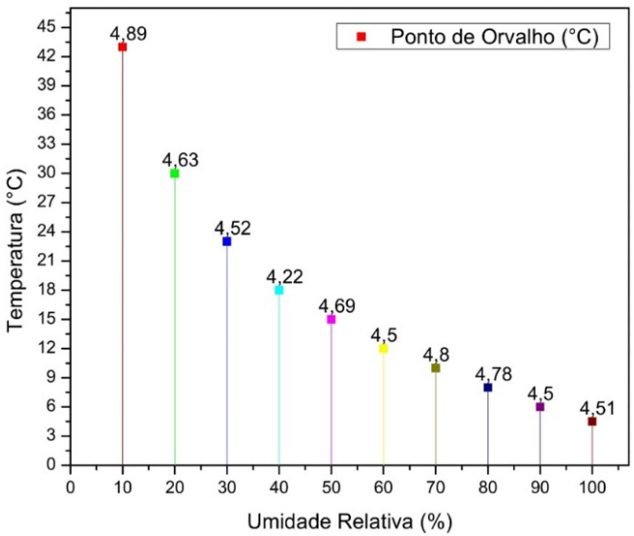



**Figura 5:** Condições limites de temperatura e umidade relativa. **Fonte:** Autor.

Um dos parâmetros de trabalho do sistema é a relação entre a temperatura ambiente e a umidade relativa. É possível observar pela Figura 5, as condições mínimas de trabalho. Para umidade de 10%, se a temperatura ambiente for menor que 43°C, não é possível configurar experimentalmente a temperatura da placa peltier para o ponto de orvalho de 4,89°C com ajuste de -2°C, ou seja, 2,89°C, pois estaria próximo do valor de solidificação da água, dispersando do objetivo de condensação. Outro exemplo seria com 20% de umidade, se a temperatura de bulbo seco fosse 25°C, o ponto de orvalho valeria 0,48°C, ainda com ajuste do sistema, tal ponto cairia para -1,52°C, solidificando a água. Assim vale para as outras condições.

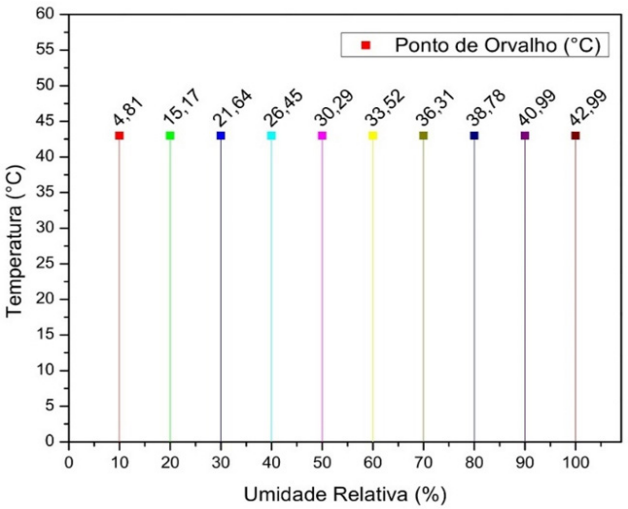



**Figura 6:** Umidade Relativa x Temperatura Ambiente. **Fonte:** Autor.

Na Figura 6 é apresentado o ponto de orvalho, sem o ajuste de temperatura de -2°C, enviado à placa peltier para cada valor de umidade, ou seja, em relação a uma única temperatura, 43°C. A partir desta, é perceptível que a umidade relativa influencia no ponto de condensação, além disso, quanto maior esta porcentagem, maior a possibilidadede os dissipadores de calor trabalharem próximo à temperatura ambiente.

## SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas no Ansys, com diferentes condições de umidade e velocidade de ar injetado. Na primeira simulação foi observada a temperatura da superfície estendida do lado frio com relação ao seu comprimento, com tempo de 2 minutos para cada teste, e velocidades da ventilação forçada de 2m/s, 1 m/s e 0,5 m/s, observado pela Tabela 1.

**Tabela 1:** Condições para a primeira simulação. **Fonte:** Autor.

| Condição | UR (%) | T(°C) | PO(°C) |
|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 35 | 8,66 |
| 2 | 40 | 32 | 16,68 |
| 3 | 60 | 31 | 22,3 |
| 4 | 80 | 32 | 28,1 |

A segunda simulação foi realizada utilizando 06, 08, 10 e 20 dissipadores, sob regime laminar, mantendo a temperatura de 30°C, porém utilizando duas condições diferentes de umidade relativa 20% e 70%, com quatro velocidades, 2m/s, 1 m/s, 0,5 m/se 0,35 m/s, tendo a duração dos testes por 300s (trezentos segundos), com 10 iterações a cada segundo, observando a influência da ventilação forçada no sistema em relação à umidadepara obtenção da fração de água líquida condensada.

# Resultados e Discussão

Os resultados da simulação 01 são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Teste de condições para velocidade e umidade. **Fonte:** Autor.

| | Condição 1 | Condição 2 | Condição 3 | Condição 4 |
|---|---|---|---|---|
| Temperatura ambiente (°C) | 35 | 32 | 31 | 33 |
| UR% | 20 | 40 | 60 | 80 |
| Ponto de Orvalho (°C) | 8,66 | 16,68 | 22,3 | 29,07 |
| Comprimento refrigeradocom Ventilação 2 m/s (mm) | 10 | 17 | 35 | 35 |
| Comprimento refrigerado com Ventilação 1 m/s (mm) | 17,77 | 25 | 35 | 35 |
| Comprimento refrigerado com Ventilação 0,5 m/s (mm) | 35 | 35 | 35 | 35 |

Como pode ser observado, na Condição 1, com ventilação forçada de 2 $m/s$, grande parte da aleta ficou acima do ponto de orvalho, tendo atingido o valor abaixo desse ponto em 10 $m/s$ até do comprimento total. A 1 $m/s$, na metade do comprimento da aleta já foi possível atingir a temperatura de condensação. Enquanto para a velocidade de 0,5 $m/s$ foi alcançado o valor ideal do teste em toda sua dimensão.

Seguindo o mesmo princípio de análise para os outros testes, na Condição 2 apenas com velocidade de 0,5 m/s obteve-se eficiência de 100% da aleta. Nas Condições 3 e 4, os resultados já mostram grande diferença por questão da alta umidade, com 2 $m/s$ já é atingido na ponta da aleta uma temperatura abaixo do ponto de orvalho. Sendo assim, o mesmo processo acontece com velocidades menores, uma vez que os resultados são melhores como de acordo com Tabela 1.

Os resultados da simulação 02 são mostrados na Tabela 3.

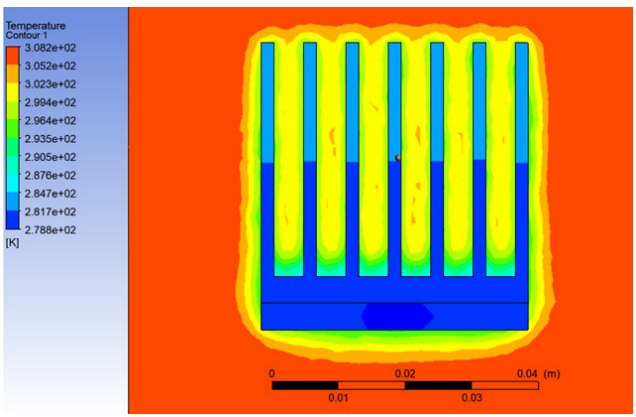



**Figura 7:** Temperatura da Condição 1 com velocidade de 1 m/s. **Fonte:** Autor.

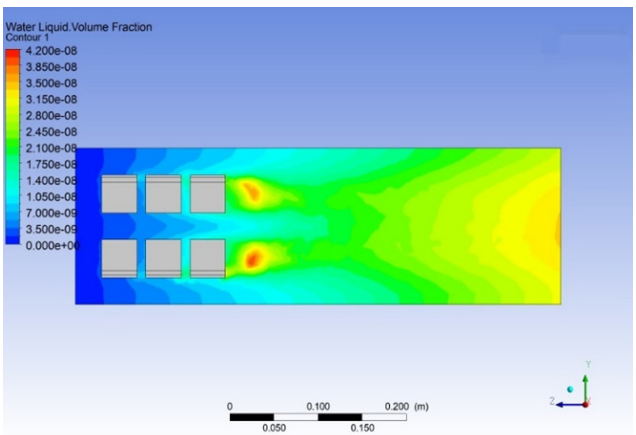



**Figura 8:** Fração de volume de água líquida em 6 módulos e UR a 20% com 1 m/s. **Fonte:** Autor.

**Tabela 3:** Resultados da fração de volume de água líquida. **Fonte:** Autor.

| FRAÇÃO DE VOLUME DE ÁGUA LÍQUIDA (Kg/Kg) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Condições** | **06 módulos** | **08 módulos** | **10 módulos** | **20 módulos** |
| **2 m/s 20% (UR)** | 1,639e$^{-08}$ | 4,634e$^{-08}$ | 2,676e$^{-08}$ | 1,532e$^{-07}$ |
| **2 m/s 70% (UR)** | 5,701e$^{-08}$ | 6,820e$^{-08}$ | 8,425e$^{-08}$ | 4,515e$^{-07}$ |
| **1 m/s 20% (UR)** | 4,200e$^{-08}$ | 2,176e$^{-08}$ | 1,018e$^{-07}$ | 2,043e$^{-06}$ |
| **1 m/s 70% (UR)** | 1,320e$^{-07}$ | 1,444e$^{-07}$ | 3,378e$^{-07}$ | 4,156e$^{-06}$ |
| **0.5 m/s 20% (UR)** | 1,067e$^{-07}$ | 2,314E$^{-08}$ | 2,929e$^{-05}$ | 2,732e$^{-06}$ |
| **0.5 m/s 70% (UR)** | 3,255e$^{-07}$ | 3,782e$^{-07}$ | 1,222e$^{-04}$ | 8,732e$^{-06}$ |
| **0,35 m/s 20% (UR)** | 1,816e$^{-07}$ | 3,845e$^{-06}$ | 3,533e$^{-05}$ | 8,588e$^{-06}$ |
| **0,35 m/s 70% (UR)** | 5,487e$^{-07}$ | 1,263e$^{-05}$ | 1,260e$^{-04}$ | 2,877e$^{-05}$ |

**Tabela 4:** Potência consumida por quantidade de módulos de peltier. **Fonte:** Autor.

| Potência consumida (KWh) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Ponto de Orvalho** | **06 módulos** | **08 módulos** | **10 módulos** | **20 módulos** |
| **2,57 °C (20% 30°C)** | 0,0274 | 0,0364 | 0,045 | 0,0910 |
| **21,91 °C (70% 30°C)** | 0,008 | 0,01074 | 0,0134 | 0,0268 |

É possível observar, com aumento da umidade, obtenção de maior fração de volume de água líquida, porém se a ventilação forçada for aumentada mesmo com alta umidade, o volume condensado diminui. Também pode-se perceber que tendo a ventilação forçada de 1m/s, obtém-se mais fração líquida com 20 módulos dissipadores do que com 10 módulos, contudo se diminuir a velocidade, a situação inverte obtendo resultados melhores, tanto em produção quanto em consumo de energia. Esse detalhe pode ser uma condição de funcionamento, caso seja montado um equipamento, em que este pode trabalhar de acordo com a ventilação do ambiente além da ventilação forçada.

# Conclusão

Simulações foram feitas com diferentes condições, observando a temperatura das aletas do lado frio e a fração de volume d'água condensada. A eficiência da temperatura distribuída na aleta está diretamente relacionada com a umidade do ambiente e a velocidade da ventilação. Com baixa umidade, o ideal é não ter ventilação para que toda a aleta consiga ficar abaixo do ponto de orvalho, enquanto com alta umidade, mesmo com ventilação a 2 m/s toda a extensão da aleta atingiu o ponto de condensação.Todavia, uma maior quantidade de água condensada foi atingida com menor velocidade. A quantidade de módulos peltier também influenciou, podendo ser ajustado ainda mais o fluxo de ar para atingir melhor eficiência energética e produtiva. A umidade impactou diretamente na quantidade de condensado, tanto quanto na potência consumida pelos módulos.

Mais estudos devem ser realizados para compreender melhor a relação entre a umidade relativa e a velocidade da ventilação forçada.

# Referências


1. Fernandes D. Escassez de água pode gerar conflitos no futuro, dizem especialistas [Internet]. BBC. [citado **2019** jan 3]; Diponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2012/03/120316_agua_escassez_df
2. Drinking-water [Internet]. WHO. [citado **2019** jan 2]; Diponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water
3. 2.1 billion people lack safe drinking water at home, more than twice as many lack safe sanitation [Internet]. WHO. [citado **2019** jan 2]; Diponível em: https://www.who.int/news-room/headlines/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation
4. Insights from the Comprehensive Assessment ofWater Management in Agriculture. IWMI [Internet]. **2006** [citado **2019** jan 5];7. Diponível em: https://thewaterproject.org/world_water_week.pdf
5. Hellström B. Potable water extracted from the air report on laboratory experiments. J. Hydrol. [Internet]. **1969** set; 9(1):1–19. Diponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022169469900110
6. Gad H., Hamed A., El-Sharkawy I. Application of a solar desiccant/collector system for water recovery from atmospheric air. Renew. Energy [Internet]. **2001** abr;22(4):541–556. Diponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148100001129
7. Shourideh AH, Bou Ajram W, Lami J Al, Haggag S, Mansouri A. A comprehensive study of an atmospheric water generator using Peltier effect. Therm. Sci. Eng. Prog. [Internet]. **2018**; 6 (February):14–26. Diponível em: https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.02.015
8. Liu S, He W, Hu D, Lv S, Chen D, Wu X, *et al*. Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method. Energy Procedia [Internet]. **2017** dez;142:1609–1614. Diponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187661021736294X

9. Muñoz-García MA, Moreda GP, Raga-Arroyo MP, Marín-González O. Water harvesting for young trees using Peltier modules powered by photovoltaic solar energy. Comput. Electron. Agric. **2013**;93:60–67.

10. Williams DDR. Earth Fact Sheet [Internet]. NASA. 2019 [citado **2019** fev 15]; Diponível em: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html

11. Rocha JC, Rosa AH, Cardoso AA. Introdução à química ambiental. 2o ed. Porto Alegre: Bookman; **2009**.

12. Sarokin D. How to Explain the Process of Condensation [Internet]. [citado **2019** jan 5];Diponível em: https://sciencing.com/explain-process-condensation-children-5124290.html

13. Intramolecular and intermolecular forces [Internet]. Khan Acad. [citado **2019** mar 2];Diponível em: https://www.khanacademy.org/test-prep/mcat/chemical-processes/covalent-bonds/a/intramolecular-and-intermolecular-forces

14. Vitz E, Moore JW, Shorb J, Prat-Resina X, Wendorff T, Hahn A. Enthalpy of Fusion and Enthalpy of Vaporization. **2019**;

15. Lee H. Thermal Design Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells. Hoboken, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC; **2010**.

16. Riffat SB, Ma X. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review. Int. J. Energy Res. **2004** jul;28(9):753–768.

17. Patel J, Patel M, Patel J, Modi H. Improvement In The COP Of Thermoelectric Cooler. Int. Sci. Technol. Res. 5 (5).

18. INCROPERA FP, WITT DP DE, BERGMAN TL, LAVINE AS. Fundamentos de transferência de calor e de massa, tradução da 6 ed. Rio Janeiro, Bras. LTC. **2008;**

19. Khan Academy. Cohesion and adhesion of water [Internet]. [citado **2019** out 2]; Diponível em: https://www.khanacademy.org/science/biology/water-acids-and-bases/cohesion-and-adhesion/a/cohesion-and-adhesion-in-water

20. Cengel YA, Ghajar AJ. Tranferência de Calor e Massa. Amgh Editora; **2009**.

## Igor T. B. Medeiros*, Matheus S. Oliveira & Victor E. N. A. Pericoli

Departamento de Engenharias, Cursos de Engenharia Mecânica e Elétrica. Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: igorthalles@outlook.com

# Análise Comparativa do Desempenho e das Propriedades Mecânicas de Diferentes Materiais Utilizados em Hastes Sulcadoras de Semeadoras de Plantio Direto

Gabriella A. Martins, Mikael H. Morais, Rosemberg F. N. Rodrigues, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Aline A. Monteiro.

O setor agrícola é uma das áreas que mais crescem no Brasil, e como forma de atender à demanda, o cultivo utilizado ocorre por Plantio Direto, com o uso de hastes sulcadoras para abertura dos sulcos. O objetivo deste trabalho é analisar de forma comparativa três materiais utilizados na produção desta ferramenta e determinar o de melhor custo e eficiência mecânica, sendo eles: aço ASTM A36, aço SAE 1045 e aço Quard 450 de alta resistência. Foram realizados quatro ensaios práticos e uma análise de custo. Os ensaios comprovaram que o Quard 450 apresenta melhor performance, alta dureza e tenacidade, sendo também o mais viável economicamente, ficando em segunda posição o ASTM A36.

**Palavras-chave**: *haste sulcadora; desempenho; propriedades mecânicas*.

The agricultural sector is one of the fastest growing areas in Brazil, and as a way to meet the demand the cultivation used occurs by no-tillage, with the use of furrow stems to open the furrows. The objective of this work is to comparatively analyze three materials used in the production of this tool and determine the best cost and mechanical efficiency, namely: ASTM A36 steel, SAE 1045 steel and high strength Quard 450 steel. Four practical tests and one cost analysis were performed. The tests proved that Quard 450 has better performance, high hardness and toughness, being also the most economically viable, being in second position the ASTM A36.

**Keywords:** *furrow stem; performance; mechanical properties.*

# Introdução

O trabalho com o solo, como fonte de geração alimentar, sempre existiu desde os primeiros milênios da história. Com a formação das primeiras sociedades de conjunto familiar, as técnicas de cultivo pararam de ser rudimentar e foram se inovando e diversificando com o tempo, um exemplo está nos registros da agricultura do Egito Antigo, os quais criaram sistema de armazenamento de água, grandes poços, para a distribuição a longa distância principalmente em épocas de estiagem que compreendia a mais de 70% do ano [1,2].

Entretanto, em 2000 a.C., a cultura produzida viabilizava as pequenas regiões, quatro milênios depois a comercialização dos produtos primários se tornou global, o que pede novas técnicas de plantio que acompanhem as vendas junto a alta produção com qualidade. A produção de cana-de-açúcar, produto primário, apresentou nas duas últimas décadas um crescimento exorbitante, sendo alguns dos motivos o alto consumo do açúcar, produto secundário, e o foco no aumento do uso do etanol pelos países norte-americanos, europeus e Japão. Segundo a International Sugar Organization (ISO) entre os anos de 2011 e 2013, somente nos Estados Unidos, houve um crescimento no consumo médio per capita de açúcar de 1,5 Kg, ficando atrás somente da Europa com um aumento de 2Kg por pessoa, em outro levantamento o IBGE apontou que, somente em 2019, o Brasil irá fornecer ao mercado 688,6 milhões de toneladas de cana, revelando que para esta demanda haverá crescimento da safra nas lavouras[3-5].

Os grandes latifúndios visam à alta produtividade, diminuição dos custos com maquinários e operações com um maior aproveitamento da água e do solo. Contudo, antes da colheita há o preparo da safra e para uma correta germinação, é necessário conhecer os vários fatores internos e externos que influenciam o processo, sendo o principal deles a água. O abastecimento de água ajuda na reidratação dos tecidos o que garante o fornecimento dos nutrientes, desta forma é extremamente importante o contato das raízes com o maior volume de solo, gerando uma cultura radicular. Para que as raízes atinjam o volume de solo que garanta sobrevivência das plântulas é necessário que durante o processo da formação dos sulcos, esses atinjam profundidades que contribuam com retenção dos nutrientes garantindo a germinação e diminuindo falhas nas linhas de plantio[1,6].

Com a alta demanda, os grandes produtores de cereais, grãos e canaviais têm em vista tecnologias que contribuam com um processo de baixo custo e alta qualidade assim as semeadoras adubadoras foram desenvolvidas para o cultivo conservacionista, este se baseia em um sistema no qual há mínima mobilização do solo antes da semeadura, desta forma garante mínimos custos de operação sem a utilização de grades, arados, enxadas rotativas e maquinários para movimentação. Além da diminuição do custo final, diferindo da agricultura convencional, a mínima mobilização diminui futuros transtornos ambientais devido ao uso de equipamentos e maquinário pesado, pois como não há tamanhas alterações tornasse possível diminuir as erosões e os casos de compactação subsuperficial, permitindo o maior aproveitamento da umidade do solo. Este tipo de cultura, chamada de Plantio Direto, chegou ao Brasil somente em meados da década de 70, sendo bastante utilizada principalmente devido a diminuição do tempo gasto com o preparo do solo, a mecanização e o controle do processo[1,7].

As primeiras máquinas semeadoras adubadoras são formadas por discos de corte para abertura dos sulcos, por pares de sulcadores em formato de discos que possuem a função de fertilizar o solo, para que posteriores discos depositem as sementes nos sulcos, o que garante múltiplas funções em um só maquinário. Este modelo de "cultivo conjugado" traz a versatilidade para o campo combinada com a economia, entretanto os sulcadores em formato de disco não garantem penetrações profundas em solos compactados e de baixa umidade, alarmando futuros problemas nas linhas. Com o foco de minimizar os transtornos as semeadoras foram equipadas por hastes sulcadoras, ferramentas em formato de "facas" semiparabólicas, que resistem a maiores esforços de tração, atingindo profundidades de 12-15 cm nos rasgos do solo[1].

O desempenho dos sulcadores depende de diversos fatores dentre eles o tipo de solo trabalhado, velocidade do maquinário, condições adversas de projeto (como geométrica das hastes e ponteiras, material de fabricação das duas ferramentas). Vários fatores influenciam na vida útil destas ferramentas, na literatura há registros de que dentro das usinas sucroalcooleiras as hastes sulcadoras são um dos equipamentos que mais sofrem paradas não programadas, por não poderem ser substituídas durante a entressafra. As ponteiras podem ser recuperadas através da soldagem com eletrodo revestido, contudo as hastes sofrem pelo desgaste abrasivo causado nas ponteiras durante o processo, pois com a alteração da geometria das ponteiras ocorre sobrecarga de tração. Materiais de menor ductilidade não resistem e acabam fraturando em meio ao processo, entretendo baixa dureza também compromete o desempenho causando encargos e paradas corretivas[1,5].

As tecnologias e inovações na área agrária tem se alavancado, principalmente para atender ao agricultor cada vez mais atualizado, que busca acatar o processo a baixo custo. Quebra das hastes sulcadoras precocemente afeta grandes lavouras principalmente na área econômica, por isso seu projeto deve ser analisado criteriosamente. O material mais utilizado para produção deste modelo de haste é o aço-carbono comercial SAE 1045, seguindo as especificações da norma SAE J403, ou com procedimentos térmicos adicionais como têmpera, revenido ou cementação. O aço, em seu conceito básico, condiz a uma liga composta da união de dois componentes matriz, o ferro e o carbono, sendo que em seu processo são aderidos elementos secundários. Com base na literatura, devido à complexidade do material, eles podem ser classificados de diversas formas, seja pela composição, ou o procedimento de acabamento ou formato do produto já terminado, neste trabalho foi considerado para estudo a primeira classificação, sendo esta, dividida em duas categorias: a primeira, constituídas por aço-carbono são os que contêm de 0,008 a 2,11% de carbono em sua composição, a segunda, constituídas por aço-liga que são aços-carbono especiais, os quais apresentam vários elementos de liga ou elementos residuais a sua composição, sendo o teor acima do padrão, desconsiderando os elementos adicionais para melhora da usinabilidade. Os aços-carbono são subdivididos em[8,9]:

- A. Aços de baixo carbono, teor inferior à 0,2%;
- B. Aços de médio carbono, teor entre 0,2 e 0,5%;
- C. Aços de alto carbono, teor acima de 0,5%.

Novos aços vêm sendo desenvolvidos para atuar com estas ferramentas e permitir maior variabilidade de solos e desempenho, contribuindo com a vida útil da ferramenta. Para tal exemplo há o aço Quard, por que está classificado como açomartensítico de alta resistência ao impacto e dureza, o que permite o uso em ambientes abrasivos e garante versatilidade à sua aplicação, devido a estes fatores ele é usualmente utilizado nos setores agrícola e de mineração. Outros materiais também apresentam a mesma porcentagem de carbono que o Quard, entretanto não apresenta as mesmas propriedades mecânicas, para tal exemplo há o aço ASTM A-36, o mesmo em sua forma base garante média resistência e baixa dureza, não sendo recomendado para trabalhos que exerçam desgaste excessivo, sendo assim utilizados para perfis estruturais, seu uso para mineração somente é viável com tratamentos superficiais no aço[10-12].

As propriedades mecânicas são diretamente ligadas à estrutura metalúrgica do aço, à adição de carbono na composição aumenta relativamente à dureza do material analisado, sendo de conhecimento que essa afeta pontualmente a resistência a erosão. Entretanto tal característica nesta ferramenta agrega substancial importância a sua função, pois a dureza é inversamente proporcional a tensão limite de escoamento, a qual garante resistência a tração sem romper[13,14].

Viabilizando um maior desempenho operacional, este trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente as propriedades mecânicas e desempenho em campo de três diferentes materiais sendo eles aço ASTM A36, aço SAE 1045 e aço QUARD 450, com têmpera e revenimentodo processo de formação, que podem ser utilizados em hastes sulcadoras de semeadoras de plantio direto.

# Metodologia

## MATERIAIS

Para início dos testes, a usina sucroalcooleira Jalles Machado forneceu amostras de hastes sulcadoras, todas com mesma geometria e dimensão como demonstrada no modelo da Figura 1, na qual a diferença está na constituição do material, grupos compostos por ferramentas: de aço ASTM A36, de aço SAE 1045 e de aço Quard 450.

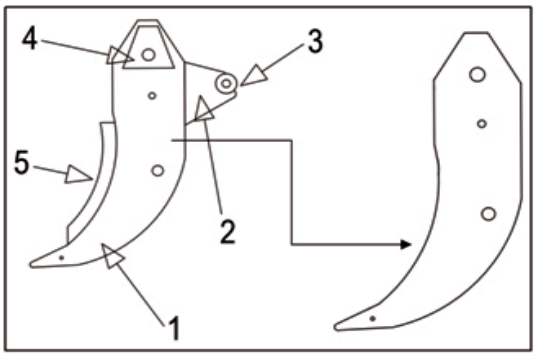



**Figura 1:** À esquerda, componentes do conjunto, à direita, haste sulcadora estudada (1). **Fonte:**[15]

Todas foram instaladas no maquinário em pares, como demonstrado na Figura 2.

**Figura 2:** Hastes instaladas em Semeadora Adubadora. **Fonte:** Autor

Dentre os fatores que influenciam as propriedades das ligas ferrosas, a composição química é considerada o fator principal, pois esta contribui para alterar a estrutura microscópica afetando as características mecânicas do material[9,13]. Abaixo, na Tabela 1, é possível verificar a porcentagem dos principais elementos de liga presentes em materiais ferrosos, considerando as informações contidas nos relatórios técnicos de manufatura[16,18]:

**Tabela 1:** Composição química dos materiais analisados. **Fonte:** Autor

| COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% Peso) | Aço ASTM A36 | Aço SAE 1045 | Aço QUARD 450 |
|---|---|---|---|
| Mn | 0,66 | 0,72 | 1,205 |
| P | 0,022 | 0,018 | 0,017 |
| S | 0,009 | 0,006 | 0,001 |
| C | 0,15 | 0,49 | 0,2 |
| Si | 0,23 | 0,172 | 0,284 |
| Al | 0,05 | 0,027 | 0,034 |
| Cu | 0,01 | 0,007 | 0,015 |
| Nb | 0,001 | - | 0,014 |
| Ni | 0,01 | 0,011 | 0,012 |
| Cr | 0,02 | 0,02 | 0,078 |
| V | 0,001 | 0,001 | 0,002 |
| Mo | - | 0,003 | 0,002 |
| Ti | 0,001 | 0,001 | 0,019 |
| N | 0,0041 | 0,0064 | 0,0027 |
| B | 0,0001 | - | 0,0019 |

Segundo a norma 6006, da ABNT, para que o aço seja considerado aço-liga, esse deve apresentar um aporte de outros compósitos superior a 6%, incluindo na soma elementos como carbono, silício, enxofre, fósforo e manganês, contudo caso os elementos alumínio, manganês e silício sejam superior a 0,1%, 1,65 e 0,6% respectivamente, já serão considerados ligados. O aço ASTM A36 apresenta baixos teores de elementos de liga e de carbono em sua composição (% em peso), o que faz dele um aço de baixo carbono, o aço SAE 1045 possui uma maior concentração de carbono, 0,45% C, mas não o suficiente para ser classificado como aço de alto carbono e o aço Quard450 apresenta aproximadamente a mesma porcentagem de carbono do aço ASTM A36 em sua composição, 0,2% C, com maior concentração de manganês. Entretanto este não

segue os parâmetros da AISI (American Iron and Steel Institute) e SAE (Society of Automotive Engineers), desta forma não é classificado como aço-carbono[9].

# Métodos

Para cunho de análise comparativa, dividiu-se os métodos em duas categorias: os ensaios práticos, divididos em quatro etapas, e a análise do custo-benefício de cada material, por meio do desempenho. Para o ensaio prático, a primeira etapa foi a avaliação do desempenho das ferramentas em campo. Para critério avaliativo, foi realizado o registro do tempo de funcionamento em campo, por meio de horímetro, até o fim de sua eficiência, seja ele por meio de fratura ou alteração da geometria. Todas foram colocadas em datas específicas, formando pares, somando três maquinários no total. Os tipos de solos trabalhados foram: o latossolo, solo presente em maior parte do território brasileiro por ser encontrado em regiões equatoriais e tropicais, sua composição é predominante de argila com presença de óxido de ferro, silício e alumínio, sendo característico por sua acidez, é classificado como fortemente à bem drenado, apresenta baixa resistência ao arado; o cambissolo, apresenta significativa presença de fragmentos rochosos, desta forma sua composição base consiste em material mineral e, devido à heterogeneidade de sua origem, apresenta variâncias como comportamento de alta ou baixa drenagem e profundidade, a sua pedregosidade na superfície e no centro apresenta alta resistência ao arado, entretanto, devido ao alto teor de minerais primários, é um solo bastante utilizado para cultivo, e o plintossolo, são típicos de zonas quentes e úmidas, constituídos por material mineral e são fortemente ácidos, apresentam baixa capacidade de drenagem gerando períodos de excesso de umidade, desta forma oferece média resistência ao arado[19].

Após a avaliação do desempenho, as ferramentas foram recolhidas para posteriores testes e avaliação das propriedades mecânicas e subsequentes etapas. A segunda etapa baseia se na preparação e análise microestrutural dos três materiais. Estes foram preparados em formatos de barras com face retangular (10X12 mm²) utilizando uma máquina serra de fita horizontal da marca Ronemak modelo SR-250 VF. Posteriormente, as amostras passaram por uma embutidora metalográfica utilizando baquelite, processo de 16 minutos realizado por pressão hidráulica à temperatura de 150 °C. Todas as amostras, após embutidas, passaram pelo processo de lixamento e polimento padrão com sequência de seis lixas de granulometrias distintas (240, 320, 400, 600, 1200 e 2500) e alumina de 1 µm respectivamente. As amostras foram lavadas com álcool etílico e secados em sentido horizontal a face20. Em seguida a tais processos as amostras sofreram ataque químico por Nital 2%, passo importante, pois a escolha do ataque e o intervalo da amostra com o reagente são cruciais para cada tipo de material[21], na sequência foram avaliadas no microscópio óptico.

A terceira etapa consistiu na avaliação da dureza dos materiais. Esta foi realizada através do ensaio Rockwell, onde foram fabricadas três amostras de cada material, todas retiradas de cada uma das regiões indicadas da Figura 3, o teste foi realizado próximo a superfície (em azul) e núcleo (em vermelho) de cada amostra como indicado na Figura 4, desta forma os possíveis processos de tratamento térmico do processo de produção e as propriedades do material base foram indicados nos resultados.

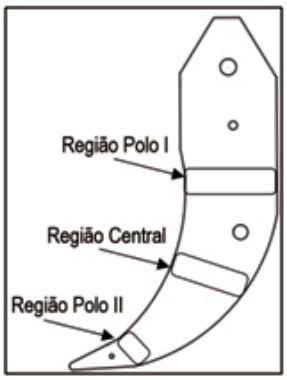



**Figura 3:** Regiões de retirada das amostras para ensaio de dureza e impacto Charpy-V. **Fonte:** Autor

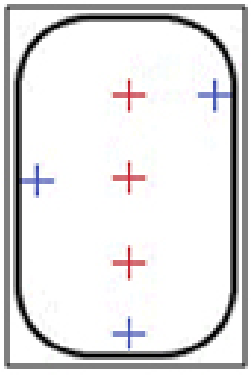


**Figura 4:** Regiões do ensaio de dureza. **Fonte:** Autor

Os ensaios foram realizados de duas formas com mesmo equipamento, um durômetro de bancada analógico da marca Digimess, ref. 400.005. Para os aços ASTM A36 e SAE 1045 foi usado escala de dureza Rockwell B, carga maior de 100 kgf, penetrador de esfera de aço temperado com diâmetro de 1/16", sendo a leitura realizada na escala vermelha do relógio e o valor da pré-carga de 10 kgf, para garantir o contato entre o penetrador e o material, para o aço Quard 450, por ser de alta resistência, foi usado escala de dureza Rockwell C, carga maior de 150 kgf, penetrador cônico de diamante com 120° de conicidade, sendo a leitura realizada na escala preta do relógio e o valor da pré-carga de 10 kgf. Após os testes os resultados foram convertidos para escala Brinell, para que fosse realizado uma melhor comparação com o material de maior dureza. Foram realizados seis ensaios em cada amostra, três para superfície e três para o núcleo, com distanciamento superior a 3 mm, totalizando dezoito testes para cada material, considerando como valor final a média dos valores do centro e superfície[22].

A quarta etapa analisou a resistência ao impacto de cada material, sendo para isso realizadoos ensaios de impacto Charpy. Os corpos de prova foram usinados em amostras conforme a norma ASTM E23 – 07a, representado na Figura 5, todos segundo a geometria e dimensionamento tipo A (entalhe em V)[23].

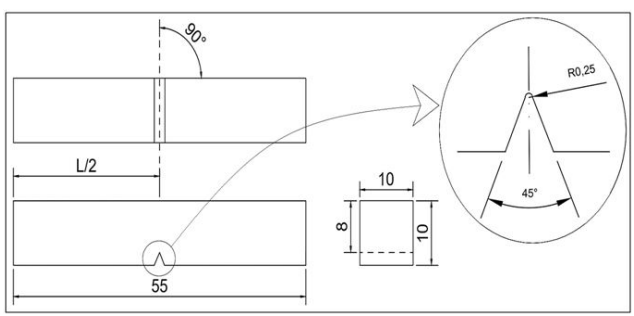



**Figura 5:** Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto Charpy (em mm). **Fonte:** referência [23].

No total foram fabricadas seis amostras de cada material, dois para a região centrale dois para cada um dos polos (Polo I e II), conforme Figuras 3 e 6, para assim verificar se não há heterogeneidade no material e gerar valores intrínsecos.

As amostras foram todas retiradas sentido horizontal da região, como indicado na Figura 6.

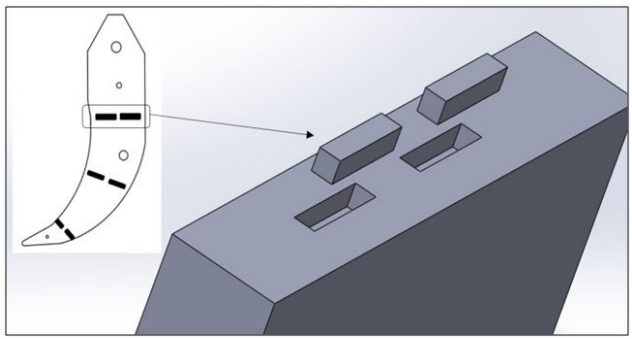


**Figura 6:** Sentido de retirada das amostras para Charpy-V. **Fonte:** Autor

Para avaliação final dos materiais, baseou-se na relação custo benefício (um modelo parecido ao Payback, tempo de retorno do investimento inicial[24]) entre as três ferramentas. A diferença do estudo realizado ao modelo citado (Payback), está em que esse não baseou se no retorno financeiro de uma para outra em um mesmo período de atuação, mas sim no valor inicial aplicado para cada material, avaliando qual é mais econômico.Também foi considerado qual gerou menor e maior quantidade de resíduos e, qual solicita maior demanda de equipes para as paradas.

# Resultados e Discussão

### ENSAIOS PRÁTICOS

O teste em campo permitiu identificar que o melhor material para tal funcionalidade é o Quard 450, considerando que não sofreu fratura e nem perda da eficiência até o recolhimento dos dados. A Tabela 2 aborda o tempo que cada amostra suportou até a perda de sua função e o gráfico 1 apresenta a média das horas registradas para cada material.

**Tabela 2:** Desempenho de cada amostra pelo horímetro. **Fonte:** Autor

| Material da ferramenta | Tempo (h) | |
|---|---|---|
| | Amostra 1 | Amostra 2 |
| Aço ASTM A36 | 73,7 | * |
| Aço SAE 1045 | 42,9 | 62 |
| Aço QUARD 450 | 321,7 | 437,6 |

* Não foi possível o teste com a segunda amostra

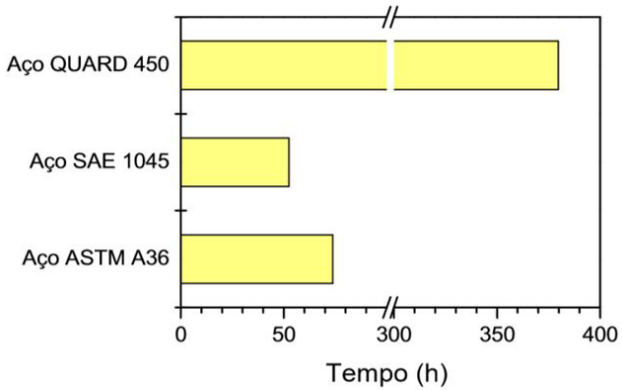



**Gráfico 1:** Desempenho médio de cada material pelo horímetro. **Fonte:** Autor

Considerando a eficiência apresentada por cada material em horas no Gráfico 1, os aços SAE 1045 e A36 supriram 14% e19%, respectivamente, do resultado apresentado pelo material Quard 450, desta maneira caso viesse a escolher o material baseado em sua eficiência somente, a melhor ferramenta é a produzida por Quard 450.

A presença de carbono, substância que contribui para o aumento da dureza e resistência ao desgaste, foi analisada por meio da microscopia ótica. Na Figura 7, realizada no núcleo do aço ASTM A36 com ampliação de 200X, devido à porcentagem de carbono é possível notar a presença da ferrita+perlita, compatível com o diagrama ferro-carbono considerando um componente com no máximo 0,25% de C. Desta forma, são aços mais dúcteis, com menor presença de perlita (região escura) e menor dureza[25,26]. Na Figura 8, é perceptível a maior concentração de carbono próximo a superfície, como tal material não passou por nenhum tratamento termoquímico, esta reação se deve a um processo de encruamento durante sua fabricação.

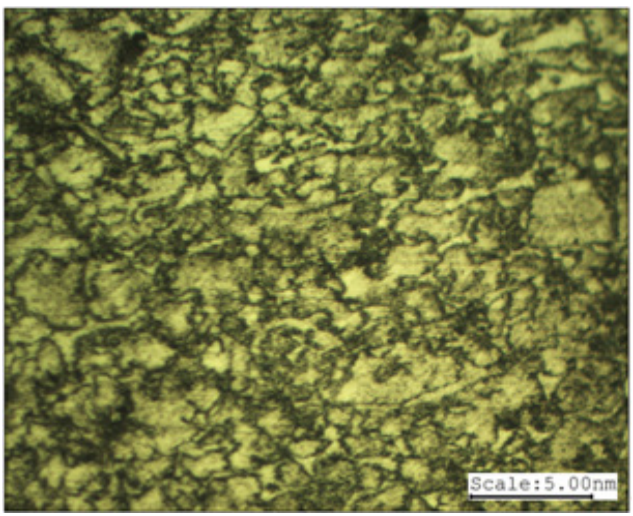



**Figura 7:** Microscopia do núcleo do aço ASTM A36 – Ampliação 200X. **Fonte:** Autor

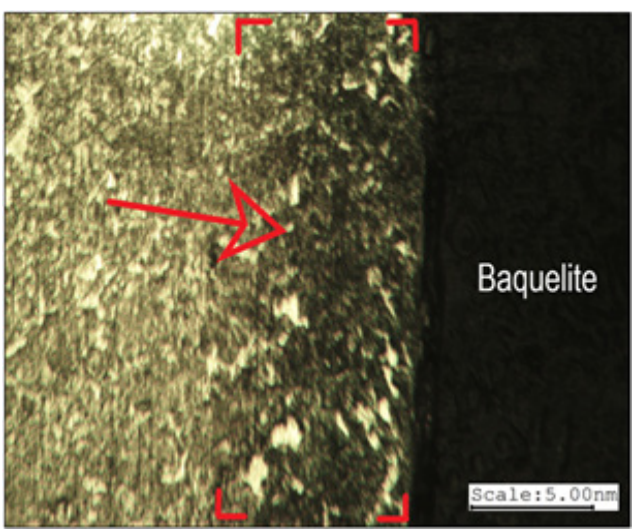



**Figura 8:** Microscopia da superfície do aço ASTM A36 – Ampliação 200X. **Fonte:** Autor

O aço SAE 1045 é indicado nas Figuras 9 e 10, neste é possível notar a maior concentração de carbono em toda região o que justifica o fato de sua maior dureza, quando comparado a região do núcleo do ASTM A36.

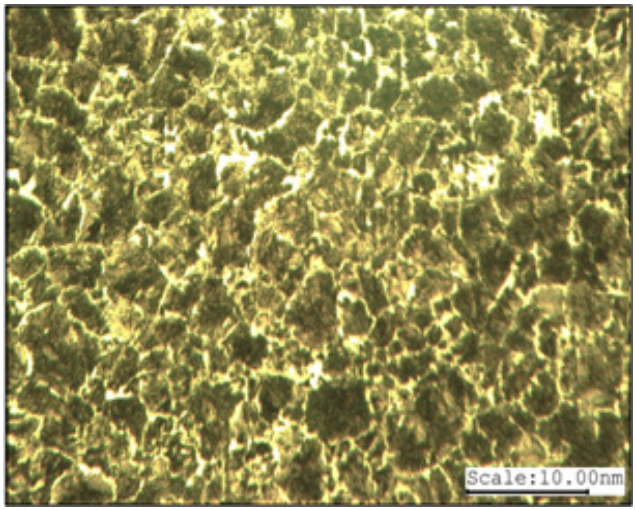



**Figura 9:** Microscopia do aço SAE 1045 – Ampliação 100. **Fonte:** Autor

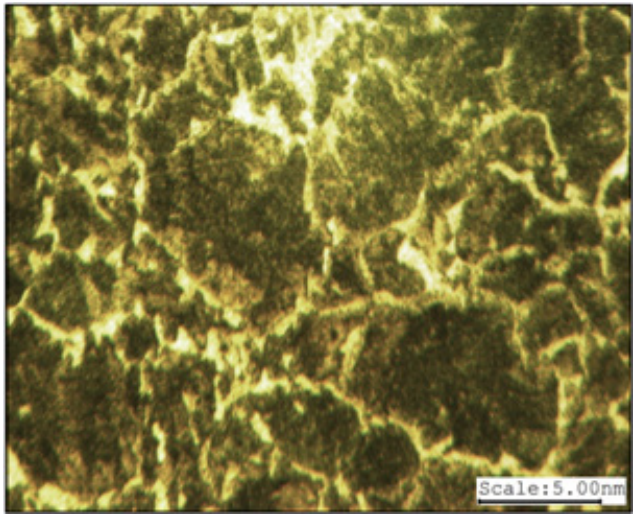



**Figura 10:** Microscopia do aço SAE 1045 – Ampliação 200X. **Fonte:** Autor

O mesmo apresentou semelhança à granulação apresentada na literatura para o aço SAE 1045 sem tratamento algum, nota-se também a ausência de martensita, demonstrando que este não sofreu tratamento térmico de têmpera. Observa-se portanto a presença de ferrita (tonalidades claras) e perlita (tonalidades escuras)[25,27]. Por meio das Figuras 7 e 10, de mesma ampliação, é notável a maior concentração de carbono no SAE 1045.

O Quard 450 apresentou baixa concentração de carbono em sua composição, entretanto, passou pelos processos de têmpera e posterior revenimento, formando a fase martensita, para um melhor reconhecimento da fase foi realizado a microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentada na Figura 11, que destaca-se a fase martensítica de aço temperado presente na literatura[9,28].

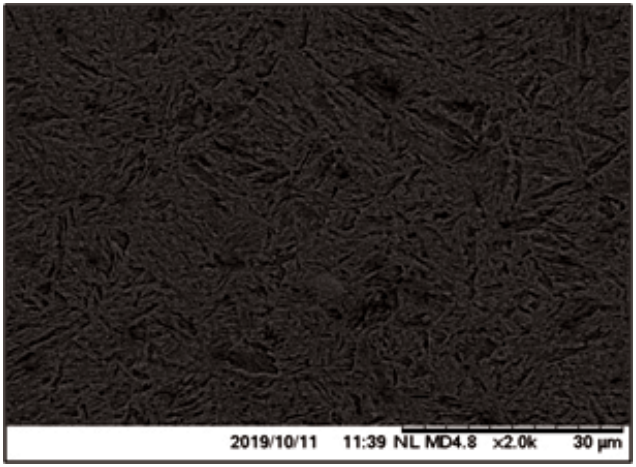



**Figura 11:** Microscopia eletrônica de varredura do aço Quard 450 – Ampliação 2.0k X. **Fonte:** Autor

Como indicado pelo fabricante e na literatura tal microestrutura é martensítica, para obter este tipo de estrutura interna uma das formas de processo é através do resfriamento rápido, o que justifica o processo de têmpera. É natural dos materiais martensíticos apresentarem alta dureza e fragilidade, gerando risco de quebra, exceto quando apresenta baixo teor de carbono, justificado

no relatório de manufatura (0,2% C) deste material. E se tratando de um aço liga especial, o mesmo permite a obtenção de tal microestrutura. Contudo, para que a dureza não afete a tenacidade, estes materiais passam pelo processo de revenimento à temperatura abaixo da linha de transformação, como é abordado por seu fabricante e comprovado por seu alto desempenho, através da resistência ao impacto e dureza [9,16,21,28].

Considerando a fase presente em sua microscopia e comparando à literatura, os materiais que apresentam estrutura martensítica Fe-C, com baixo teor de carbono como o Quard 450, apresentam elevada resistência mecânica devido à alta presença de discordâncias e ao endurecimento através de solução sólida intersticial sendo sua vantagem em comparação aos demais, bem como é comprovado na Tabela 3 por meio da dureza[10,21,29,30].

**Tabela 3:** Dureza do Quard 450. **Fonte:** Autor

| Aço Quard 450 | Aferições (HRC) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ponto 1 | Ponto 2 | Ponto 3 | Ponto 4 | Ponto 5 | Ponto 6 |
| Amostra 01 | 49 | 42 | 53 | 43 | 55 | 44 |
| Amostra 02 | 49 | 45 | 55 | 38 | 55 | 48 |
| Amostra 03 | 39 | 46 | 44 | 47 | 55 | 47 |

Em comparação ao Quard, os demais materiais foram testados em escala HRB, segue na Tabela 4.

**Tabela 4:** Dureza do ASTM A36 e SAE 1045. **Fonte:** Autor

| Aferições (HRB) | Aço ASTM A36 | | Aço SAE 1045 | |
|---|---|---|---|---|
| | Núcleo | Superfície | Núcleo | Superfície |
| Polo I - Superior | 88 | 92 | 91 | 95 |
| | 84 | 97 | 92 | 94 |
| | 89 | 93 | 92 | 95 |
| Centro - Meio | 84 | 82 | 84 | 95 |
| | 89 | 85 | 91 | 92 |
| | 86 | 93 | 92 | 92 |
| Polo II - Inferior | 88 | 93 | 92 | 94 |
| | 89 | 93 | 95 | 96 |
| | 87 | 93 | 91 | 93 |

Devido à baixa disponibilidade de material para o Quard as amostras, como representado na Tabela 3, foram mensuradas em pontos variados sem diferenciar superfície e centro. Observa-se que dentre os três materiais, o Quard 450 apresentou maior dureza, desta forma compreende-se que somente a concentração de carbono não garante sozinha a eficiência deste componente, dependendo de outros elementos e dos tratamentos térmicos o qual sofreu, devido o aço ASTM A36 ficou abaixo da faixa de performance do Quard 450, como indicado em escala Brinell no Gráfico 2. Outra relevância, está em que o material SAE 1045, ainda com seu maior percentual de carbono diante dos demais, Tabela 1, permaneceu na mesma faixa que a superfície do ASTM 36, este fato pode ser justificado por algum processo de conformação sofrida pela ferramenta durante o uso ou fabricação ocasionando uma recristalização dinâmica, como apresentado na Figura 8, sendo que tal região pode apresentar efeito de aumento da resistência mecânica e dureza, induzindo uma resistência ao desgaste superficial com núcleo tenaz, representado no Gráfico 2[1,25].

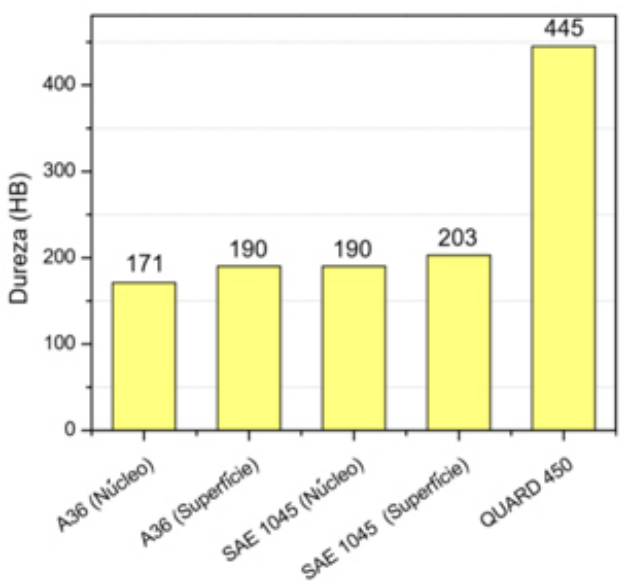



**Gráfico 2:** Dureza média dos materiais – Escala Brinell (HB). **Fonte:** Autor

O A36 permaneceu na mesma faixa de dureza do aço SAE 1020, devido à quantidade de carbono. O SAE 1045 apresentou-se na mesma faixa indicada na literatura, entre 179 – 229 HB 9. A dureza do Quard correspondeu ao informado pelo fabricante que garantiu entre 420 – 480 HBW, de acordo com EN ISO 6506-1[28].

A resistência ao impacto, descrita por tenacidade, possibilitou melhor compreender o desempenho dos três materiais, principalmente, quando os mesmos são submetidos à solo com maior concentração de rochas, o cambissolo.Esta foi mensurada em joules sendo representada na Tabela 5 a tenacidade do A36 e 1045.

**Tabela 5:** Tenacidade do ASTM A36 e SAE 1045. **Fonte:** Autor

| Aferições (J) | Aço ASTM A36 | Aço SAE 1045 |
|---|---|---|
| Polo I - Superior | 18 | 7,5 |
| | 23,5 | 16 |
| Centro - Meio | 16 | 11,5 |
| | 22 | 15 |
| Polo II - Inferior | 15 | 14,5 |
| | 19 | 12 |

As amostras do A36 e 1045 foram recolhidas das mesmas regiões da ferramenta como do ensaio de dureza, contudo para analisar o Quard os dados foram obtidos do fabricante e comparados por meio da média dos demais no Gráfico 3.

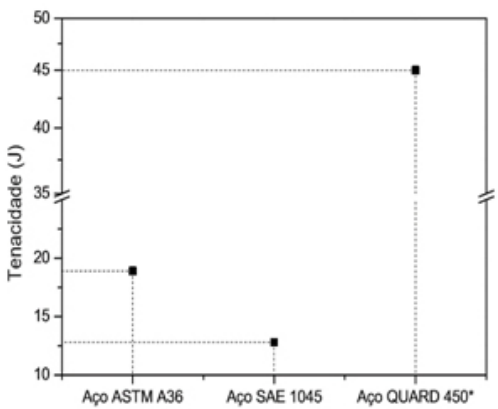



**Gráfico 3:** Tenacidade média dos materiais – (Joule). **Fonte:** Autor[28]

É possível verificar que o aumento da dureza do SAE 1045 em relação ao ASTM A36 fez com que perdesse gradativamente sua resistência ao impacto, justificando sua quebra precoce. Como abordado na literatura, sua maior concentração de carbono permitiu resistir ao desgaste, este fato somente foi possível no A36 devido à camada superficial gerada do encruamento que elevou sua dureza à mesma faixa unitária do núcleo do SAE 1045. Desta forma o segundo material permaneceu tenaz em seu interior, mas com uma camada dura capaz de diminuir o risco à quebra[13,21].

Quanto ao Quard 450, este apresentou a mais elevada dureza, em resultado de sua estrutura martensita gerada do processo de têmpera, e alta tenacidade, advindo do processo de revenido que aliviou as tensões internas e originou um material dúctil. Estes fatores foram determinantes para que apresentasse o melhor desempenho confrontado aos demais[21].

Como a ductilidade representa o grau de deformação plástica (visível) que o material sofre antes da ocorrência de sua ruptura, é possível avaliar através da fratura em qual categoria o material é classificado. Considerando como categorização geral dois tipos de fratura, tipo frágil, aquele material o que sofre mínima ou nenhuma deformação plástica antes da ruptura, e tipo dúctil, o que exibe uma considerável deformação plástica antes de sofrer ruptura, segue Figura 12 macroscópicas referentes as fraturas do aço ASTM A36 e SAE 1045[21,25].

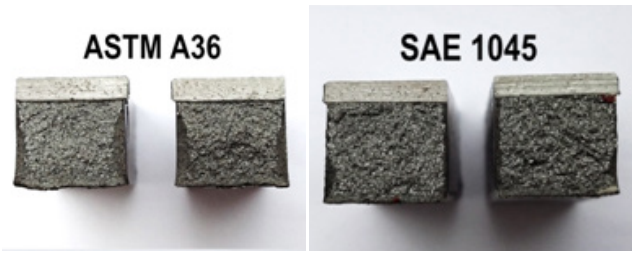



**Figura 12:** Fraturas do Polo I. **Fonte:** Autor

Analisando visualmente os dois materiais é perceptível que o A36 apresentou fratura mista (entre frágil e dúctil) devido às laterais abauladas em sua amostra, enquanto o SAE 1045 apresentou rápida propagação de fissuras, o que indica que a fratura ocorreu em planos cristalográficos característicos, ou planos de clivagem, o que indica ser frágil[21].

Meditando que para um material ser mais tenaz ele deve apresentar tanto resistência como ductilidade, os dados obtidos com as análises do A36 e SAE 1045 correspondem com o descrito na literatura, pois o primeiro apresentou maior tenacidade e ductilidade, respectivamente o segundo apresentou baixa tenacidade e fratura correspondente a material frágil[25].

## CUSTO-BENEFÍCIO

O custo-benefício desenvolvido foi elaborado nos fatores justificáveis para a escolha do material, considerando: 1) Custo Total dos Gastos, 2) Geração de Resíduos e 3) Gestão do Processo. Para análise foi considerado o tempo médio em horas abordado no Gráfico 1 e o tempo de parada, para troca da ferramenta, como 1 h, os valores das ferramentas e o valor da hora produtiva foram abordados como variáveis de mercado.

Para analisar as duas variáveis foram considerados: *Valor da ferramenta* = $x$, ponderando a de menor custo no cenário atual como a A36, os valores não foram abordados, mas acrescidos de estimativa para as demais, e *Valor da hora produtiva* = $y$, a qual será avaliada pelo custo gerado da quantidade de paradas ocorridas. Para melhor analisar a contagem de paradas sucedidas dentro de um mesmo intervalo de tempo, foi baseado no período do material com maior tempo de atuação, sendo este o Quard 450 com 379,65 h (média) de trabalho. O total de unidades gastas abrange desde a primeira montagem até a última parada sucedida, considerando como paradas somente números inteiros (falhas realmente registradas), sendo somado para a criação da equação geral indicada na Tabela 6.

**Tabela 6:** Avaliação do custo total. **Fonte:** Autor

| Material da ferramenta | Custo de mercado | Quant. de paradas | Custo c/ paradas | Total de unid. | CUSTO TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|
| Aço ASTM A36 | $x$ | 5,15 | $5y$ | 06 | $x * 6 + 5y$ |
| Aço SAE 1045 | $1{,}02x$ | 7,24 | $7y$ | 08 | $1{,}02x * 8 + 7y$ |
| Aço QUARD 450 | $2{,}89x$ | 1 | $y$ | 02 | $2{,}89x * 2 + y$ |

Nota-se que o custo final realmente é dependente do valor de venda comercial da ferramenta, representado por $x$, que varia com o mercado, e pelo custo da hora produtiva afetada pelas manutenções corretivas, representado por $y$, a qual varia de tipo de safra e estação. Sem estes dois valores não há possibilidade de avaliação, desta forma foram recolhidos dados de mercado, inseridos nas equações e avaliado os resultados. Acolhendo como um investimento de 100% para o material mais caro segue o Gráfico 4, o qual representa quanto cada material necessita do valor de um mesmo investimento.

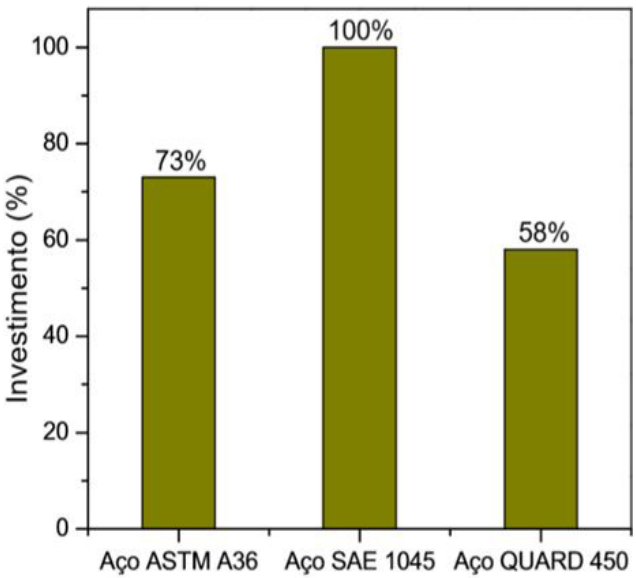



**Gráfico 4:** Investimento (%) para cada material. **Fonte:** Autor

Por meio do gráfico é possível verificar que para um mesmo valor inicial aplicado a cada um dos materiais o aço A36 conservaria 27% do investimento em reserva, diante de 42% do Quard 450. Esta análise demonstra que no cenário atual, justificando o primeiro tópico do Custo Total dos Gastos, a ferramenta mais cara é o aço SAE 1045, sendo o mais viável o Quard 450.

Destacando que o material A36 obteve resultado somente de uma amostra, deve-se considerar que mesmo que a segunda amostra tivesse passado pelo teste de desempenho em campo e seu resultado fosse 1,5 vezes mais que o da primeira, como ocorreu com os outros dois materiais o 1045 e Quard, ainda sim o Quard apresentaria o melhor custo benefício. Já analisando um cenário que o A36 obtivesse na amostra 2 um desempenho 2 vezes maior que o da amostra 1, o que seria irreal pois sua tenacidade é menor que a do Quard o que justifica seu menor desempenho, somente assim seu custo benefício seria melhor diante dos três, conservando 52% do investimento maior, enquanto o Quard somente 42%.

Para o tópico 2) Geração de Resíduos, o material mais favorável quanto a menor quantidade de descarte é o Quard 450, compreendendo que o SAE 1045 apresentou rejeite quatro vezes maior que seu concorrente. Desta maneira, o aço SAE 1045 não supri as duas primeiras exigências solicitadas, sendo descartado de uso.

Concluindo a comparação, tópico 3) Gestão do Processo, para uma melhor administração devem-se garantir os custos da manutenção, o controle de pessoas, gestão de estoque e avaliação de indicadores preventivos/ corretivos. Necessita-se verificar o mais viável entre A36 e Quard, considerando que o segundo já apresentou: 1° menor quantidade de falhas em um mesmo período e 2° menor custo inicial.

O A36, caso tivesse uma segunda amostra com o desempenho 2 vezes maior, como abordado anteriormente, iria trazer um processo de menor custo, mas com exigência de uma equipe de manutenção presente durante um maior tempo para a correção das anomalias, diminuindo o controle de pessoas para relocação em outras atividades, aumentando o estoque devido à demanda constante e criando foco nos indicadores corretivos. Entretanto, considerando um caso real em que a amostra 2 apresenta um desempenho 1,5 vezes maior que a primeira, o material A36 além de apresentar maior estoque reserva para manutenção que o Quard, demandará mais equipe para as correções, irá gerar mais resíduos e terá um custo maior. Desta forma, por meio da terceira análise, o melhor material para tal ferramenta é o Quard 450, com baixo custo, menor estoque, menos resíduos e maior confiabilidade solicitando uma equipe menos presente[31,32].

# Conclusão

Fundamentando que o foco do trabalho está em avaliar o desempenho dos materiais para tal ferramenta, o que melhor reagiu ao trabalho e como esperado, foi o Quard 450, por ser de alta resistência, apresentou o melhor desempenho diante dos demais, garantindo mais de 6 vezes as horas trabalhadas do SAE 1045, sobressaindo tanto em dureza como tenacidade.

Por meio da análise microscópica foi possível analisar como a estrutura interna altera significantemente as propriedades mecânicas, e como tal revela os tipos de processos no qual o material passou.Com a análise do ASTM A36, foi possível observar a baixa presença de perlita, justificando a alta tenacidade e baixa dureza do núcleo. Esta observação é crucial, pois mostra a diferença do A36 para o SAE 1045, justificando como o primeiro resistiu mais tempo que o segundo, pois mesmo o segundo apresentando maior dureza, seu núcleo expôs desvantagem devido a dureza ser inversamente proporcional a ductilidade, levando à ruptura.

Os ensaios de dureza, tenacidade e estudo da ductilidade vieram a completar a análise comparativa do desempenho de cada ferramenta em campo e comprovar como a microscopia está interligada diretamente às propriedades de cada. Como esperado, o material mais resistente foi o Quard 450, em segundo plano o A36, que combinou um núcleo macio e uma superfície dura, sendo possível notar a camada de encruamento próxima a sua superfície, o SAE 1045 destacou pela alta dureza e fragilidade. Esta

análise comprova que para esta ferramenta o material deve ser composto pela combinação de alta dureza e alta ductilidade, resistindo à abrasão devido o contato com o solo e ao impacto devido a composição.

Por fim, analisando os materiais pela viabilidade, considerando os gastos quanto a manutenção e aos insumos, os três variaram dependendoda demanda do mercado financeiro. Entretantoo que sobressaiu em economia, menor descarte e gestão do processo foi o Quard 450, o de melhor desempenho e mais viável para uso. O SAE 1045 não apresentou vantagem em nenhuma das categorias e o A36 somente poderia ser viável em casos esporádico, no qual sua segunda amostra apresentasse o desempenho 2 vezes maior que a primeira, o que não ocorreu com os outros dois materiais.

# Referências


1. Santo, A. C. E. Desgaste de Ponteiras de Hastes Sulcadoras de Semeadoras de Plantio Direto e sua Influência no Esforço de Tração.168 p. Porto Alegre: Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **2005**.
2. Doberstein, A. W. O Egito Antigo. Porto Alegre: EDIPUCRS. PUC-RS, p. 27–28, **2010**.
3. Brasil deve colher 688,6 milhões de toneladas de cana em **2019**, diz IBGE.O Estado de S. Paulo, disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/brasil-deve-colher-688-6-milhoes-toneladas-cana-2019-ibge-20190509>. Acesso em: 19 maio. **2019**.
4. M.P.; L.A. J.; G.F. O mundo, inundado de açúcar. El País, disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2015/03/24/economia/1427187838_040365.html>. Acesso em: 9 maio. **2019**.
5. Lima, A. C.; Ferraresi, V. A. Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira. Soldagem e Inspeção, v. 14, n. 2, p. 140–150, **2009**.
6. Chattha, M. U.; Ali, A.; Bilal, M. Influence of Planting Techniques on Growth and Yield of Spring Planted Sugarcane (Saccharum Officinarum L .). Pak. J. Agri. Sci., v. 44, n. 3, p. 3–7, **2007**.
7. Filho, N. C. N. *et al*. Propriedades Mecânicas e Características de Desgaste de Ponteiras de Hastes Sulcadoras em Semeadora Adubadora. XLII CONBEA - Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - 04 a 08 de agosto de **2013** - Fortaleza, CE, Brasil, p. 4, **2013**.
8. Rodrigues, L. M. *et al*. Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. CadernosUniFOA, v. 17, p. 89–94, **2007**.
9. ChiaverinI, V. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7.ed.ampl ed. São Paulo: **2015**.
10. Pereira, V. P.; Câmara, M. A. Estudo da Taxa de Desgaste e do Coeficiente de Atrito dos Aços Hardox 450 e Quard 400 Deslizando Contra Aço Rápido por Meio de Ensaios de Pino Sobre Disco.VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - 05 a 07 de dezembro de 2018 - Ponta Grossa, PR, Brasil, **2018**.
11. Allgayer, A. A. Caracterização das Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas de uma Junta de Aço ASTM A36 Soldado pelo Processo de Arco Submerso (SAW) com Diferentes Aportes Térmicos. 72 p. Lajeado: UNIVATES, **2017**.
12. Imianowsky, G. W.; Walendowsky, M. A. Os Principais Aços Carbono Utilizados na Construção Civil.21 p. Brusque: UNIFEBE, **2015**.
13. Colpaert, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.4a Edição ed. São Paulo: Edgard Blucher, **2008**.
14. Levy, A. V. The solid particle erosion behavior of steel as a function of microstructure. Wear, v. 68, n. 3, p. 269–287, **1981**.
15. GSV. Projeto Haste semi-parab. 01008, **2019**.
16. NLMK CLABECQ. CERTIFICAT DE RECEPTION 3 . 1 N° 198743 selon EN 10204 ( 2004 ) / QUARD 450, **2018**.
17. USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. Certificado de Inspeção N° 57056 do SAE-J403-09-1045, **2012**.
18. USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS S.A. Certificado de Inspeção N° 4217644 do ASTM-A36-14, **2018**.
19. Santos, H. G. dos *et al*. Sistema brasileiro de classificação de solos: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2013. 3a Edição, Brasília: **2013**.
20. ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13284: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, **1995**.
21. Smith, W. F.; Hashemi, J. Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais. 5a edição. Porto Alegre: AMGH, **2012**.
22. ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6508-1:2019: Materiais metálicos — Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, **2019**.
23. AMERICAN, A.; STANDARD, N. Norma E23-07a: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken Pennsylvania, **2015**.
24. GITMAN, L. J. Princípios de Administração Financeira. 8ª Edição ed. São Paulo: **2002**.
25. Pandolfo, D. Estudo da Tenacidade ao Impacto de um aço SAE 1020 submetido a Tratamentos Térmicos.98 p. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, **2009**.

26. Callister Jr., W. D.; Rethwisch, D. G. Materials Science and Engineering - An Introduction. São Paulo: **2014**.

27. García, J. D. A.; Martínez, D. L. C. Análisis de la Evolución Microestructural de un Acero AISI/SAE 1045 al ser Sometido a un Tratamiento Isotérmico.18 p. Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **2016**.

28. NLMK. Relatório - Aço de alta resistência ao desgaste QUARD 450, Vol. 02. **2018**.

29. Hernaut, P. *et al*. Development of High-Performance Steel Plates at NLMK Clabecq. The 2nd International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, June, **2018**.

30. Bohórquez, C. A. Influencia del Tratamiento Térmico desde Temperaturas Intercríticas en las Propiedades Mecánicas del Acero SAE 1045. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, v. XXXI, p. 13–16, **2012**.

31. Teles, J. Apostila Gestão de Estoque para Manutenção. ENGETELES – Engenharia de Manutenção Consultoria e Treinamentos.

32. Teles, J. Apostila 10 Maneiras de alcançar a Confiabilidade com custo baixo. ENGETELES – Engenharia de Manutenção Consultoria e Treinamentos.

Gabriella A. Martins*[1], Mikael H. Morais[1], Sérgio M. Brandão[1] & Aline A. Monteiro[2]

[1]Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

[2]Ciências Exatas & Tecnológicas, UEG. BR 153, Km 98, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: gabriella.a.martins@hotmail.com

# Veículos Elétricos e Híbridos: História e Perspectivas para o Brasil

José P. Ferreira & Márcio J. Dias

Este artigo tem como objetivo realizar revisão de literatura sobre a evolução da criação dos veículos elétricos e híbridos. Para tanto, foram realizadas buscas no site https://www.sciencedirect.com/ utilizando as palavras-chave: "Veículos Elétricos; Veículos Híbridos; História dos Veículos Elétricos; Perspectivas para o Brasil". Os resultados obtidos foram que a substituição da frota dos veículos a combustão interna por elétricos e híbridos no mundo, e especialmente no Brasil, é uma alternativa para reduzir impactos ambientais, manter a sustentabilidade do setor automobilístico, colaborar para manter a segurança energética dos países, e é vantajosa a longo prazo devido aos menores custos de condução.

**Palavras-chave**: *veículos elétricos; veículos híbridos; história dos veículos elétricos; perspectivas para o Brasil.*

This article aims to review the literature on the evolution of the creation of electric and hybrid vehicles. For that, searches were carried out on the website https://www.sciencedirect.com/ using the keywords: "Electric Vehicles; Hybrid vehicles; History of Electric Vehicles; Perspectives for Brazil". The results obtained were that the replacement of the internal combustion vehicle fleet by electric and hybrid vehicles in the world, mainly in Brazil, is an alternative to reduce environmental impacts, the sustainability of the automobile sector, collaborate for the maintenance of energy security in Brazil . countries, is advantageous in the long run due to lower driving costs.

**Keywords:** *electric vehicles; hybrid vehicles; history of electric vehicles; perspectives for brazil.*

# Introdução

Contrário ao que muitos acreditam, os veículos elétricos e híbridos não são uma inovação tecnológica recente no mercado automotivo, certamente há avanços tecnológicos importantes nos veículos elétricos atuais como, por exemplo, as baterias de íon de lítio e toda a tecnologia digital presente nos automóveis modernos, mas os conceitos básicos se mantêm, ou seja, não houve mudanças significativas nossistemas dos automóveis elétricos atuais. Automóveis elétricos foram fortes concorrentes dos veículos a combustão interna e nos primórdios de sua história eram mais numerosos que os automóveis convencionais, realidade diferente dos dias atuais, fatos semelhantes serão abordados na evolução histórica dos veículos elétricos[1].

O consumo de petróleo no mundo tem aumentado de forma dominantemente crescente, os grandes países que consomem petróleo são cada vez mais dependentes de fontes exteriores e o setor da economia que mais consome petróleo no mundo é o de transportes, responsável em 2009 por 61,7% do consumo de petróleo e 23% das emissões de $CO_2$ (dióxido de carbono)[2,3].

O setor de transporte é caracterizado por alto consumo de combustíveis fósseis e forte impacto ambiental. A utilização de veículos elétricos, nessa importante área da economia, é uma alternativa para reduzi-los e manter a sustentabilidade do setor automobilístico. Além do benefício de reduzir problemas ambientais e ajudar a manter a segurança energética dos países, a substituição da frota de veículos a combustão interna por elétricos pode ser vantajosa a longo prazo devido aos menores custos anuais de condução, ou seja, os carros elétricos têm custo de manutenção relativamente mais baixo, são econômicos e duráveis. O artigo em questão tem como objetivos fazer uma revisão de literatura a respeito da trajetória dos veículos elétricos ao longo da história de sua evolução, desde a criação até a atualidade e analisar as implicações da introdução de veículos elétricos e híbridos no Brasil[4,5].

Conhecer a história dos veículos elétricos e híbridos é importante para saber em quais situações foram mais valorizados e desvalorizados, entender os pontos fracos e fortes desses automóveis, e assim, entender as maneiras mais eficazes de utilizar esses veículos para o benefício do meio ambiente e da sociedade como um todo, possibilitando compreender sobre as perspectivas para a efetiva consolidação da implantação em larga escala destes automóveis em outros países, como o Brasil.

# Metodologia

Na realização do trabalho em questão, analisaram-se diversas referências, principalmente, artigos em periódicos científicos, livros, teses, dissertações e resumos em congresso, procedentes de fontes nacionais e internacionais, ou seja, a metodologia utilizada foi baseada em revisão bibliográfica, na qual a história dos veículos elétricos e híbridos foi dividida em quatro fases: Início, Ascensão, Queda e Retorno. Assim, foram analisados partedos resultados e discussões, e das perspectivas para o Brasil.

Utilizou-se o site https://www.sciencedirect.com/ para encontrar grande parte do conteúdo presente nas referências desse artigo com as palavras-chave: "Veículos Elétricos; Veículos Híbridos; História dos Veículos Elétricos; Perspectivas para o Brasil", digitadas simultaneamente e gradativamente em diferentes sequências para uma análise mais abrangente dos resultados da pesquisa. Consultou-se a plataforma da SciELO.ORG do site https://www.periodicos.capes.gov.br/, porém os resultados encontrados em fevereiro de 2019 para o tema em questão estavam escassos e não foram utilizados. As estatísticas citadas no artigo são do EIA (Energy Information Administration) de 2009 e 2012, da IEA (*International Energy Agency*) de 2011, 2017 e 2018, e do 2º *Degrees Institute* de 2018.

Para concretizar a revisão de literatura, após examinados e ponderados, os dados considerados pertinentes foram coletados do referencial teórico para consolidar os objetivos propostos, refletindo sobre as conclusões dos diferentes autores e com base nas fontes dos dados estatísticos os gráficos e a tabela foram desenvolvidos.

# A História dos Veículos Elétricos

## INÍCIO

A história dos carros elétricos está intimamente relacionada com a história das baterias. Em 1800, o italiano Alessandro Volta demonstrou que a energia elétrica poderia ser armazenada quimicamente. Com isso, em 1821, o britânico Michael Farraday demonstrou os princípios da geração de motores elétricos ao aplicar a pilha química de Volta como um componente de seus experimentos e em 1831, Farraday apresentou os princípios da indução eletromagnética com a estreita relação entre correntes elétricas e magnetismo, estabelecendo assim a base para os motores elétricos e geradores que são necessários para carros elétricos[6,7,8].

O veículo elétrico existe há mais tempo que o veículo à combustão interna e até o início do século XX, quando as melhorias no motor movido à gasolina o tornaram uma opção atraente, os carros elétricos dominaram o mercado de veículos pessoais. A chegada da bateria e do motor elétrico levou aos primeiros veículos elétricos experimentais no início da década de 1830, todos modelos de pequena escala, como pequenos modelos de carros elétricos desenvolvidos, pelo húngaro Ányos Jedlik em 1828, pelo americano Thomas Davenport por volta de 1834, e pelo professor holandês Sibrandus Stratingh em 1835[9,8].

Desenvolvimentos extensivos em eletroquímica ocorreram no início da década de 1830 e em 1859 o belga Gaston Plante fez uma demonstração inovadora da primeira célula de bateria de chumbo-ácido, o que colaborou para a invenção da bateria de chumbo-ácido geralmente utilizada como uma bateria de partida nos carros de motor de combustão interna da época e também como uma bateria de energia na maioria dos carros elétricos, principalmente, aqueles que foram desenvolvidos a partir do início da década de 1880 na França, EUA e Reino Unido[1,7].

Alguns anos depois, o italiano Antonio Pacinotti, inventou o motor de corrente contínua de "*ring*". O primeiro veículo elétrico (triciclo) que aplica a bateria de chumbo desenvolvida por Planté como fonte de energia foi demonstrado na França por Trouvé em 1881, no mesmo ano, ele demonstrou o primeiro barco elétrico com uma fonte de energia similar. Em 1885, o alemão Karl Benz demonstrou o primeiro motor de combustão interna. Thomas Edison viu grandes oportunidades para carros elétricos e fez esforços substanciais para desenvolver baterias mais eficientes, alguns anos depois em 1901, interessado no potencial dos veículos elétricos, ele desenvolveu a bateria níquel-ferro com capacidade de armazenamento 40% maior por unidade de peso que a bateria de chumbo, porém, com custo de produção significativamente mais elevado. As baterias níquel-zinco e zinco-ar também foram criadas durante o mesmo período. A capacidade de armazenamento precária das baterias já era considerada o ponto fraco dos veículos elétricos[10,1,7].

Duas tecnologias, além das baterias, desenvolvidas no final do século XIX (entre 1890 e 1900) contribuíram para melhorar o desempenho dos carros elétricos, são elas: a frenagem regenerativa, um equipamento capaz de converter a energia cinética liberada durante a frenagem em energia elétrica (aumentando a eficiência energética do veículo), e o sistema híbrido a gasolina e eletricidade. Nesse mesmo período, três tecnologias de propulsão concorriam no mercado de automóveis: o carro elétrico, a vapor e a gasolina[1].

## ASCENSÃO

De 1880 a cerca de 1900, foi o período mais intenso na implantação de veículos elétricos, representou o começo da idade de ouro, terminando no início dos anos 1920. Os carros elétricos nunca mais experimentaram uma era próspera semelhante de desenvolvimento e implantação tecnológica e a maioria dos grandes avanços tecnológicos foram alcançados neste período. Mesmo atualmente, mais de cem anos depois, esses avanços ainda formam a base para a tecnologia dosautomóveis elétricos utilizados[7,8].

Em 1900, a França liderou o mundo na produção, inovação e propriedade de automóveis, havia cerca de 5.600 automóveis elétricos no país, mas apenas 265 estações de recarga elétrica. O estado de Nova York tinha cerca de 4.000 veículos registrados em 1903,destes, 53% eram movidos a

vapor, 27% eram movidos à gasolina e 20% eram movidos à energia elétrica. Em 1912, o pico foi alcançado nos EUA com cerca de 30.000 veículos elétricos no total, mas o carro elétrico era o mais conservador dos três, com sua grande semelhança com as carruagens, tanto na aparência quanto no desempenho[1,7].

Há registro da produção, já em 1903, de um automóvel que apresentava as características de um híbrido em série, consistindo de um pequeno motor à gasolina, baterias, um gerador elétrico e dois motores elétricos montados diretamente nas rodas dianteiras. Outro modelo, desenvolvido por Jenatzy em 1901 podia ser caracterizado como um híbrido em paralelo, com um motor a gasolina e um motor elétrico que funcionavam juntos ou separadamente e através de um dínamo, o motor à gasolina poderia ser usado para carregar as baterias, o que também poderia ser feito durante uma descida. O objetivo dos primeiros veículos híbridos era compensar a eficiência relativamente baixa das baterias utilizadas nos veículos puramente elétricos e a precária estrutura de distribuição elétrica das cidades no início do século XX[10,1,7].

Foram observados alguns picos de produção nos EUA e Reino Unido durante a Primeira e a Segunda guerras mundiais, período em que o racionamento de gasolina e diesel forçou a busca por fontes de energia alternativas ao petróleo. Uma situação semelhante ocorreu no Japão do pós-guerra, pois o carro elétrico tornou-se também bastante popular devido ao racionamento de combustíveis[1].

## QUEDA

Entre os principais fatores apontados para o declínio dos carros elétricos a partir de 1912, podem-se citar[7]:

- O sistema de produção em série de automóveis desenvolvido por Henry Ford, pois permitiu que o preço pago pelos veículos à gasolina correspondesse a cerca de metade do preço dos elétricos.
- Foi inventada a partida elétrica, que dispensou o uso da manivela utilizada para acionar o motor dos veículos a gasolina.
- As rodovias dos EUA, por volta de 1920, interligavam diversas cidades, logo, demandavam veículos capazes de percorrer longas distâncias.
- A gasolina tornou-se um combustível atrativo para o setor de transportes devido às descobertas de petróleo no Texas, que reduziram o seu preço.

No início da história dos automóveis, em geral, não havia infraestrutura elétrica nem gasolina disponíveis pelas estradas do interior, com isso, poucas pessoas circulavam por elas. Porém, o motor à combustão interna se destacou com maior desempenho em termos de km/litro de combustível comparado aos veículos elétricos, acrescido a isso, a facilidade de distribuição de combustíveis líquidos comercializados em pequenos estabelecimentos comerciais permitiu que a rede de distribuição de gasolina se expandisse rapidamente[10,1].

Havia poucos mecânicos que compreendiam o funcionamento dos motores elétricos e outros componentes específicos, como a bateria, que equipavam os automóveis elétricos e híbridos, mas a manutenção dos primeiros automóveis à gasolina era realizada por profissionais especializados em conserto e manutenção de bicicletas, devido a sua simplicidade[1].

Os automóveis elétricos foram superados pelos veículos à combustão interna, pois tinham dificuldade em subir ladeiras muito íngremes, baixa autonomia, e baixa velocidade, problemas que estavam relacionados à falta de capacidade de armazenamento das baterias. Os automóveis a gasolina também apresentavam problemas técnicos como, por exemplo, barulho excessivo e dificuldade para dar partida, porém, foram mais rápidos em solucioná-los, fazendo com que superassem as vendas de seus concorrentes (veículos elétricos e a vapor)[10].

A partir da década de 1930, os veículos elétricos passaram a ser produzidos em escala cada vez menor. No Japão do pós-guerra, a produção do carro elétrico caiu na década de 1950 quando o racionamento de combustíveis cessou[1].

## RETORNO

Em 1960 um debate novo surgiu, a opinião pública começou a se voltar para os problemas ambientais, principalmente, depois

que Rachel Carson publicou seu livro Silent Spring, em 1962. Carson se concentrou em problemas de poluição ambiental causados principalmente por produtos químicos e pesticidas usados na agricultura, mas paralelamente, foi realizado um debate separado sobre problemas de poluição atmosférica nas grandes cidades. Nessa época, o chumbo era utilizado como aditivo para a gasolina e não havia filtros ou catalizadores para conter as emissões, com isso, os veículos elétricos voltaram a atrair a atenção das grandes montadoras[10,1,7].

A partir de 1970, a questão ambiental se tornou parte integrante do debate sobre os problemas relacionados à geração e consumo de energia, e três eventos internacionais apontaram a necessidade do desenvolvimento de alternativas tecnológicas renováveis para a produção de energia[10,1,7]:

- Em 1972, o Clube de Roma publicou o livro The Limitsto Growth, que destacou a questão da necessidade de um limite para a exploração de recursos naturais não renováveis, como os combustíveis fósseis.
- O segundo evento foi uma crise do petróleo, em 1973, que atingiu grande parte do Ocidente, causada pelo embargo dos principais produtores de petróleo árabe, como resultado ocorreram ondas de racionamentos em diversos países.
- O terceiro evento foi a conscientização a respeito do uso da energia nuclear, como por exemplo, a segurança operacional e o destino dos rejeitos radioativos.

A década de 1970, foi propícia para os veículos elétricos, que combinavam emissão nula de gases poluentes com a alternativa de utilizar fontes de energias renováveis como células fotovoltaicas, energia eólica e das ondas. Porém os protótipos desenvolvidos naquela época nunca chegaram as linhas de produção, houve diversas iniciativas para trazê-los de volta ao mercado automotivo, mas os automóveis elétricos e híbridos não estavam otimizados o suficiente para competir com os veículos convencionais. No final dos anos 1980, novamente com o intuito de reduzir a poluição nas grandes cidades, os veículos elétricos ganharam destaque e em 1990, o estado da Califórnia introduziu suas primeiras regulamentações sobre emissões zero[10,1,7].

Em 1992, ocorreu no Rio de Janeiro a Eco-92 ou Rio-92, conferência que teve como um de seus principais resultados a Agenda 21, que chamou a atenção para os problemas socioambientais causados pelo uso excessivo a longo prazo dos combustíveis fósseis, para a necessidade de redução do consumo de energia nos países desenvolvidos e a questão da busca de uma possível transição para fontes renováveis de energia. No mesmo ano, a União Europeia definiu sua política de transportes através da expressão "uma estratégia para a mobilidade sustentável"[10,1,7].

Em meados de 1990, o órgão do governo responsável por monitorar a qualidade do ar no estado da Califórnia, a CARB (*California Air Resources Board*), estabeleceu uma cota de veículos com emissão zero, porém grandes companhias de petróleo como Shell, Texaco e Exxon colaboravam financeiramente para campanhas políticas compostas por candidatos contrários aos veículos elétricos além de financiarem propagandas contrárias a estes. Com isso, em 1996, a CARB capitulou e postergou o seu cronograma[12].

Ainda em 1990, ocorreu uma nova tentativa de consolidar a implantação dos automóveis híbridos no mercado por meio de parcerias público-privadas. Em 1993, o governo Clinton anunciou uma iniciativa chamada PNGV (*Partnership for a New GenerationVehicles*), com o objetivo de produzir um veículo "limpo", com consumo de 4 litros/100 km. Depois de alguns anos e investimentos de aproximadamente US$ 1 bilhão, três protótipos foram anunciados, sendo todos híbridos, entretanto, não chegaram as linhas de produção[12].

A Toyota, em 1997, lançou no mercado japonês oPrius, um sedã híbrido. No mesmo ano a Audi lançou o Duo, sendo o primeiro híbrido do mercado europeu, que foi um fracasso[1].

**Figura 1:** Toyota Prius 1997. **Fonte:**[13]

Em 1999, a Honda foi a primeira empresa a lançar um híbrido no mercado americano, o Insight, sucesso imediato. No ano de 2000, o Prius chegou ao mercado dos EUA, alcançando um sucesso maior que o esperado pela Toyota, efeito que se repetiu posteriormente no mercado europeu. Segundo pesquisas realizadas, o grau de satisfação entre os proprietários do Prius é altíssimo, 88% dos proprietários estão muito satisfeitos com o automóvel e 12% estão de alguma forma satisfeitos[1].

O governo norte-americano promulgou em 2007, o Energy Independence and Security Act, o que destinou anualmente US$ 95 milhões, entre os anos de 2008 e 2013, para a pesquisa e desenvolvimento de um sistema de transporte elétrico, para a formação de capital humano especializado em veículos elétricos e na tecnologia PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*). Também foram destinados US$ 25 bilhões aos fabricantes e fornecedores de automóveis que produzirem veículos híbridos e seus componentes até 2020[10,1].

Foi promulgado nos EUA o *American Clean Energy and Security Act* 2009, em julho de 2009, durante o governo de Obama. Essa lei determina que a Secretaria de Energia, as agências reguladoras estaduais e todas as distribuidoras de energia não reguladas precisariam apresentar planos para o desenvolvimento de redes inteligentes (*smart grids*) integradas, com suporte à tecnologia PHEV até julho de 2012. Também definiu um teto de US$ 50 bilhões para dar assistência financeira às montadoras e produtores de autopeças que se dedicassem ao desenvolvimento de híbridos até o ano de 2020. O incentivo financeiro à inovação tecnológica, indiretamente, teria a finalidade de colaborar para salvar a indústria automobilística americana durante uma crise[6,10].

Esforços substanciais são feitos atualmente para otimizar os automóveis elétricos e superar suas limitações, um exemplo disso é a autonomia do veículo elétrico chamado *Tesla Model S 100D* da empresa *Tesla Motors* que pode percorrer até 632 km com uma carga. Outro automóvel que é um exemplo de avanço dos veículos elétricos, também da Tesla Motors foi anunciado em 16 de novembro de 2017, pode percorrer até 1000 km com uma carga, vai de 0 a 100 km/h em 1,9 segundo e pode chegar a velocidade de 402 km/h. Entregas do esportivo aos consumidores começam em 2020 nos Estados Unidos[14,15,16].

## PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

Analisando a situação dos veículos elétricos e híbridos em outros países foram determinadas as perspectivas de sua implantação no Brasil.

A história dos veículos elétricos e híbridos mostrou que ao longo de sua trajetória houve diversos esforços contrários à ideia da efetiva consolidação dos automóveis elétricos, existem questões institucionais, políticas e mercadológicas a serem resolvidas para que o carro elétrico se estabilize no mercado.Por um lado, destaca-se a necessidade de legislar sobre padrões de cobrança para veículos elétricos para maximizar sua implementação. Por outro lado, enfatiza-se a necessidade de um acordo mínimo e amplo entre as empresas do setor para encontrar padrões comuns, evitando a distribuição de modelos que apenas acarretam em um custo extra desnecessário ao usuário final e beneficiar toda a sociedade e na Espanha há problemas relacionados à mobilidade dos veículos elétricos causados pela necessidade da distribuição das estações de recarga[1,5].

É necessário desenvolver políticas públicas para implementação estruturada de estações de recarga em locais públicos e em áreas de uso comum dentro de grandes espaços compartilhados, como áreas de estacionamento e áreas residenciais, a fim de melhorar a mobilidade elétrica e implementar veículos elétricos em larga escala. Os avanços tecnológicos em baterias e a ajuda de redes inteligentes na redução de tarifas para períodos específicos abrirão novas perspectivas para uma ampla implantação de veículos elétricos[5].

Observando o decorrer da história nota-se que o uso de veículos elétricos tem sido proposto há muito tempo como uma alternativa viável aos carros convencionais e como meio de enfrentar os desafios de transporte relacionados à crescente dependência do combustível fóssil e às emissões resultantes de gases de efeito estufa. No entanto, persistem barreiras consideráveis à sua efetiva adesão ao mercado, uma das mais relevantes é o custo do veículo elétrico

quando comparado a outras opções no mesmo segmento de mercado de carros. A compra de um veículo elétrico à bateria em Portugal é ainda não rentável, nas atuais condições de mercado. Isso significa que não foram considerados incentivos ou preços especiais para eletricidade que pudessem suportar a aquisição de veículos elétricos e a estrutura de impostos é desfavorável. Pelo menos no curto prazo, o argumento de custo para aquisição de um veículo elétrico a bateria ainda não é convincente. No entanto, os resultados em longo prazo contribuem para aumentar a sua atratividade, uma vez que os custos de aquisição mais elevados dos veículos elétricos seriam compensados por menores custos anuais de condução, ou seja, os carros elétricos têm custo de manutenção relativamente mais baixo, são econômicos e duráveis[4].

A efetiva implantação em larga escala com a otimização dos componentes relacionados aos veículos elétricos podem se tornar uma alternativa atrativa para o Brasil, desde que seja adotada, em curto prazo, uma política de incentivo à sua utilização. Analisando o nível de desenvolvimento da frota brasileira, ainda em estágio inicial, a substituição do carro convencional pelo elétrico teria benefícios estratégicos e ambientais efetivos a longo prazo. Porém, a utilização do transporte individual não é uma forma tão eficaz de utilização dos recursos quanto o transporte coletivo, principalmente no Brasil, analisando a mobilidade urbana das grandes capitais do país em seu atual nível de desenvolvimento[1].

# Resultados e Discussão

Analisando e comparando os gastos de combustível e manutenção entre o veículo com motor de combustão interna, que pode ser designado de ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicle*) e o veículo elétrico à bateria, também chamado pelo termo de BEV (*Battery Electric Vehicle*), nota-se a diferença de economia entre ambos, como mostra a Tabela 1:

**Tabela 1:** Economias Anuais dos BEVs de Combustível e Manutenção por Províncias do Canadá. **Fonte:**[17] (adaptado pelo autor)

| Economias Anuais dos BEVs de Combustível e Manutenção por Províncias do Canadá | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PROVÍNCIA | Custos médios do ICEV | | | Custos médios do BEV | | | Economia | |
| | Manutenção | Combustível | Total | Manutenção | Combustível | Total | $ | % |
| Alberta | $ 1.330,00 | $ 3.251,00 | $4.581,00 | $ 698,00 | $ 567,00 | $1.265,00 | **$3.316,00** | **72%** |
| Colúmbia Britânica | $ 797,00 | $ 2.339,00 | $3.136,00 | $ 419,00 | $ 400,00 | $ 819,00 | **$2.318,00** | **74%** |
| Ilha do Príncipe Eduardo | $ 798,00 | $ 2.363,00 | $3.161,00 | $ 421,00 | $ 657,00 | $1.077,00 | **$2.084,00** | **66%** |
| Manitoba | $ 831,00 | $ 2.207,00 | $3.038,00 | $ 438,00 | $ 342,00 | $ 779,00 | **$2.259,00** | **74%** |
| Nova Brunswick | $ 899,00 | $ 2.574,00 | $3.473,00 | $ 474,00 | $ 565,00 | $1.039,00 | **$2.434,00** | **70%** |
| Nova Escócia | $ 891,00 | $ 2.527,00 | $3.418,00 | $ 469,00 | $ 694,00 | $1.163,00 | **$2.255,00** | **66%** |
| Ontário | $ 952,00 | $ 2.583,00 | $3.535,00 | $ 500,00 | $ 694,00 | $1.194,00 | **$2.341,00** | **66%** |
| Quebec | $ 776,00 | $ 2.157,00 | $2.933,00 | $ 408,00 | $ 254,00 | $ 663,00 | **$2.270,00** | **77%** |
| Saskatchewan | $ 1.225,00 | $ 3.025,00 | $4.250,00 | $ 643,00 | $ 841,00 | $1.484,00 | **$2.766,00** | **65%** |
| Terra Nova | $ 1.048,00 | $ 2.970,00 | $4.018,00 | $ 551,00 | $ 519,00 | $1.070,00 | **$2.948,00** | **73%** |
| Média nacional | $ 931,00 | $ 2.534,00 | $3.464,00 | $ 489,00 | $ 514,00 | $1.003,00 | **$2.461,00** | **71%** |

A utilização de veículos elétricos a longo prazo é uma alternativa vantajosa em comparação aos veículos à combustão interna, pois tem custo de manutenção relativamente mais baixo, são econômicos e duráveis. Além deste benefício, a substituição da frota de veículos a combustão interna por elétricos colabora para a redução de problemas ambientais causados por emissão de gases poluentes e ajuda a manter a segurança energética dos países[4,17,5].

O estoque global de carros elétricos pode chegar a 70 milhões em 2025. Seguindo a mesma trajetória ao longo da história, os Estados Unidos vêm investindo em veículos elétricos por meio de incentivos políticos, visando à sustentabilidade social e ambiental, e no ano de 2016 foi destaque no mercado de automóveis híbridos plug-in, como pode ser observado no Gráfico 1[18]:

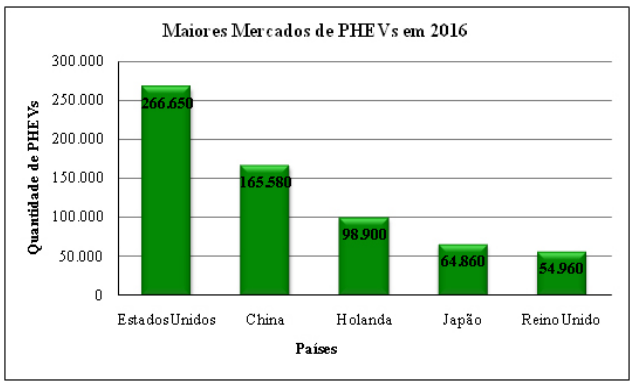



**Gráfico 1:** Maiores Mercados de PHEVs em 2016. **Fonte:** referência[18].

Com o aumento crescente do estoque global dos veículos elétricos nota-se a diferença referente ao consumo de petróleo no setor de transportes, que foi responsável em 2016 por 49,3% do total, representando uma queda de 12,4% em relação ao ano de 2009, evidenciando a diminuição da dependência de combustíveis fósseis no mercado automotivo[19].

A China também tem demonstrado esforços substanciais referentes à produção de automóveis elétricos e híbridos, conforme dados do Gráfico 2:

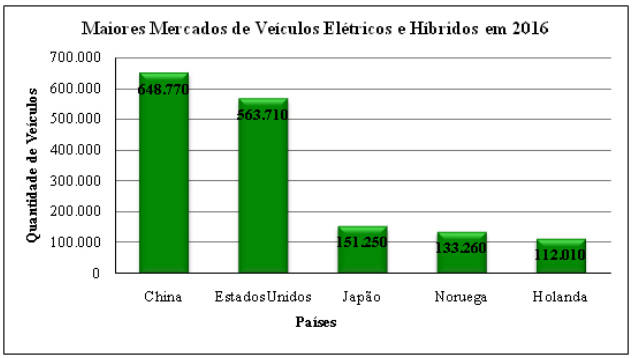



**Gráfico 2:** Maiores Mercados de Veículos Elétricos e Híbridos em 2016. **Fonte:** referência[18].

Com princípios básicos semelhantes a países como Estados Unidos e China, o Brasil tem potencial para aderir a implantação em larga escala de veículos elétricos e híbridos, utilizando da experiência vivenciada como base para a consolidação efetiva de todo processo.

# Conclusões

A atratividade dos veículos elétricos à bateria como também dos híbridos e sua efetiva implantação em larga escala com a otimização de seus diversos componentes ainda depende de aspectos políticos, técnicos e econômicos, todos intimamente inter-relacionados.

Os aspectos políticos incluem a definição de políticas de incentivos estáveis e seguras que proporcionam confiança tanto aos produtores quanto aos consumidores de veículos elétricos e incluem não apenas incentivos financeiros, mas também recursos especificamente adaptados a cada país ou região.

Fatores técnicos estão relacionados a questões de alcance e carregamento, exigindo o desenvolvimento tecnológico do veículo elétrico e da rede de carregamento e armazenamento, com a distribuição estratégica das estações de recarga e baterias eficazes.

Por fim, os aspectos econômicos devem considerar o custo de aquisição como sendo a barreira principal para a efetiva consolidação dos automóveis elétricos no mercado, exigindo então a presença de economias de escala que só podem ser alcançadas por meio do aumento das vendas.

# Referências


1. Baran, R.; Legey, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. Rio de Janeiro: XIII Congresso Brasileiro de Energia, nov. 2010. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1489/3/A%20BS%2033%20Ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos%20-%20hist%C3%B3ria%20e%20perspectivas%20no%20Brasil_P.pdf. Acesso em: 11 fev. **2019**.
2. EIA DOE. International Energy Statistics, **2012**. Disponível em: http://www.eia.gov/countries/data.cfm. Acesso em: 13 abr. **2019**.
3. IEA. Key World Energy Statistics. International Energy Agency, **2011**. Disponível em: http://iea-gia.org/wp-content/uploads/2012/08/key_world_energy_stats-2011-27Dec11.pdf. Acesso em: 13 abr. **2019**.
4. Fontaínhas, J.; Cunha, J.; Ferreira, P. Is investing in an electric car worthwhile from a consumers' perspective? Energy, Elsevier Ltd. Guimarães: University of Minho, v. 115, p. 1459-1477, 15 nov. **2016**. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.075. Acesso em: 20 fev. **2019**.
5. Martinez-Lao, J. et al. Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier Ltd. Almeria: Universidad de Almeria, v. 77, p. 970-983, set. **2017**. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.239. Acesso em: 21 fev. **2019**.
6. Anderson, C. D.; Anderson, J. Electric and Hybrid Cars: A History, 2. ed. McFarland&Company, Carolina do Norte: Jefferson, **2010**. Disponível em: https://enciklopediamoderne.files.wordpress.com/2014/12/curtis-d-anderson-judy-anderson-electric-and-hybrid-cars.pdf. Acesso em: 06 mar. **2019**.
7. Høyer, K. G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. Elsevier Ltd. Utilities Policy, Oslo:

Oslo University College, v. 16, p. 63-71, jun. **2008**. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.001. Acesso em: 05 mar. **2019**.

8. WestbrooK, M. H. The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars. Society of Automotive Engineers, Pensilvânia: Warrendale, **2001**.
9. Barnstone, D. A.; Barnstone, R. V. The Electric Highway: Intelligent Infrastructures for Kinetic Cities. Urban Energy Transition (Second Edition): Renewable Strategies for Cities and Regions, Elsevier Ltd. Sydney: University of Technology Sydney, p. 153-166, **2018**. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102074-6.00022-X. Acesso em: 22 abr. **2019**.
10. Baran, R. A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, set. **2012**. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/10634/1/Doutorado_Renato%20Baran_P_PO_BD.pdf. Acesso em: 11 fev. **2019**.
11. EIA DOE. Annual Energy Review, **2009**. Disponível em: https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/index.php. Acesso em: 13 abr. **2019**.
12. Sovacool, B. K.; Hirsh, R. F. Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. Energy Policy, Elsevier Ltd. Cingapura: National University of Singapore, v. 37, p. 1095-1103, mar. **2009**. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.005. Acesso em: 13 abr. **2019**.
13. Autowini. CarSpecification: Toyota Prius 1997. Coreia, **2009**. Disponível em: http://www.autowini.com/specification/Toyota/Prius/1997/car-class.do. Acesso em: 13 abr. **2019**.
14. Agrela, L. Novo carro elétrico da Tesla vai de 0 a 100 km/h em 1,9 segundo, 17 nov. **2017**. Disponível em: https://exame.abril.com.br/tecnologia/novo-carro-eletrico-da-tesla-vai-de-0-a-100-km-h-em-1-9-segundo/. Acesso em: 26 maio **2019**.
15. Matsubara, V.; Rodriguez, H. Novo Tesla Roadster vai de 0 a 100 km/h em 1,9 s, 19 nov. **2017**. Disponível em: https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/novo-tesla-roadster-vai-de-0-a-100-km-h-em-19-s/. Acesso em: 26 maio **2019**.
16. Oliveira, A. Tesla Model S 100D: Prazer de condução e autonomia, 12 maio **2018**. Disponível em: https://www.jornaldenegocios.pt/weekend/automoveis/detalhe/tesla-model-s-100d-prazer-de-conducao-e-autonomia. Acessoem: 26 maio **2019**.
17. Logtenberg, R.; Pawley, J.; Saxifrage, B. Comparing Fuel and Maintenance Costs of Electric and Gas Powered Vehicles in Canada. 2º DegreesInstitute, set. **2018**. Disponível em: https://www.2degreesinstitute.org/reports/comparing_fuel_and_maintenance_costs_of_electric_and_gas_powered_vehicles_in_canada.pdf. Acesso em: 19 abr. **2019**.
18. IEA. Global EV Outlook **2017**. International Energy Agency, **2017**. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf. Acesso em: 19 abr. **2019**.
19. IEA. Key World Energy Statistics. International Energy Agency, **2018**. Disponível em: https://webstore.iea.org/download/direct/2291?fileName=Key_World_2018.pdf. Acesso em: 13 abr. **2019**.

## José P. Ferreira* & Márcio J. Dias

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: josepaulofrr@gmail.com

# Análise das Propriedades Mecânicas e Microestrutural da Solda Híbrida TIG-MAG em Aço SAE 1020

Vitor D. Borges, José M. C. Silva, Victor M. F. Luz & Wilson de Paula

O objetivo deste trabalho é analisar as propriedades mecânicas e microestrutural do processo automatizado de soldagem híbrida TIG- MAG. Os testes foram executados depositando cordões de solda sobre chapas de aço SAE 1020 com espessura de 1/4". Foram realizados testes de dureza HRB, Charpy-V e análise microestrutural. Para os processos de soldagem, o MAG possuiu maior quantidade de energia absorvida no ensaio de Charpy-V e maior dureza HRB que os outros processos de acordo com os parâmetros adotados. A análise microestrutural possibilitou verificar a formação de uma estrutura parcialmente esferoidizada e o surgimento de ferrita acicular e primária.

**Palavras-chave***: solda híbrida TIG-MAG; propriedades mecânicas; análise de microestrutura.*

The objective of this work is to analyze the mechanical and microstructural properties of the automated TIG - MAG hybrid welding process. The tests were performed by laying weld beads on 1/4"SAE 1020 steel sheets. Hardness tests HRB, Charpy-V and microstructural analysis were performed. For welding processes, MAG had higher amount of energy absorbed in the Charpy-V test and higher HRB hardness than the other processes according to the adopted parameters. The microstructural analysis made it possible to verify the formation of a partially spheroidized structure and the appearance of acicular and primary ferrite.

**Keywords:** *TIG-MAG hybrid welding; mechanical properties; microstructure analysis.*

# Introdução

Atualmente, o processo de soldagem, pelo motivo de ser simples e econômico, é amplamente utilizado para unir componentes metálicos[1]. A soldagem é considerada o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas[2]. Diversos setores utilizam esse método de fabricação, destacando as áreas automobilística, naval, aeronáutica, hidroelétricas e industrias petrolíferas. Este método de fabricação tem se tornando uma importante alternativa para diminuir de forma considerável o peso estrutural e garantir um menor tempo de fabricação, se comparado a outros métodos de união de materiais[3].

A combinação de processos de soldagem consiste em aliar diferentes tipos de soldagem, para que, operem simultaneamente em uma mesma poça de fusão. Essa combinação de processos é denominada de solda híbrida e tem sido utilizada desde a década de 70, este método surgiu devido à necessidade de possuir fontes de energia que teriam uma capacidade maior aumentando a produtividade. A união de dois ou mais processos de soldagem convencionais busca atingir resultados que não seriam alcançados em processos isolados[4].

Conjugando os processos TIG (Tungsten Inert Gas) e o MAG (Metal Active Gas), as vantagens são um arco elétrico concentrado e um cordão de alta qualidade na TIG e uma alta taxa de deposição e qualidade de acabamento do cordão através do processo MAG. Ao se realizar a soldagem híbrida, com a tocha de solda TIG à frente da MAG, podem-se alcançar penetração, área, largura e altura de reforço relativamente maiores, se comparado aos processos isolados. Esses fatores são determinados devido ocorrer um preaquecimento ocasionado pela tocha TIG[3].

Este trabalho possui o objetivo de analisar as propriedades mecânicas e microestrutural do processo automatizado de soldagem híbrida TIG - MAG, com a tocha TIG à frente da MAG, comparando os resultados com os testes realizados em corpos de prova de aço SAE 1020 sem solda e soldados através dos processos TIG e MAG isolados.

# Referencial Teórico

## PROCESSO DE SOLDAGEM HÍBRIDO

O grupo de processos de soldagem a arco elétrico pode ser divido em duas vertentes, os processos em que o eletrodo não é consumível, destacando o TIG, e os quais os eletrodos são consumíveis, evidenciando o processo MIG/MAG. Esses grupos se opõem nos quesitos de produtividade e geometria da solda[5].

Na combinação TIG-MAG, geralmente, usa-se uma tocha TIG a frente ocasionando uma poça de fusão e posteriormente a tocha MAG surge finalizando o processo realizando o preenchimento, ou seja, o processo consiste em um aquecimento ocasionado pelo arco voltaico TIG e abertura de uma poça de fusão de modo que se alcance maior penetração enquanto o processo MAG deposite material de forma eficiente[6].

Através do estudo de Meng (2014)[7], pode-se afirmar que com a combinação de dois processos de arco elétrico é possível dobrar o desempenho, pois ocorre aumento de penetração da solda, oferece maior controle sobre a zona termicamente afetada e é possível ter maior velocidade de soldagem, aliando esses fatores o resultado é um aumento de produtividade.

No estudo de Meng (2014)[7], para o processo de soldagem TIG-MAG em altas velocidades, foram analisadas a influência dos parâmetros de soldagem em velocidade de soldagem, propriedades mecânicas e a aparência do cordão, concluindo que propriedades mecânicas das juntas soldadas e a velocidade de soldagem podem ser aumentadas a medida que a corrente da TIG aumenta.

O estudo feito por Teixeira (2011)[3], com o processo TIG-MAG mostrou que ocorreu uma diferença ao se usar a tocha TIG para pré-aquecer o material base, mas de acordo com os parâmetros adotados não houve estatisticamente uma diferença significativa entre o híbrido e o MAG isolado e que a distância entre as tochas também não apresentou influência no processo.

Para que ocorra uma influência significativa na penetração, a corrente elétrica da TIG deve ser maior que

a corrente elétrica da MAG, com valor maior que 300(A), pois valores inferiores mantinham a penetração da solda praticamente constantes. O aumento da distância entre a tocha e a peça faz com que o arco elétrico se torne instável e a variação dos ângulos entre as tochas não apresentou variação da geometria do cordão de solda[6].

Com a combinação destas duas vertentes de soldagem de arco elétrico, busca-se aliar as vantagens de cada processo, destacando a grande produtividade dos processos com eletrodo consumível e o controle da geometria do cordão de solda nos processos em que o eletrodo não é consumível[3].

**PROCESSO TIG**

O processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), ou simplesmente TIG (Tungsten InertGas), tem a função de unir materiais metálicos por meio de fusão ocasionada por um arco elétrico existente entre um eletrodo, não consumível, de tungstênio e as partes a serem soldadas[2-3]. Os eletrodos podem ser puros, possuindo no mínimo 99,5% de tungstênio, ou conter uma porcentagem de outros metais ou óxidos em sua composição, tais como: tório, cério, lantânio, zircônio[8-9]. Este processo pode ser realizado com ou sem uso de metal de adição[2-3].

O equipamento necessário para soldagem TIG é composto por uma fonte elétrica, uma tocha de soldagem, que pode ser refrigerada a ar ou água, uma fonte de gás de proteção, um dispositivo para abertura do arco, cabos e mangueiras[3].

Nos processos em que o eletrodo não é consumível, a soldagem pode ser realizada sem material de adição, dependendo do material e do tipo de junta, ou com um tipo de alimentação manual ou automática, a velocidade pode admitir valores pequenos, igual a zero, até um limite superior, o qual é determinado pela potência do arco. Isso faz com que seja maior a atuação na geometria da solda, possuindo os detalhes característicos de penetração, largura do cordão e ângulo de molhamento[5].

Durante o processo, o eletrodo e a zona de solda são protegidos por um gás inerte, geralmente o argônio, mas podem ser usados misturas de gases inertes como o argônio e o hélio[2]. Em algumas situações é necessário o uso de gases não inertes, em pequena quantidade, misturados com o gás inerte[3].

**PROCESSO MIG/MAG**

GMAW (Gas Metal Arc Welding) é um processo de soldagem por fusão, no qual o arco elétrico é aberto entre um eletrodo consumível e a peça a ser soldada, o eletrodo é continuamente alimentado. A poça de fusão é protegida por um gás, ou mistura de gases, que pode ser inerte ou ativo, isso evita a contaminação da região de soldagem do meio ambiente. No uso de um gás inerte o processo é titulado de MIG (Metal Inert Gas) e quando o gás de proteção usado é ativo o processo é denominado de MAG (Metal Ative Gas)[2-9].

O grupo no qual o eletrodo é consumível apresenta uma maior produtividade devido à energia transferida possuir uma parcela oriunda do material do eletrodo, portando esta energia transferida às partes a serem soldadas não é originária apenas do arco elétrico. Contudo, a relação entre a taxa de fusão e a potência do arco elétrico pode se tornar um empecilho às características do cordão de solda[5].

Os gases comumente usados nas últimas décadas no GMAW (Gas Metal Arc Welding), são o argônio (Ar), o dióxido de carbono ($CO_2$) e o hélio (He), puros ou misturados entre si[10]. Quanto à transferência do metal existem basicamente quatro maneiras, e são eles: spray, curto-circuito, globular e pulsada. Cada modo possui características peculiares de transferência que dependem de parâmetros operacionais sendo eles nível de corrente e tensão do arco, polaridade, diâmetro e composição do eletrodo, composição do gás de proteção e comprimento do eletrodo[2].

No processo de adição de material por spray as principais características são uma velocidade de desprendimento das gotas bastante elevada e gotas com tamanho bastante pequeno. No modo de transferência por curto-circuito, o metal é transferido por contato direto entre o eletrodo e a poça de fusão, está relacionado com curto-circuito instantâneo, provocado entre a gota e a poça de fusão. No modo globular, a distância é suficiente para que a gota viaje através do arco elétrico sem a realização de curto-circuito. No método de transferência por arco pulsado existe uma variação da corrente entre um valor alto (corrente de pico) e um valor baixo (corrente de base). Neste último modo o desprendimento da gota ocorre na corrente de pico com características similares ao modo de transferência por spray[10].

# Materiais e Métodos

## PROCESSO DE SOLDAGEM

O experimento ocorreu similar ao demonstrado na Figura 1. A primeira etapa desse processo foi a preparação dos corpos de prova para a soldagem. Os corpos de prova usados foram fabricados de aço 1020 com 1/4" de espessura, cortados com o auxílio de uma serra Ronemak SR 250 VF, retiradas rebarbas, escória e realizada limpeza para o procedimento de soldagem. A segunda etapa foi a soldagem dos corpos de prova, os equipamentos utilizados foram uma máquina de solda TIG ESAB TIG 500i CC/CV WARRIOR, uma máquina de solda MIG/MAG ESAB Smashweld 408 TOPFLEX, para a proteção gasosa de soldagem os gases utilizados foram, na TIG Argônio e na MAG $CO_2$. No processo TIG foi utilizado eletrodo de Tungstênio com porcentagem de 2% Thório e diâmetro de 2 mm. No equipamento MAG foi usado um arame Esab de aço carbono e diâmetro de 1 mm.

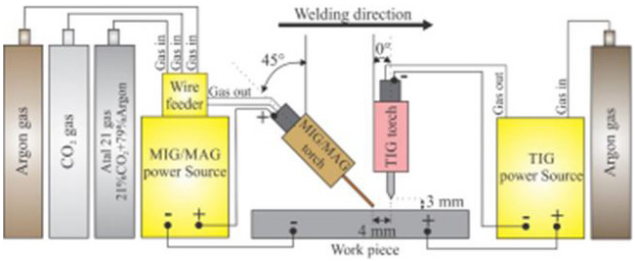



**Figura 1:** Processo de soldagem TIG-MAG híbrido. **Fonte:** referência [11].

Para o processo de soldagem foi projetado por meio do software SolidWorks e posteriormente confeccionado no Centro Tecnológico da UniEvangélica um dispositivo conforme ilustrado na Figura 2, para realizar o deslocamento das tochas de maneira automatizada, possibilitando uma velocidade contínua de soldagem de 4,7mm/s. Este dispositivo é constituído por um motor Nema 34, um drive Lonys DM 680 A, um kit arudíno uno, 1 barra rosqueadade 5/8", dois guias lineares, duas bases de apoio, uma base gabaritada para fixação das tochas TIG e MAG e uma base móvel para fixação das peças a serem soldadas.

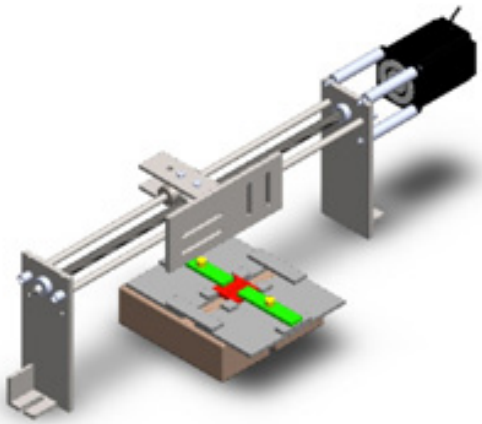


**Figura 2:** Dispositivo de soldagem. **Fonte:** Dos autores.

Para cada processo de soldagem foram fabricados 5 corpos de prova, sendo realizada solda de topo sem chanfro, em ambos os lados e com um espaçamento de 1 mm entre as partes e na solda TIG não houve espaçamento. Primeiramente cada peça foi soldada em apenas um lado e após o término de todos os corpos de prova, foi realizadasoldagem na outra face do material, após a conclusão ocorreu resfriamento em temperatura ambiente.

Com base nos estudos e testes realizados, foram definidos os parâmetros a serem utilizados em cada processo de soldagem, realizando-se inspeção visual para verificar a qualidade da junta soldada. As Tabelas 1, 2 e 3 relatam os parâmetros de maneira organizada para os processos MAG, TIG e TIG-MAG respectivamente.

**Tabela 1:** Parâmetros utilizados na solda MAG. **Fonte**: Dos autores.

| Gás | Fluxo de gás MAG (L/min) | TensãoMAG (V) | Corrente (A) | Alimentação de arame MAG (m/min) | Distância do eletrodo para a peça | Ângulo da tocha |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $CO_2$ | 14 | 36 | 200 | 8 | 3 | 0 ° |

**Tabela 2:** Parâmetros utilizados na solda TIG. **Fonte:** Dos autores.

| Gás | Fluxo de gás TIG (L/min) | Corrente TIG (A) | Distância do eletrodo para a peça | Ângulo da tocha |
|---|---|---|---|---|
| Argônio | 18 | 190 | 3 | 0° |

**Tabela 3:** Parâmetros utilizados na solda TIG-MAG. **Fonte:** Dos autores.

| Corrente TIG (A) | Corrente MAG (A) | Tensão TIG-MAG (V) | Alimentação de arame MAG (m/min) | Distância do eletrodo TIG para a peça | Distância entre as tochas (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 185 | 165 | 23 | 8 | 3 | 4 |

O ângulo da tocha, gás e fluxo de gás listados nos processos TIG e MAG foram mantidos para o processo híbrido. Devido à limitação de velocidade de soldagem em 4,7 mm/s, a redução das correntes de soldagem foi necessária para que o processo híbrido apresentasse boas características no cordão de solda.

## PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS TESTES

Após realizado o processo de soldagem, os corpos de prova foram segmentados na direção transversal de soldagem, com o auxílio de uma cortadora metalógrafa Pantec modelo Pancut 100. Foi realizada inspeção visual para verificar a qualidade da solda e retirada amostras para realizar os ensaios de dureza, impacto charpy e análise de microestrutura. Em cada ensaio, foram utilizados corpos de prova de aço 1020 sem solda e amostras soldadas por meio dos processos TIG, MAG e híbrido TIG-MAG.

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para o ensaio de análise microestrutural foram retirados corpos de prova com as dimensões de 6x10x55 mm de cada peça soldada. Na etapa de polimento foi utilizada uma máquina de polir Pantec modelo Polipan 2D e lixas convencionais à prova d'agua com granulometria crescente de 240, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2500. Buscando evitar uma superfície irregular para melhor análise e sempre girando a amostra em 90º após o final do polimento em cada lixa, buscando homogeneizar a face a ser estudada e reduzir a quantidade de riscos[12].

Com o polimento finalizado, foi realizado o ataque químico com Nital 3%, durante aproximadamente 7 segundos e posteriormente retirado o excesso utilizando álcool etílico 96%[12]. A Figura 3 mostra os corpos de prova após o ataque químico. Para a verificação da microestrutura dos corpos de prova, foi utilizado um microscópio óptico Pantecmodelo MK 100 e um computador com o software para captura de imagem IS Capture.

**Figura 3:** Corpos de prova após ataque químico. **Fonte:** Dos autores.

## DUREZA

Para o ensaio de dureza foi utilizado o método Rockwell na escala B, com base na norma ABNT NBR NM ISO 6508-1[13], utilizando-se um durômetro DIGIMESS, modelo Time VardnessTester TH 130, ilustrado na Figura 4, as amostras possuíam as dimensões de 10x6x55 mm, sendo realizadas cinco medições de dureza em cada amostra. De acordo com a norma utilizada, para evitar que o encruamento, ocasionado pela deformação realizada no momento de medição influenciasse nos resultados de outras medições, as marcações não foram realizadas próximas.

**Figura 4:** Ensaio de dureza. **Fonte:** Dos autores.

### IMPACTO

O ensaio de impacto foi realizado baseado na norma ABNT NBR ISO 148-114, que determina para o corpo de prova a dimensão padrão de secção quadrada de 10 mm de lado e comprimento de 55 mm, podendo ser feito corpo de prova subsequente de 7,5, 5 ou 2,5 mm de largura. Os corpos de prova utilizados nesse ensaio foram usinados em uma fresadora universal ALEMAK modelo X6325C SHP 380V, para que possuíssem as dimensões de 10x5x55 mm. Posterior a usinagem foi realizado o entalhe em cada amostra e o teste de impacto em um equipamento Pantec, modelo JB-300B, ilustrado na Figura 5.

**Figura 5:** Equipamento para teste de impacto. **Fonte:** Dos autores.

# Resultados e Discussão

### ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Pela Figura 6 observa-se a microestrutura do aço 1020 sem processo de soldagem e seus microconstituintes com grãos de Perlita nas fases escuras e grãos de Ferrita nas fases claras, sendo compatível com a especificação do material[12].

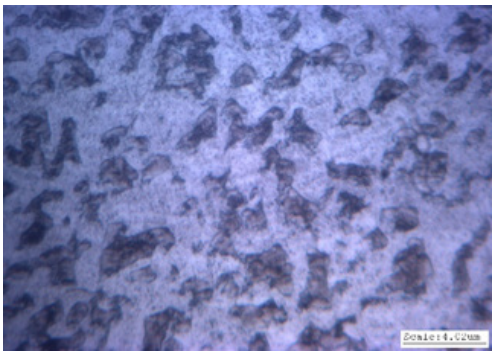


**Figura 6:** Microestrutura do aço 1020, escala de 4,02µm. **Fonte:** Dos autores.

A Figura 7 mostra a microestrutura após o processo de soldagem MAG. De acordo com a Figura 7 observa-se que houve redução do tamanho dos grãos de perlita tornando-a parcialmente esferoidizada e também redução do tamanho dos grãos na fase ferrita e surgimento de ferrita acicular em determinadas regiões[12].

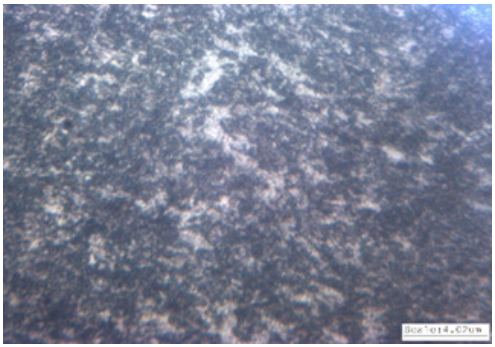


**Figura 7:** Micrografia processo de soldagem MAG, escala de 4,02µm. **Fonte:** Dos autores.

Na Figura 8, é evidenciada a micrografia do corpo de prova soldado pelo processo TIG, sem material de adição. Pode-se observar também a redução do tamanho dos grãos de perlita e início de esferoidização. Devido à redução do contorno dos grãos da fase austenita, ocorreu a formação de ferrita primária e acicular[12].

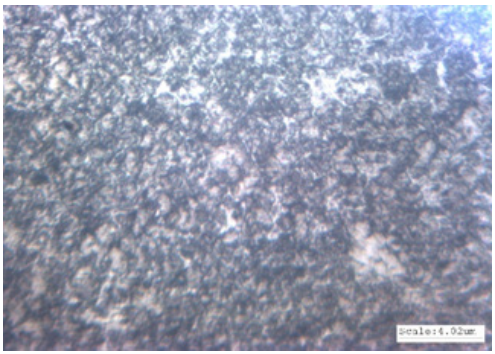


**Figura 8:** Micrografia processo de soldagem TIG, escala de 4,02µm. **Fonte:** Dos autores.

A Figura 9 representa a microestrutura da amostra soldada pelo processo híbrido TIG-MAG. Verifica-se que ocorreu esferiodização dos grãos de perlita, tornando-os mais ordenados. Comparando com os outros processos de soldagem a fase de ferrita se apresentou mais visível.

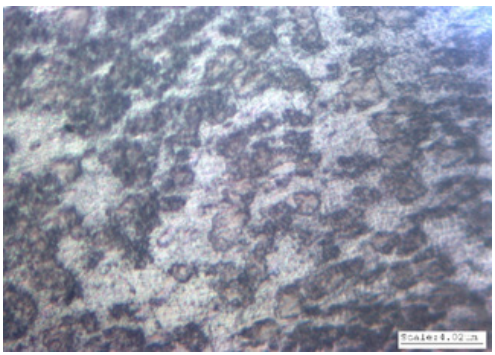


**Figura 9:** Micrografia processo de soldagem híbrido TIG-MAG, escala de 4,02µm. **Fonte:** Dos autores.

## ENSAIO DE DUREZA

No ensaio de dureza realizado o aço 1020 sem solda apresentou o menor valor de HRB, isso ocorre devido à baixa concentração de carbono em sua estrutura e por ser um material bastante tenaz e dúctil, o processo de soldagem MAG apresentou a maior média de dureza seguido pelo processo híbrido e posteriormente o TIG. A quantidade de calor fornecida ao material durante o processo de soldagem ocasiona o aumento da dureza, diminuição de ductilidade e tenacidade, resultados comprovados no teste de dureza[12]. Os resultados dos testes foram organizados na Tabela 4 e na Figura 10.

**Tabela 4:** Médias dos testes de dureza HRB. **Fonte:** Dos autores.

| Aço 1020 | MAG | TIG | TIG-MAG |
|---|---|---|---|
| 64,6 | 78,6 | 72,8 | 74,4 |

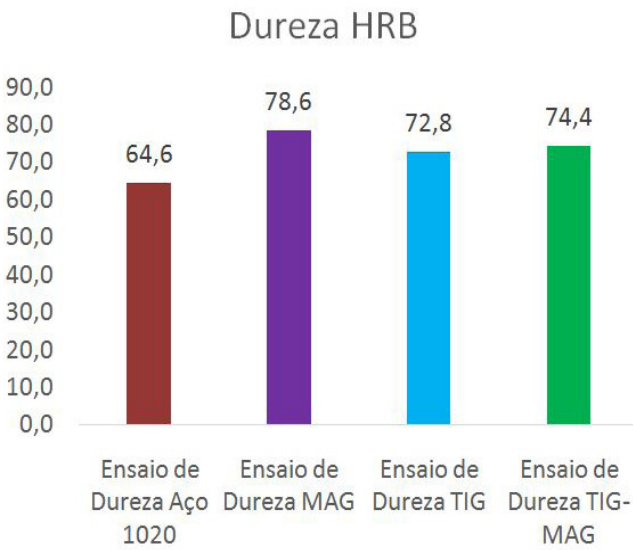



**Figura 10:** Ensaio de dureza Rockwell B. **Fonte:** Dos autores.

**ENSAIO DE CHARPY-V**

O ensaio de impacto Charpy-V é bastante empregado para a análise de fratura frágil em metais. Consiste em um ensaio dinâmico, em que o resultado corresponde a uma quantidade de energia absorvida pelo corpo de prova até o instante em que ocorra a ruptura[15]. Os resultados dos testes foram organizados e ilustrados na Figura 11.

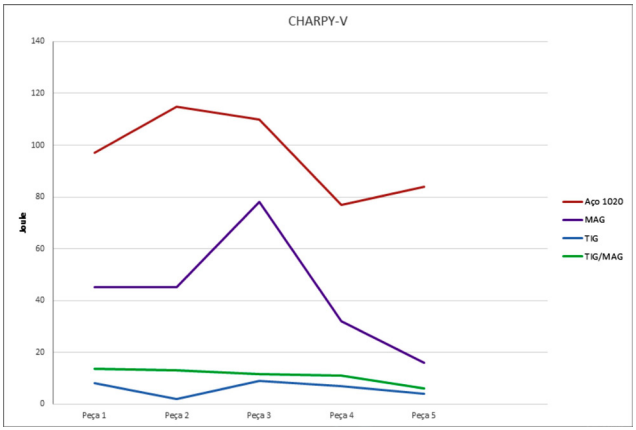



**Figura 11:** Resultado do ensaio de impacto Charpy - V. **Fonte:** Dos autores.

O ensaio demonstra que aços com baixo percentual de carbono apresentam boa ductilidade e tenacidade, possuindo o limite de escoamento menor que o limite de resistência. O aço 1020, por ser um aço bastante tenaz, apresentou uma maior quantidade de energia absorvida no ensaio, se comparado aos corpos de prova soldados[12].

O processo de soldagem TIG apresentou maior fragilidade ao ensaio de impacto, devido ocorrer apenas fusão da peça base no processo de soldagem e não possuir adição de material. O superaquecimento do material ocasiona, frequentemente, ganho em propriedades de resistência como a dureza e a diminuição de propriedades como ductilidade e tenacidade, resultados comprovados nos processos de soldagem[12]. A Figura 12 demonstra amostras de cada corpo de prova TIG, TIG-MAG, MAG e aço 1020, respectivamente.

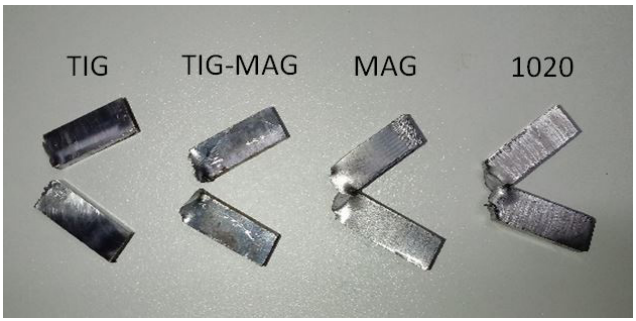



**Figura 12:** Corpos de prova ensaio de Charpy. **Fonte:** Dos autores.

# Conclusões

De acordo com as tabelas e análises dos gráficos conclui-se que: o método híbrido TIG-MAG permite maior velocidade de soldagem comparado aos processos operados isolados, por ser restrito a 4,7 mm/s a velocidade de soldagem, foi necessário reduzir os valores de corrente. Dentre os processos de soldagem o MAG foi o que apresentou maior média de dureza e maior absorção de energia no teste de impacto, apresentando valores médios de 78,6 HRB e 43,2 Joules respectivamente. Pelo fato de reduzir as amperagens no processo híbrido, as características e a geometria do cordão de solda são modificadas influenciando diretamentenos testes realizados. De acordo com os parâmetros escolhidos o processo de soldagem híbrido e os testes realizados, o experimento apresentou diferenças em relação aos processos TIG e MAG operados isolados. Foi possível perceber a geometria dos cordões de solda dos corpos de prova e identificar que a penetração foi maior no material soldado através do processo híbrido, apesar de ter sua corrente reduzida.

Este trabalho possuiu grande importância para o estudo das propriedades mecânicas e microestrutural do método de soldagem híbrido em comparação aos processos isolados, atualmente muitos estudos nesse campo ainda estão em desenvolvimento.

Contudo, o esforço em explicá-los nem sempre é o bastante para explorá-los em toda a sua realidade, assim

julga-se que o objetivo desse trabalho foi alcançado, porém, abrem-se perspectivas de novas investigações que estudos futuros possam explorar.

## Referências


1. Okumura, T.; Taniguchi, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. 1a. ed. Rio de Janeiro – RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., **1982**.
2. Modenesi, P.J.;, Marques, P. V.; Santos, D. B. Introdução à metalurgia da soldagem. Minas Gerais; Universidade Federal de Minas Gerais, **2004**.
3. Teixeira, G.S.Análise Da Influencia dos Parâmetros de Soldagem Sobre a Geometria do Cordão de Solda Depositado pelo Processo de Soldagem TIG – MAG em TANDEM. Master´sThesis,Univ. Fed. do Rio Gd. do Sul – UFRGS **2011**.
4. Messler, J.R.W. Whats Next for Hybrid Welding. Weld. J. **2004**, 83, 30-34.
5. Oliveira, M.A. Desenvolvimentos no processo híbrido Plasma-Mig para operações de soldagem e brasagem. Ph.DThesis, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, Brazil, **2006**.
6. Kanemaru, S.; Sasaki, T.; Sato, T.; Mishima, H.; Tashiro, S.; Tanaka, M. Study for TIG-MIG Hybrid Welding Process—Experimental Consideration for Optimum Torch Configuration.Q. J. Jpn Weld. Soc. **2013**, 31, 18-21.
7. Meng, X.; Qin, G.; Zhang, Y.; Fu, B.; Zou, Z. High speed TIG-MAG hybrid arc welding of mild steel plate, J. Mater. Process. Technol., **2014**, 214, 2417-2424.
8. Bracarense A. Q., Processo de Soldagem TIG-GTAW,Belo Horiz. Univ. Fed. Minas Gerais – Esc. Eng. Pós-graduação Eng. Mecânica, p. 44, **2012**.
9. Machado, I.G. Soldagem em técnicas conexa: Processos. Disponível em: http://www.ufrgs.br/lstc/download/livrosoldagemetecnicasconexas/soldagemetecnicasconexasprocessos.html (acessado em 30/11/**2018**).
10. Wainer, E.; Brandi, S.; Mello, F. Soldagem: processos e metalurgia. pp. 317–323, **1992**.
11. Schneider, C.; Lisboa, C.; Silva, R.;Lermen, R. Optimizing the Parameters of TIG-MIG/MAG Hybrid Welding on the Geometry of Bead Welding Using the Taguchi Method.J. Manuf. Mater. Process., vol. 1, no. 2, p. 14, **2017**.
12. Colpaert, H. Metalografia dos produtos siderurgicos comuns. 4ª. ed. [s.l] Blucher, **2008**.
13. ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell, **2008**.
14. ABNT NBR ISO 148-1:2013. Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy, **2013**.
15. Souza, S. A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos. 5 ed. reimpr. São Paulo: Blucher, **2014**.



## Vitor D. Borges*, José M. C. Silva; Victor M. F. Luz & Wilson de Paula

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: vitord-borges@hotmail.com

# Determinação de Parâmetros de uma Máquina de Relutância Variável

Murillo V. Santos, Célio C. L. Filho, Jan A. R. Ribeiro, Camila D. Jesus & Márcio J. Dias

Esse trabalho tem como objetivo estudar os parâmetros primordiais de uma máquina de relutância variável por meio do método analítico e uma simulação dinâmica com o auxílio do software MATLAB/SIMULINK. As respostas obtidas por meio destes dois métodos devem se apresentar muito próximas e exatas.

**Palavras-chave***: máquina elementar a relutância; MATLAB/SIMULINK; torque; indutância.*

Abstract - This work aims to study the primordial parameters of a variable reluctance machine through the analytical method and a dynamic simulation with the aid of the MATLAB / SIMULINK software. The answers obtained through these two methods, must be very close and accurate.

**Keywords:** *elementary reluctance machine; MATLAB / SIMULINK; torque; inductance.*

# Introdução

A Máquina Elementar a Relutância ou Máquina de Relutância Variável (MRV) é talvez a mais simples das máquinas pois apresenta uma construção não tão complexa quanto o seu controle. Ela recebe este nome pois o seu funcionamento se baseia na variação do valor da indutância no estator em função da posição angular do rotor[1].

Os primeiro modelo de um motor de relutância foi desenvolvido por volta de 1833[2]. Naquela época, ainda não existia uma tecnologia sofisticada que garantisse o controle preciso de volocidade das máquinas elétricas. Mas na decáda de 70, houve grande desenvolvimento de dispositivos semicondutores que impussionaram a sua utilização no controle das máquinas elétricas.

Com isso ocorreu grande demanda de máquinas de relutância variável para aplicações de tração elétrica e acionamentos devido ao controle preciso que fornecia velocidade e torque necessários[2]. Mas esses dispositivos semicondutores apresentavam custos altíssimos para aquela época e eram uma barreira para o aumento na produção destas máquinas de relutância.

As vantagens de não apresentar enrolamentos, escovas e ímãs no rotor, estrutura simples e robusta, e baixo custo com a manufatura (quando comparada às outras máquinas elétricas), além de uma redução vertiginosa nos preços de equipamentos de eletrônica de potência; fizeram com que a MRV chamasse a atenção de vários pesquisadores e empresas ao redor do mundo, aplicando-a principalmente ao uso de bombas, carros elétricos e pequenas utilidades domésticas[3].

Por meio dos inúmeros estudos realizados com a MRV[4-6], foi possível desenvolver um modelo matemático no qual se possa obter uma simulação computacional desta máquina. Todo o comportamento desta máquina pode ser determinados por meio de equações dinâmicas: torque, tensão no estator, posição do rotor, corrente no estator, entre outros. Neste trabalho, se utilizam-se estas equações para gerar uma simulação de uma MRV. Os resultados obtidos com esta simulação serão comparados com os resultados obtidos por meio de cálculo analítico, a fim de verificar se os dois modelos são exatos. Para todos os estudos que são realizados neste trabalho, utiliza-se a MRV da Figura 1 que apresenta como carga, uma mola presa ao seu rotor.

Na próxima seção, ocorre a apresentação dos cálculos analíticos dos parâmetros da MRV, na seção 3 ocorre a simulação dinâmica da máquina e apresentação dos resultados, e por último, a conclusão do trabalho.

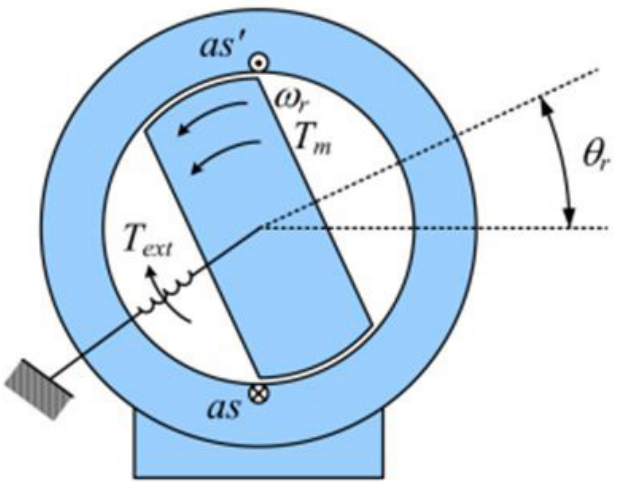



**Figura 1**: Máquina Elementar à Relutância com rotor preso a um mola.

# Cálculos Analíticos

Na Figura 1, é apresentado um sistema eletromecânico no qual a relutância da MRV varia conforme ocorre a movimentação do rotor em relação ao eixo magnético. O rotor está em repouso e preso por uma mola que limita a sua movimentação. O rotor da máquina apresenta uma inclinação em relação ao eixo magnético devido à força que a mola exerce sobre este, evitando que eles venham a se alinhar.

Uma fonte de tensão contínua é então fornecida ao enrolamento da máquina para uma análise do seu comportamento com esta mudança. A primeira análise define-se no regime permanente da máquina, por meio das equações diferenciais que modelam todo o desempenhodos seus parâmetros.

Os cálculos analíticos dos parâmetros da MRV apresentada na Figura 1, constituem-se dos seguintes dados:

1. Indutância de magnetização (Lms) = $0{,}3-0{,}05cos2\theta$ (H);
2. Indutância de dispersão (Lls) = 0,1 (H);
3. Torque resistente da mola (Text) = $0{,}062\ (\theta r-3\pi/8)$ (Nm);
4. Tensão no estator (Vas) = 8 V;
5. Resistência da bobina (Rs) = 10 Ω.

Com estas informações deve-se calcular inicialmente a corrente na bobina do estator e a posição final de equilíbrio do rotor, em regime permanente, com a aplicação de uma tensão contínua no estator de 8 V. A Equação (1) é utilizada para representação da tensão na bobina do estator.

$$V_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + [L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r]\frac{di_{as}(t)}{dt} + 2L_B\omega_r(t)i_{as}(t)\sin 2\theta_r \quad \text{(Eq. 01)}$$

A frequência angular $\omega r$ é a derivada do ângulo teta em relação ao tempo e por isso pode-se fazer essa substituição em (1).

$$V_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + [L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r]\frac{di_{as}(t)}{dt} + [2L_B i_{as}(t)\sin 2\theta_r]\frac{d\theta_r(t)}{dt} \quad \text{(Eq. 02)}$$

Esta análise se realiza no regime permanente, ou seja, o estudo visa ao comportamento da máquina após o regime transitório. Decorrido certo tempo após a alimentação da máquina pela fonte de corrente contínua, as derivadas em relação ao tempo em (2) devido o tempo que vai aumentando a cada instante. De uma forma matemática, pode-se dizer que o tempo "tende ao infinito", e as derivadas serão nulas. A Equação (3) apresenta o resultado obtido após a anulação das derivadas.

$$V_{as}(t) = R_s i_{as}(t) \quad \text{(Eq. 03)}$$

Como a tensão aplicada no estator é contínua, o valor da sua amplitude não varia no tempo e, logicamente, a corrente também terá o mesmo comportamento. Desta forma, calcula-se a corrente no enrolamento da máquina.

$$V_{as} = R_s i_{as} \rightarrow 8 = 10\ i_{as} \rightarrow i_{as} = 0{,}8\ A \quad \text{(Eq. 04)}$$

Após poucos segundos que a máquina sai da inércia, com uma tensão de 8 V aplicada em seu estator, ela necessitará de uma corrente elétrica de 0,8 A para continuar a se movimentar.

O próximo passo é o calculo da posição final de equilíbrio do rotor que é a posição angular onde os torques, resistente e mecânico, são iguais. Para este cálculo utiliza-se a segunda Lei de Newton aplicada à sistemas de rotação.

$$J\frac{d\omega_r(t)}{dt} = T_{ext} - T_m - k_v\omega_r \quad \text{(Eq. 05)}$$

1. Momento de inércia (J)= $2 \times 10^{-4}$ kg·m²;
2. Coeficiente de atrito (K) = 0,004 N·m·s ;
3. Posição inicial do rotor ($\theta_0$): $\frac{\pi}{2}$.

Todos estes parâmetros devem ser utilizados para o cálculo da posição final de equilíbrio do rotor da máquina. Como esta análise é feita para o regime permanente, novamente as derivadas tendem a zero na mesma proporção que o tempo tende ao infinito. Logo, (5) pode ser escrita como:

$$J\frac{d\omega_r(t)}{dt} = T_{ext} - T_m - k_v\frac{d\theta_r(t)}{dt} \quad \text{(Eq. 06)}$$

$$0 = T_{ext} - T_m - 0 \rightarrow T_{ext} - T_m = 0 \rightarrow T_{ext} = T_m \quad \text{(Eq. 07)}$$

$$-0{,}062\left(\theta_r - \frac{3\pi}{8}\right) = L_B {i_{as}}^2 \sin(2\theta_r) \quad \text{(Eq. 08)}$$

Substituindo em (8) todos os valores que já foram dados e calculados anteriormente para o período em regime, pode-se calcular o ângulo teta.

$$-0{,}062\left(\theta_r - \frac{3\pi}{8}\right) = 0{,}05 \times (0{,}8)^2 \sin(2\theta_r) \quad \text{(Eq. 09)}$$

$$-0{,}062\theta_r + 0{,}073 = 0{,}032 \times \sin(2\theta_r) \quad \text{(Eq. 10)}$$

$$-0{,}062\theta_r + 0{,}073 - 0{,}032 \times \sin(2\theta_r) = 0 \quad \text{(Eq. 11)}$$

Deve-se resolver (11), encontrando uma raiz que satisfaça à equação, sendo o valor de $\theta_r$, a posição final de equilíbrio da máquina. Utilizando o MATLAB para resolver este problema, calcula-se um valor de $\theta_r$ igual a 0,674 rad, ou 38,62º. A Figura 2 apresenta a resolução de (11).

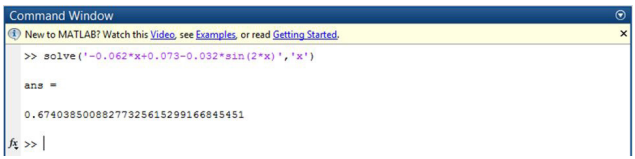



**Figura 2**: Cálculo de raiz pelo MATLAB.

Uma vez que todos os parâmetros intrínsecos à MRV foram calculados pelo método analítico, inicia-se a simulação dinâmica desta máquina para futura comparação entre ambos os métodos.

## SIMULAÇÃO DINÂMICA

Para a simulação da MRV, utiliza-se o SIMULINK/MATLAB que é um software utilizado largamente em simulações dinâmicas. As equações (2) e (5) representam todas as características intrínsecas à esta máquina e por isso sua representação realiza-se em diagramas de blocos. Para facilitar a simulação isolam-se as derivadas de (2) e (5) a fim de utilizar o bloco integrador no SIMULINK para o cálculo dos seus valores reais.

$$\frac{di_{as}(t)}{dt} = \frac{V_{as}(t) - R_s i_{as}(t) - 2L_B \omega_r(t) i_{as}(t) \sin 2\theta_r}{L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r} \quad \text{(Eq. 12)}$$

$$\frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{T_{ext} - T_m - k_v \omega_r}{J} \quad \text{(Eq. 13)}$$

Sabe-se também que a frequência angular $\omega_r$ é igual à derivada do ângulo teta em relação ao tempo, logo esta derivada deverá ser utilizada também como uma variável para a simulação do sistema.

$$\omega_r(t) = \frac{d\theta_r}{dt} \quad \text{(Eq. 14)}$$

Aplicando uma tensão contínua de 8 V no enrolamento situado no estator da máquina, calcula-se uma corrente de 0,8 A na bobina, no regime permanente. Este valor se confirma nas Figuras 4 e 5 que mostram o valor da corrente da simulação com todos os parâmetros que foram dimensionados. A corrente alcança um valor de pico de 0,8252 A e após 0,4 segundos, ela se estabiliza em 0,8 A já no regime permanente.

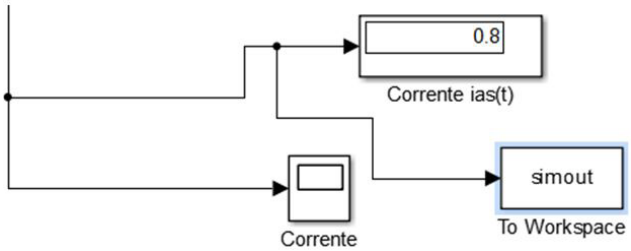



**Figura 4**: Valor simulado da corrente no estator da bobina no regime permanente.

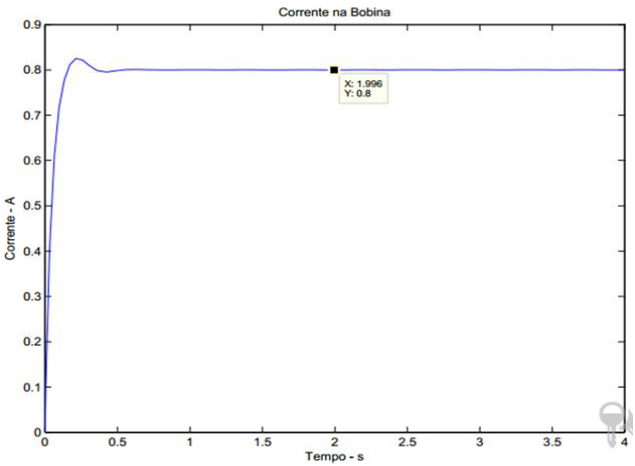



**Figura 5**: Gráfico da corrente.

Pelo método analítico, calculou-se um ângulo teta de 0,674 rad (38,62º) no qual o torque resistente e o torque mecânico são iguais e por isso a máquina para de girar alcançando uma posição de equilíbrio. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados obtidos pela simulação. Estipulou-se uma condição inicial para essa simulação em que o ângulo teta inicial equivale a 90º ou 1,571 radianos. Na Figura 7 se vê claramente que o gráfico inicia-se neste mesmo valor.

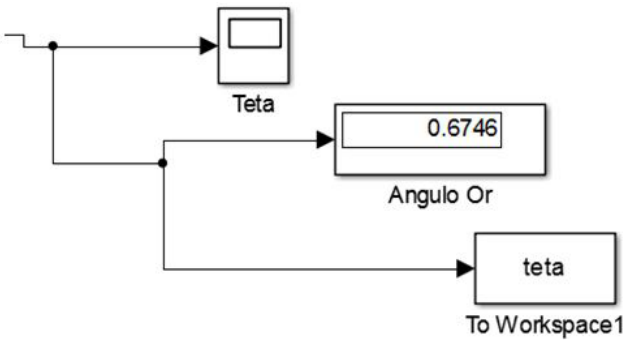



**Figura 6**: Valor simulado do ângulo teta final.

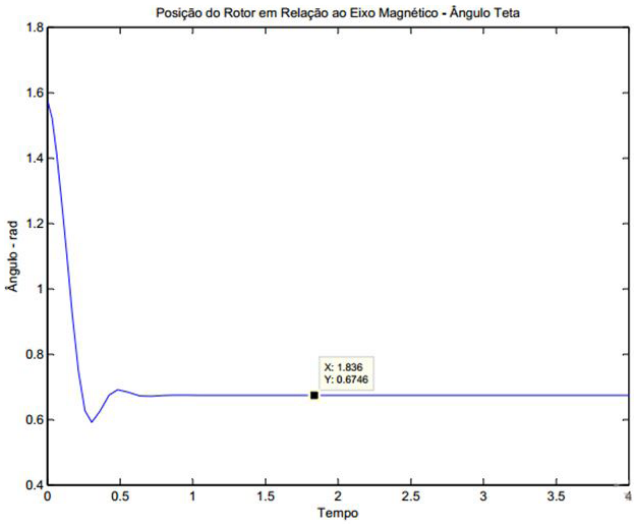



**Figura 7:** Gráfico da posição angular do rotor.

A Figura 8 apresenta o gráfico da frequência angular do rotor que sai da inércia e começa a se movimentar em relação ao eixo magnético. Quando o torque da máquina se iguala ao torque resistente da mola, o rotor volta novamente ao repouso, posicionando-se 38,62º em relação ao eixo magnético.

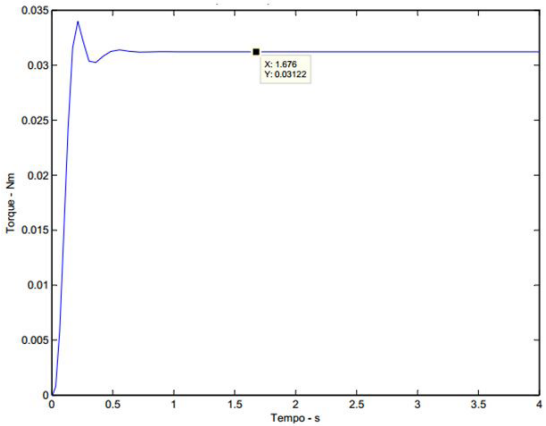



**Figura 8:** Frequência angular do rotor.

A Figura 9 exibe o comportamento do torque conforme a máquina vai saindo da inércia até alcançar o regime permanente. Vê-se claramente que o torque se estabiliza e permanece constante com um valor de 0,03122 N.m pois o sistema está em equilíbrio e o torque da máquina é igual ao torque resistente.

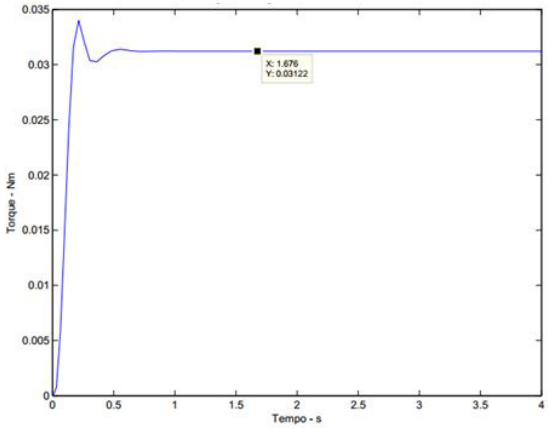



**Figura 9:** Torque da MRV.

O torque resistente apresenta um valor de -0.02434 N. m quando $\theta_r$, é igual a 90º (condição inicial) e conforme a máquina se movimenta, ele alcança o valor 0,03122 N. m no regime permanente. Esse fato se comprova por meio da Figura 10 que mostra o comportamento do torque resistente da mola.

Já a Figura 11 apresenta o valor calculado do torque resistente pelo SIMULINK para a condição inicial (em que a bobina do estator não está alimentada pela tensão) e no regime permanente (quando o torque da mola e o torque da máquina estão equilibrados), respectivamente.

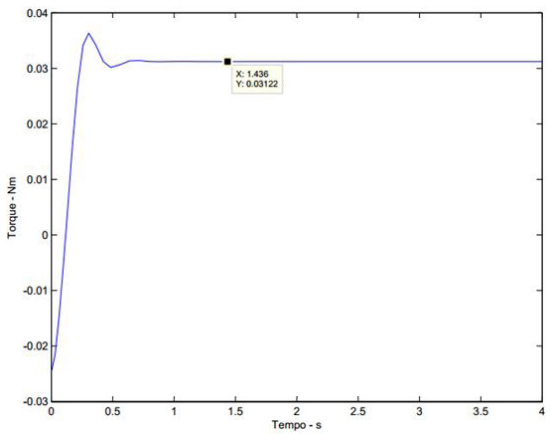



**Figura 10**: Torque Resistente da Mola.

**Figura 11**: Torque resistente inicial e final da mola.

# Conclusão

Conclui-se por meio dos resultados obtidos que o modelo analítico representativo da máquina de relutância variável é exato e pode ser utilizado para qualquer estudo que visa à análise dos parâmetros desta máquina rotativa.

A simulação dinâmica mostrou-se muito eficiente e mais completa do que o modelo analítico, pois se pode analisar o comportamento de qualquer variável da máquina, tanto no tempo transitório quanto no regime permanente. Desta forma, pode-se analisar outras variáveis da máquina como por exemplo a relação entre o fluxo magnético na bobina e a indutância de magnetização.

É possível analisar também a variação de todos os parâmetros estudados na operação da máquina, com a variação no módulo da tensão contínua que é aplicada ao enrolamento da MRV.

# Referências

1. Umans, Stephen D. Máquinas Elétricas – de Fitzgerald e Kingsley. 7ª ed., AMGH Editora Ltda., Porto Alegre, **2014**.
2. T. J. E. Miller.Eletronic Control of Switched Reluctance Machines.
3. Newnes Power Engineering Series. **(2001)**.
4. K. A. Joseph. Opportunities for switched relutance motor-drives. Pulp and Paper Industry Technical Conference, **1999**. Conference Record of 1999 Annual, **1999**, pg. 42-47.
5. M.R. Harris, T.J.E. Miller. Comparison of Design and Performace Parameters in Switched Relutance and Induction Motors. Electrical Machines and Drives, **1989**. Fourth Internacional Conference on **1989**, pp. 303-307.
6. Hassan Moghbelli, Gayle E. Addams and Richard G. HOFT. Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors. IEEE Transcations on Industry Applications, Vol. 21, no 3, Mayijune **1991**.
7. Torrey, D. A. Switched reluctance generators and their control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, issue 1, Feb. **2002**,, pp. 3-14.

**Murillo V. Santos*[1], Célio C. L. Filho[1], Jan A. R. Ribeiro[1], Camila D. Jesus[2] & Márcio José Dias[3]**

[1]Universidade Federal de Goiás
[2]Instituto Federal Goiano
[3]Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: murisantosifg@gmail.com

# Readequação de um Vaso de Pressão Conforme a Norma Regulamentadora NR 13

Eduardo S. Fernandes, Fernando C. S. Rocha, Luiz G. S. Fernandes, Fábio S. Gomes & Rosemberg F. N. Rodrigues

Vasos de pressão são equipamentos com aplicações variadas, sendo uma de suas principais o acúmulo de ar comprimido. Irregularidades provenientes dos vasos de pressão, em desacordo com a Norma Regulamentadora NR 13, podem afetar a integridade do equipamento e também a segurança do trabalhador. Portanto, é fundamental que estes equipamentos funcionem de acordo com a sua Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA). Assim, este trabalho objetiva redimensionar a PMTA de um vaso de pressão, tendo como parâmetro as medidas de sua parede. Os resultados apresentaram uma PMTA de 10,75 kgf/cm², valor que foi mantido adequado conforme a norma supramencionada.

**Palavras-chave***: irregularidades; vaso de pressão; pressão máxima; integridade.*

Pressure vessels are equipment with varied applications, one of its main being the accumulation of compressed air. Irregularities arising from pressure vessels in disagreement with Regulatory Standard NR 13, can affect the integrity of the equipment and also the safety of the worker. It is therefore essential that these equipments operate according to their Maximum Permissible Working Pressure (PMTA). Thus, this work aims to resize the PMTA of a pressure vessel, having as parameter the measurements of its wall. The results showed a PMTA of 10.75 kgf/cm², a value that was maintained adequate according to the above-mentioned standard.margin.

**Keywords:** *irregularities; pressure vessel; maximum pressure; integrity.*

# Introdução

Os vasos de pressão são equipamentos com bastante aplicabilidade nas indústrias, onde normalmente são utilizados em diversos processos, estes vasos exigem alto grau de responsabilidade da empresa na qual o equipamento está instalado. Os vasos de pressão são capazes de manter fluidos em pressão desejável, de acordo com a necessidade do processo, contando com a sua vasta gama de aplicação nas indústrias de refinarias de petróleo, petroquímicas, indústrias alimentícias e farmacêuticas. Os acidentes oriundos de falhas nesses vasos são de grande proporção e, na maioria dos casos, fatais. Os riscos relacionados a esse tipo de equipamento são tratados de forma específica pela NR13 (Norma Regulamentadora da Secretaria do Trabalho) a fim de manter a integridade tanto do equipamento quanto a segurança do operador e demais seres humanos envolvidos[1].

As paredes cilíndricas sofrem tensões de membrana e flexão por conta da pressão e esforço em que são submetidas. Essas tensões de membrana são denotadas como normais e tem influência uniforme na seção transversal da parede. As tensões de flexão também são normais, porém modificam linearmente em relação ao eixo neutro da seção transversal da parede do dispositivo[2].

Para um vaso de pressão se enquadrar na NR13, seu produto P.V deve ser maior que 8 com o valor de P em KPA e o V em $m^3$. Caso o resultado obtido esteja dentro deste parâmetro, é obrigatório que o equipamento seja projetado em caráter da norma vigente. Os vasos de pressão são reservatórios com dimensões e finalidades variadas, contendo fluidos, projetados para suportar com segurança pressões internas diferentes da pressão atmosférica. Além disso, são equipamentos utilizados para o armazenamento de gases sob determinada pressão, acumulação intermediária de gases e líquidos ou processamento de gases e líquidos nos quais a transformação apenas seja possível sob pressão e são fundamentais para o desenvolvimento dos processos de esterilização de materiais, lavanderia e nutrição[3].

As irregularidades provenientes do uso incorreto do vaso de pressão em desacordo com a NR13 ou falta de inspeções, podem não só afetar a integridade do equipamento com surgimento de descontinuidades e vazamentos, mas também a segurança do trabalhador.

O uso do equipamento fora das condições adequadas e sem a realização de inspeções periódicas pode aumentar as perdas de fluido de trabalho durante a operação, ocasionando um processo ineficiente que consome maiores quantidades de fluido para gerar uma condição equivalente à ideal de trabalho, consequentemente mais gastos econômicos tanto com a perda de produtividade tanto com o aumento na necessidade de manutenções corretivas no equipamento. Além de, na observância de alguma não conformidade no vaso de pressão ao ser realizada inspeção pelo órgão competente, a empresa estará sujeita a pagar multas equivalentes à não conformidade observada e correr o risco de ser obrigada a cessar suas atividades até a adequação dos equipamentos no âmbito da norma vigente[4].

Um dos possíveis desgastes que normalmente são encontrados em vasos de pressão é a corrosão que em outras palavras é a degradação e a perda de material devido à ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos, ocasionando a perda de espessura e vida útil do equipamento. Os vasos, em geral, são projetados para determinada vida útil, dependendo da sua classificação, que considera o custo, tipo de equipamento, sua importância para a instalação em que opera e a corrosão a qual estará sujeito o vaso, que no projeto mecânico é compensada com a sobre espessura para corrosão[2].

O objetivo deste estudo é a readequação de um vaso de pressão que estava operando a uma pressão de 10 kgf/$cm^2$ sem prontuário e placa de identificação, dimensionando a sua pressão máxima de trabalho admissível em função da parede do cilindro e realizando inspeções periódicas para que o equipamento retorne ao seu funcionamento dentro dos parâmetros estabelecidos na norma regulamentadora NR13.

# Revisão de Literatura

**PRESSÃO**

Segundo Halliday e Resnick a pressão em qualquer ponto do fluido é o limite dessa razão quando a área de um

êmbolo com o centro nesse ponto tende a zero, entretanto, se a força é uniforme em uma superfície plana de área A, a fórmula pode ser descrita da seguinte forma[5]:

$$P = \frac{\delta F_N}{\delta A} \qquad \text{(Eq. 01)}$$

Em que: P = Pressão; F = Força; A = Área

Porém, em um vaso de pressão essas pressões são comportadas de maneiras diferentes da descrita, pelo fato de possuírem formas e geometrias diferentes, além disso, influenciam diretamente no desgaste da parede do cilindro em condições em que não estão apropriadas para seu uso. A pressão é um elemento fundamental para o funcionamento e operação dos vasos, por esse motivo é de extrema importância que a pressão de trabalho esteja abaixo da pressão máxima de trabalho admitida pelo vaso e a sua instrumentação esteja com a calibração e aferição em dia para exatidão e segurança do processo.

## DEFINIÇÃO VASOS DE PRESSÃO

São definidos vasos de pressão os equipamentos ou componentes cuja a sua principal característica seja armazenar fluido pressurizável. Há diversas listas de vasos que são de uso diário com seu pequeno porte até enormes vasos com estruturas de vários andares para uma empresa ou até mesmo reatores nucleares. A Imagem 1 ilustra o vaso de pressão utilizado no estudo.

**Imagem 1:** Vaso de pressão. **Fonte:** Autoral

Conforme Telles, os vasos de pressão constituem não só os equipamentos mais importantes da maioria das indústrias de processos, como também são geralmente os itens de maior tamanho, peso e custo unitário nessas indústrias, representando em média de 60% do custo total dos materiais e equipamentos de uma unidade de processo. Esses mesmos equipamentos são igualmente presentes, como itens de maior ou menor importância, em muitas outras indústrias de outros ramos[1].

## CLASSIFICAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO

De acordo com a NR13, estes equipamentos são classificados em função da classe do fluido e grupo potencial de risco, conforme imagem 2. No entanto, quando se tratar de mistura deve ser considerado para fins de classificação o fluido que apresentar maior risco aos trabalhadores e instalações, considerando se sua toxicidade, inflamabilidade e concentração são de maiores riscos.

CATEGORIA DE VASOS DE PRESSÃO

| Classe de Fluído | Grupo de Potencial de Risco | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1<br>P.V ≥ 100 | 2<br>P.V < 100<br>P.V ≥ 30 | 3<br>P.V < 30<br>P.V ≥ 2,5 | 4<br>P.V < 2,5<br>P.V ≥ 1 | 5<br>P.V < 1 |
| | Categorias | | | | |
| A<br>- Fluidos inflamáveis, e fluidos combustíveis com temperatura igual ou superior a 200 °C<br>- Tóxico com limite de tolerância ≤ 20 ppm<br>- Hidrogênio<br>- Acetileno | I | I | II | III | III |
| B<br>- Fluidos combustíveis com temperatura menor que 200 °C<br>- Fluidos tóxicos com limite de tolerância > 20 ppm | I | II | III | IV | IV |
| C<br>- Vapor de água<br>- Gases asfixiantes simples<br>- Ar comprimido | I | II | III | IV | V |
| D<br>- Outro fluido | II | III | IV | V | V |

Notas:
a) considerar volume em m³ e pressão em MPa;
b) considerar 1 MPa correspondente a 10,197 kgf/cm².

**Imagem 2:** Categoria de vasos de pressão. **Fonte:** Referência[3].

Existem as seguintes classificações usuais segundo Martins, vasos não sujeitos às chamas e vasos sujeito às chamas. Os vasos não sujeitos às chamas são denominados da seguinte forma: vasos de armazenamento e de acumulação, torres de destilação fracionada, retificação, absorção, reatores, esferas de armazenamento de gases e trocadores de calor. Os vasos sujeitos às chamas são os mais usuais em indústrias de grande porte como caldeiras e fornos[6].

## TIPOS DE VASOS DE PRESSÃO

Os vasos horizontais são muito comuns e geralmente utilizados para trocadores de calor e vasos de acumulação como, tanque de condensado de uma caldeira ou tanque pulmão de ar comprimido por exemplo. Os vasos verticais são utilizados quando é necessária a ação da gravidade como em torres de resfriamento ou reatores de fabricação. Os vasos inclinados são utilizados somente quando a operação necessitar, como por exemplo o escoamento por gravidade de um fluido difícil viscoso.

Os vasos de pressão são definidos de acordo com a posição de instalação em verticais, horizontais e inclinados, como mostrado na Imagem 3.

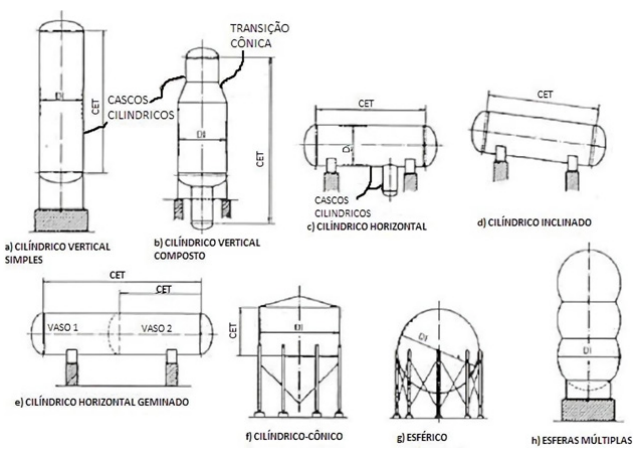



**Imagem 3:** Tipos de Vasos de pressão. **Fonte:** Referência[1].

As dimensões que caracterizam um vaso de pressão são o diâmetro interno e o comprimento entre tangentes. O diâmetro interno (Di) é aplicável a qualquer formato do vaso e é o diâmetro medido nas faces internas da parede. O comprimento entre tangentes (CET) é o comprimento total do corpo cilíndrico ou a soma dos comprimentos dos corpos cilíndricos e cônicos sucessivos. Nos vasos em posição vertical, é regra usual tomar-se a linha de tangência inferior, como plano de referência para todas as cotas verticais[7].

## PRESSÃO DE TRABALHO MÁXIMA ADMISSÍVEL

A norma regulamentadora explica que a pressão de trabalho máxima admissível é o maior valor de pressão que um equipamento pode ser submetido continuamente, de acordo com o código de projeto, a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais[3].

A PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível) tende a ser revisada conforme o tempo de operação ou modificações das condições de projeto, ou seja, quando o vaso de pressão sofre deformações que podem gerar o seu desgaste como por exemplo a oxidação da parede cilíndrica, é necessário que seja feito um redimensionamento para que o vaso continue operando dentro das especificações sem causar riscos à segurança física e ao processo. A PMTA deve ser determinada para pressão interna ou externa em cada componente, descontando-se a pressão devida à coluna de líquido correspondente ao componente analisado, e considerando-se duas condições:

- Equipamento novo e frio, com corrosão zero e tensões admissíveis na temperatura ambiente. Esta PMTA serve basicamente para determinar a pressão de teste hidrostático ou pneumático do vaso novo;
- Equipamento corroído e quente, descontando-se a espessura de corrosão e com tensões admissíveis na temperatura de projeto. Esta PMTA determina as condições de segurança do equipamento. A PMTA final do equipamento será a menor das pressões máximas de cada componente, medida no ponto mais alto (topo) do vaso[2].

## ENSAIOS UTILIZADOS PARA DETECÇÃO DE POSSÍVEIS IRREGULARIDADES

### ENSAIO HIDROSTÁTICO

O teste consiste na pressurização do vaso com um líquido até um nível de pressão estabelecido com base nas condições de projeto, cujo valor no ponto mais alto do vaso é denominado de "pressão de teste hidrostático" (PTH). Tem por principal finalidade a detecção de possíveis vazamentos, falhas ou defeitos em soldas, roscas, partes mandriladas e em outras ligações do próprio vaso ou em seus acessórios internos e externos ou se acarretará rupturas das juntas soldadas[8].

### ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Segundo Oliveiro são técnicas utilizadas nas indústrias na análise de falhas, que possuem a finalidade de detectar características e verificar propriedades mecânicas dos materiais. Caracteriza-se o ensaio não destrutivo aquele que não agride ou modifica a integridade do material, ou seja, são ensaios que, ao serem aplicados, não afetam ou causam prejuízo no funcionamento posterior da peça, total ou parcialmente[9].

Os END (Ensaios Não Destrutivos) são bastante utilizados em inspeções de materiais metálicos, em que seu uso pode auxiliar na identificação de falhas e descontinuidades que não são percebidas inicialmente a olho nu. Existem diferentes tipos de ensaios não destrutivos, como por exemplo: ultrassom, líquido penetrante, partículas magnéticas, inspeção visual, radiografia, correntes parasitas, entre outros. Esses ensaios possuem graus de dificuldade e equipamentos diferentes para serem realizados, o que acaba tornando-os específicos para cada situação aplicada.

## INSTRUMENTAÇÃO REQUERIDA EM UM VASO DE PRESSÃO

### VÁLVULA DE SEGURANÇA

Válvulas de segurança são utilizadas para serviços com fluidos compressíveis, como gases e vapores estas válvulas aliviam o excesso de pressão de forma rápida e instantânea, são importantes para garantir a segurança do operador, do equipamento e do local de instalação. Aliado a isso, todo vaso de pressão sujeito à pressão positiva superior a 15 psi é essencial a instalação de pelo menos uma válvula de segurança ajustada na pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) do vaso ou abaixo cuja capacidade de vazão seja igual ou superior ao volume do fluido fornecido[10].

No caso do equipamento em questão o cenário do alívio para que válvula é projetada com uma sob pressão de 10% em vasos de pressão, conforme as seções l e Vlll da ASME. A pressão de fechamento é cerca de 5 a 7% menor que a pressão de ajuste. A Imagem 4 demonstra a válvula de segurança utilizada em vasos de pressão[11].

**Imagem 4:** Válvula de segurança. **Fonte:** Referência[12].

A função de toda válvula de segurança instalada em vasos de pressão de processos industriais é aliviar a grande quantidade de pressão, devido ao aumento da pressão de operação acima de um limite pré-estabelecido no projeto do equipamento por ela protegido. As consequências de sua falha podem ocasionar a grandes eventos catastróficos, mortes, danos materiais e prejuízo financeiro[13].

### MANÔMETRO

É um instrumento que mede a pressão de fluidos em sistemas fechados, como vasos de pressão e tubulações.

Existem diversos tipos de manômetros, o principal tipo utilizado na indústria são os Manômetros metálicos ou Aneroides demonstrado na Imagem 5, que geralmente consistem em um tubo metálico, laminado, hermético, fechado em uma extremidade e enrolado em espiral. A extremidade aberta se comunica com o depósito que contém o fluido cuja pressão se deseja medir; então, ao aumentar a pressão no interior do tubo, este tende a desenrolar-se, e põe em movimento uma agulha indicadora frente a uma escala calibrada em unidades de pressão. Estes manômetros são para aplicações de 0,6 até 7000 bar[14].

**Imagem 5:** Manômetro. **Fonte:** Referência[15].

De acordo com a alínea "a" do subitem 13.3.1 da norma, a falta de um instrumento que indique a pressão de operação do vaso, constitui risco grave e iminente[3].

# Materiais e Métodos

O estudo de caso será realizado sobre um vaso de pressão disponibilizado por empresa especializada nesse ramo de atuação e de grande engajamento nesse segmento. A Imagem 6 demonstra como é realizado o diagnóstico do equipamento passo a passo.

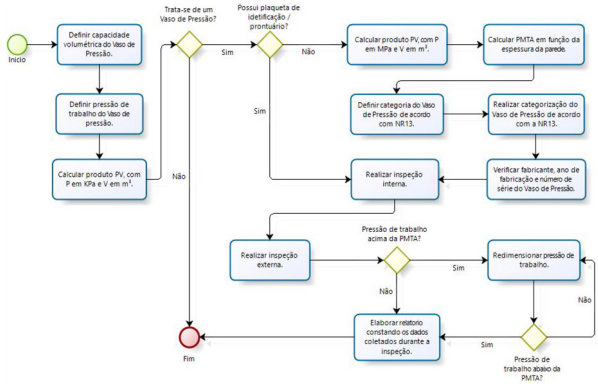



**Imagem 6:** Fluxograma do diagnóstico do equipamento. **Fonte:** Autoral

Antes de qualquer análise para readequação de um vaso de pressão conforme a norma regulamentadora, é necessário classificar o vaso segundo a norma vigente NR13, calcular a pressão máxima de trabalho (PMTA) em função da espessura da parede, categorizar o vaso e por fim realizar inspeções externas e internas que são obrigatórias e periódicas. Após estas etapas, caso seja necessário, o vaso é readequado para estar apto para operação dentro dos parâmetros estabelecidos em norma.

## ENSAIO ULTRASSOM

Para possibilitar realizar a readequação do vaso de pressão analisado, foi executado o teste de ultrassom. O teste em questão, consiste no uso de um aparelho demonstrado na Imagem 7, denominado Ultrasonic Thickness Gauge, em que inicialmente é realizada a medição de uma espessura padrão de 4,1mm, utilizada para checagem da calibração do aparelho.

**Imagem 7:** Ultrasonic Thickness Gauge. **Fonte:** Autoral

Após confirmada a calibração do instrumento, é realizada a aferição da espessura do vaso de pressão em pontos determinados, durante a avaliação inicial do vaso por meio de um transdutor conectado ao aparelho e um gel para minimizar os pontos de ar entre o transdutor e a parede do vaso, a fim de verificar as descontinuidades nas paredes do vaso causadas pelo uso contínuo do mesmo. A Imagem 8 ilustra como foram desenvolvidas as medições com o aparelho ultrassom e quais pontos são utilizados para o andamento do estudo.

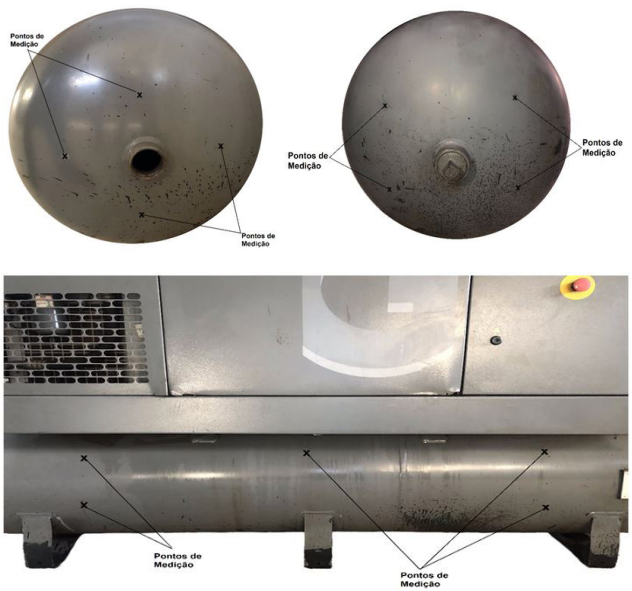



**Imagem 8:** Pontos de medição do vaso. **Fonte:** Autoral

Em casos nos quais o vaso não possui a plaqueta de identificação indelével, é possível utilizar a espessura obtida após a realização do teste de ultrassom, para definição da pressão máxima de trabalho admissível em que poderá ser submetido o vaso de pressão.

## TEMPERATURAS E PRESSÕES DE OPERAÇÃO, PROJETO E MÁXIMAS DE UM VASO DE PRESSÃO

Um vaso de pressão tem a sua operação dependente de temperatura e da pressão, e a possibilidade de qualquer vaso de pressão manter sempre a mesma pressão e temperatura por todo o seu ciclo de vida ou trabalho é raro podendo variar tanto acima ou abaixo do normal previsto para o equipamento. Considera-se pressão e temperatura de projeto os valores nas condições de projeto do vaso de pressão, ou seja, valores considerados em cálculos utilizados no projeto do vaso.

Adota-se a pressão de projeto a pressão correspondente às condições mais severas de pressão e temperatura coincidentes que possam ser previstas em serviço normal.

Segundo Telles, no caso de vasos projetados para pressão interna, é usual adotar-se para a pressão de projeto a maior dos seguintes valores:

- Pressão máxima de operação, acrescida de 5%, quando o dispositivo de alívio de pressão for operado por válvula piloto e 10% nos demais casos;
- 1,5 kg/cm², manométricos. A pressão máxima de trabalho admissível pode se referir a cada uma das partes de um vaso, ou ao vaso considerado como um todo[1].

As equações que calculam a PMTA são regidas pela mesma norma de projeto adotada para cálculo do vaso. Pela definição do código ASME, Seção VIII, Divisão 1 o cálculo da PMTA deve ser realizado em função das espessuras corroídas. Em que, Pc = PMTA de casco cilíndricos; Pt = PMTA de tampos semi esféricos; E = coeficiente de eficiência de solda; S = tensão admissível básica do material; R = raio interno do cilindro; t = espessura mínima para pressão interna.

$$Pc = SEt\,R + 0{,}6t \quad \text{(Eq.02)}$$

$$Pt = 2SEt\,R + 0{,}2t \quad \text{(Eq.03)}$$

Existem equações para diferentes tipos de geometria de vasos, podendo citar como exemplo a Equação 2, referente para cálculo para casco cilíndrico e a Equação 3, referente ao cálculo de tampos semiesféricos[16].

## INSPEÇÃO INTERNA E EXTERNA

Segundo norma, deve-se inspecionar todo o vaso de pressão tanto interno quanto externo para avaliar as conformidades e as não conformidades para o seguimento do estudo. A inspeção consiste em visualizar todo o

equipamento e relatar todas as informações encontradas. As verificações periódicas devem ser estipuladas conforme suas categorias e obedecendo aos parâmetros, sendo estes dependentes de duas situações: empresas que possuem SPIE (REQUISITOS PARA CERTIFICAÇÃO DE SERVIÇO PRÓPRIO DE INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS) e outras que não possuem. Essa certificação determina o prazo estipulado para cada inspeção interna e externa.

Após os cálculos finalizados e os dados encontrados é necessário a reconstituição do prontuário e a placa de identificação utilizando a menor pressão de trabalho máxima admissível, essa readequação deve atender ao processo ao qual o equipamento será submetido.

# Resultados e Considerações

**RESULTADOS DO ENSAIO ULTRASSOM**

A Imagem 9 abaixo apresenta as medições realizadas para detectar a espessura mínima do tampo e casco do vaso de pressão adotando o critério da necessidade de números de pontos em locais dispersos e facilidade de medição. As informações referentes à espessura do vaso de pressão foram encontradas por meio do ensaio ultrassom e são apresentadas na Tabela 1 a seguir.

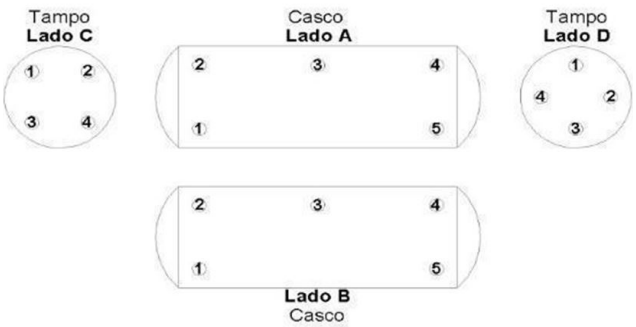



**Imagem 9:** Medições e número de pontos do casco e tampo. **Fonte:** Autoral

**Tabela 1:** Pontos de aferição do exame ultrassom. **Fonte:** Autoral

| Pontos | Aferições (mm) |
|---|---|
| A1 | 4,5 |
| A2 | 4,5 |
| A3 | 4,6 |
| A4 | 5,0 |
| A5 | 5,1 |
| B1 | 4,5 |
| B2 | 4,5 |
| B3 | 4,6 |
| B4 | 5,2 |
| B5 | 5,1 |
| C1 | 5,0 |
| C2 | 5,0 |
| C3 | 5,0 |
| C4 | 4,8 |
| D1 | 5,1 |
| D2 | 5,0 |
| D3 | 5,0 |
| D4 | 5,2 |

As marcações em amarelo são as medidas no casco, azul as medidas no tampo e a vermelha demonstra as menores medições encontradas.

## CÁLCULO DA PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL (PMTA)

Esse dispositivo está submetido a uma pressão de 10bar em uma área crítica com gases óxidos que dificultam a sua operação, danificando assim as paredes internas devido à diferença de pressão interna do vaso e externa do ambiente. Para que ele mantenha o devido funcionamento e seja adequado à norma NR13, é necessário que a PMTA seja dimensionada. Um dos principais problemas encontrados é a falta da placa de identificação indelével contendo as informações necessárias. Com isso, o método para definir a pressão máxima de trabalho admitida projetada inicialmente pelo fabricante, dá-se por meio de cálculos que envolvem o diâmetro interno, altura interna que são encontrados por meio do perímetro e a espessura do tampo e do casco do cilindro por meio dos resultados das mensurações realizadas no ensaio de ultrassom demonstrado na Tabela 1 e seu raio igual a 40 cm, esses resultados são encontrados, são anotados na Tabela 2. Após todos os dados encontrados é utilizadas as equações 2 e 3 para admitir o menor valor da PMTA. O equipamento é do tipo casco cilíndrico horizontal demostrado na Imagem 1 e tem o seu código de projeto segundo a norma ASME SEC. VIII DIV. 1

**Tabela 2:** Dimensionamento da PMTA. **Fonte:** Referência[1].

| Dimensionamento da PMTA | |
|---|---|
| De acordo com a tabela UCS - 23: | |
| Material do Casco e Tampo: | ASTM - SA 516 Grau 60 |
| S = tensão admissível ($MPa$) | 117,89 |
| S = tensão admissível ($kgf/cm2$) | 1202,12 |
| Ec = eficiência da Solda casco | 0,8 |
| Et = eficiência da Solda tampo: | 0,8 |
| D = Diâmetro interno ($cm$) | 80 |
| h = altura interna ($cm$) | 94 |
| K = ASME/VIII/1 | 1,1521544 |
| ($PMTA - Kgf/cm2$) | |
| 10,75 | 11,53 |

## RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO DO VASO

Todo vaso de pressão deve ser classificado conforme a sua classe, pressão máxima de trabalho admissível, volume, produto PV, grupo de risco e categoria. Essas informações não foram identificadas inicialmente e por esse motivo foram realizados cálculos com a utilização da Imagem 2. Classifica-se o equipamento por meio da NR13 com os resultados informados na Tabela 3

**Tabela 3:** Classificação do vaso. **Fonte:** Referência[3].

| | |
|---|---|
| Classe do fluido de armazenamento | C |
| PMTA (kgf/cm²) | Não consta |
| Volume (m³) | 0,472 |
| PV | 0,497 |
| Grupo potencial de risco | 5 |
| Categoria | V |

## RESULTADOS DO EXAME EXTERNO

No exame externo são avaliados os seguintes itens: integridade nas conexões, instrumentação, tais como, manômetro e válvula de segurança, regulagem do pressostato, placa de identificação, termômetro e purga. A Tabela 4 demonstra a situação desses itens determinados com a seguinte legenda: conforme, calibrado/conforme ou não possui.

**Tabela 4:** Exame externo. **Fonte:** Autoral

| Itens avaliados | Situação (Visual) |
|---|---|
| Integridades nas conexões | Conforme |
| Manômetro | Calibrado / Conforme |
| Válvula(s) de segurança | Calibrado / Conforme |
| Regulagem do pressostato (kgf/cm²): mín. / máx. | Calibrado / Conforme |
| Placa de identificação completa (reconstituída por outro profissional) | Não possui |
| Termômetro | Calibrado / Conforme |
| Purga | Não possui |

## RESULTADOS DO EXAME INTERNO

No exame interno serão avaliados os seguintes itens: integridade do casco, integridade do tampo dianteiro, integridade do tampo traseiro, integridade de soldas e corrosão nas chaparias. A Tabela 5 demonstra a situação desses itens determinados com a seguinte legenda: normal, regular ou ruim.

**Tabela 5:** Exame interno. **Fonte:** Autoral

| Itens avaliados | Situação (Visual) |
|---|---|
| Integridade do casco | Normal |
| Integridade do tampo dianteiro | Normal |
| Integridade do tampo traseiro | Normal |
| Integridade das soldas | Normal |
| Corrosão nas chaparias | Normal |

## RECONSTITUIÇÃO DO PRONTUÁRIO DO EQUIPAMENTO

Para reconstituição do prontuário é necessário realizar toda a identificação do vaso constando: identificação da empresa, o tipo do vaso, modelo/posição, fabricante, volume, número de série ou número de ordem se não possui, ano de fabricação/reconstituição e o código de projeto. Na Tabela 6, é apresentado o prontuário reconstituído do vaso de pressão, após todos os estudos realizados.

**Tabela 6:** Prontuário de identificação. **Fonte:** Referência[3].

| Identificação da empresa | Vaso de pressão 02235 |
|---|---|
| Tipo | Vasos de acumulação |
| Modelo/posição | Cilíndrico / Horizontal |
| Fabricante | Nada consta |
| Volume (m³) | 0,472 |
| N° de Série (N° de Ordem) | 02235 |
| Ano de Fabricação/Reconstituição | Nada consta / 2020 |
| Código de projeto | ASME/SEÇÃO VIII / DIV. 1 Ed. 2004 |

## RECONSTITUIÇÃO DA PLACA

Conforme a NR13, todo vaso de pressão deve ter visivelmente a sua placa de identificação indelével, de forma de que seja fácil o acesso e com, no mínimo constando as seguintes informações: fabricante; número de identificação; ano de fabricação; pressão máxima de trabalho admissível; pressão de teste hidrostático; código de projeto e ano de edição.

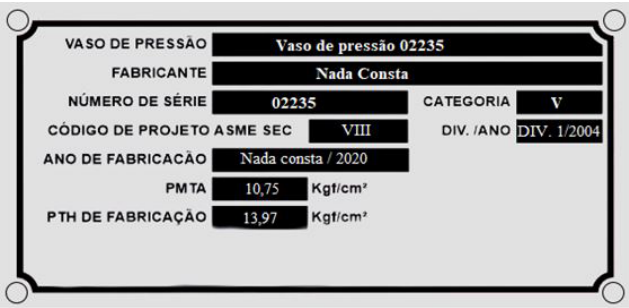



**Imagem 9:** Placa de identificação indelével reconstituída. **Fonte:** Autoral

A Imagem 9 mostra a placa de identificação reconstituída após a realização da coleta dos dados, realização dos cálculos necessários e definição das características do vaso de pressão.

# Conclusão

As atividades propostas foram realizadas e finalizadas por meio de inspeções internas e externas; ensaio ultrassom; e o dimensionamento da PMTA, obtendo-se a informação do material do vaso (ASTM - SA 516 Grau 60); eficiência das juntas soldadas (do casco 0,8 e do tampo 0,8); reconstituição do prontuário e placa de identificação.

A PMTA encontrada foi de 10,75 kgf/cm² ou 10,54 bar, logo, as condições de operação do vaso estudado se enquadram nas características de trabalho do vaso e possibilitam a operação com uma margem de segurança.

Por fim, houve êxito na reconstituição do prontuário, bem como o anexo deste na documentação do equipamento. A sua placa de identificação indelével exibe todas as informações necessárias para constar em um vaso de pressão

apto para o processo e, com isso, elimina a necessidade de redimensionamento da pressão de trabalho ou investimento em um novo vaso de pressão, gerando economia para a empresa e garantindo que esteja trabalhando com um vaso de pressão que se enquadra na norma vigente.

## Referências


1. Telles, P. C. das. Vasos de Pressão. p. 302, **1991**.
2. Falcão, C. PROJETO MECÂNICO VASOS de PRESSÃO E TROCADORES DE CALOR CASCO e TUBOS. p. 151, **2002**.
3. BRASIL, M. DO T. E E. Portaria 1082 de 18 de dezembro de **2018** - NR-13 Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento. v. i, n. 13, p. 1–2, **2018**.
4. Tecnol, U. et al. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Aplicação da Nr-13 Em Vasos De Pressão. n. 13, **2014**.
5. Física, D. Halliday, R. Resnick e K. S. Krane, Livros Técnicos e Cientifico S.A Fundamentos de Física.
6. Martins, F. J. S. Análise da Possibilidade de Crescimento Subcrítico de Descontinuidades Durante a Realização de Testes Hidrostáticos em Vasos de Pressão e Seus Possíveis Efeitos. p. 111, **2009**.
7. DA, S.; CEFET, F. Análise de Tensões em Vasos de Pressão através do Método de Elementos Finitos.**2014**.
8. Filho, J. D. S. P. Análise de efeitos de teste hidrostático em vaso de pressão. p. 115, **2004**.
9. Oliveira, M. J. de. Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não-destrutivos. **2014**.
10. Disserta, M.; MEC, E. Marcos José Babilonia Pérez. Estudo do comportamento dinâmico de uma válvula de alívio de pressão do tipo mola.**2016**.
11. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEER., ASME VIII divisão 1 e divisão 2.New York, **2017**.
12. Válvulas de Segurança – ABERKO. Disponível em: https://www.vasosdepressao.com.br/valvulas-seguranca.php. Acesso em: 07 de outubro de **2020**.
13. Mathias, A. C. VÁLVULAS DE SEGURANÇA. v. 4777, n. 27, p. 1–52, [s.d.].
14. Marítima, P.; Marítima, P. de. PRESSÃO E TUBULAÇÕES EM UNIDADES DE. **2018**.
15. Turotest. Disponível em: http://turotest.com.br/pt-produtos/manometro-para-bombas-e-compressores-cod-300147/. Acesso em: 07 de outubro de **2020**.
16. Torquato, H. M. et al. PROJETO DE INVESTIGAÇÃO E AVALIAÇÃO. **2019**.



**Eduardo S. Fernandes*, Fernando C. S. Rocha, Luiz G. S. Fernandes, Fábio S. Gomes & Rosemberg F. N. Rodrigues**

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: eduardo.silva2188@hotmail.com

# Revisão Sistemática sobre Alternativas de Reciclagem de Alumínio e suas Ligas

Juliano L. Navarro, Leonardo A. Lopes, André P. Silva, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Rosemberg F. N. Rodrigues

O setor de produção de alumínio primário, no Brasil, apresenta um grande valor econômico. O objetivo deste foi desenvolver uma revisão bibliográfica sistemática, para relatar a viabilidade na utilização dos processos de moagem de alta energia e metalurgia do pó como uma alternativa de reciclagem de alumínio e suas ligas. Limitaram-se se as buscas em 20 anos, nas bases *Science Direct e Web of Science*, e por meio da ferramenta StArt foi dividido em 3 filtros. Determinou-se a importância dos processos estudados em produzir materiais secundários com propriedades semelhantes às dos primários, tornando-se cadeias produtivas, econômicas e sustentáveis.

**Palavras-chave:** *sustentabilidade; moagem de alta energia; metalurgia do pó; meio ambiente.*

The primary aluminum production sector in Brazil has great economic value. The objective of this was to develop a systematic bibliographic review, to report the feasibility in the use of high energy grinding processes and powder metallurgy as an alternative for recycling aluminum and its alloys. Searches were limited to 20 years, based on Science Direct and Web of Science, and through the StArt tool, it was divided into 3 filters. It was determined the importance of the studied processes in producing secondary materials with properties similar to those of the primary ones, becoming productive, economical and sustainable chains.

**Keywords:** *sustainability; high energy grinding; powder metallurgy; environment.*

# Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores de alumínio primário no mundo, apresentando uma produção média em 2017 de 802 (mil toneladas), com um faturamento de 65,4 bilhões e sendo responsável por uma participação de 1% no PIB e 5,4% no PIB industrial. Nesse sentido, tal matéria-prima gerou, no mesmo ano, 414877 empregos diretos e indiretos[1]. Entretanto, a produção de alumínio primário exige uma enorme quantidade de energia, em 2018 consumiram-se 15,919 kwh/tonelada na América do Sul e emitiram-se 64,335 kt $CO_2E$ globalmente[2]. Em 2007, a produção de alumínio global foi responsável por emitir o equivalente a 1% das emissões de gases de efeito estufa[3]. Na qual, cerca de 90% de tais emissões foram causadas por processos que envolvem fundição[4].

Logo, o processo de reciclagem tem um papel muito importante para a indústria do alumínio, visto que esse processo se beneficia de apenas 5 - 10% da energia necessária para a produção do produto primário e emite somente 5% dos gases de efeito estufa (GEE)[5]. Nesse segmento, em 2016, o Brasil apresentou uma relação entre sucata recuperada e consumo doméstico de 51,6%, ficando apenas atrás do Reino Unido e acima da média mundial de 27,1%. Entre 2003 e 2017, 97,3% de latas de alumínio para bebidas foram recicladas fortalecendo tal economia para o país[1].

No entanto, a reciclagem é realizada, principalmente, por refusão do material, na qual naturalmente com o tempo a demanda por energia de produção do material secundário por esse processo acabe que dobrando, uma vez que a matéria prima apresentará variações com novas tecnologias no mercado[6]. Deste modo, o processo convencional apresenta como principais desvantagens o alto custo com energia, perdas de alumínio, devido a oxidação no processo, em que podem chegar a 38% se não utilizar fornos de indução, emissão de gases prejudiciais para o meio ambiente e redução da eficiência energética da cadeia produtiva[7,8].

Portanto, processos como moagem de alta energia e metalurgia do pó são muito importantes para o tema em questão, uma vez que apresentam em suas etapas soluções criativas para diminuir gastos com energia térmica e a liberação de GEE. A importância da metalurgia do pó hoje é vista por meio da aplicação de manufatura aditiva em linhas de produção, com a tendência da Indústria 4.0 vem ganhando espaço em vários setores industriais, além disso tal processo está se popularizando na área de impressão 3D-metálica, uma vez que suas etapas permitem esta aplicação. Assim, é possível observar a relevância desta metodologia e como a obtenção de matéria-prima secundária para as aplicações citadas e outras poderiam ajudar a eficiência econômica e ambiental de uma indústria que depende desta técnica.

## METALURGIA DO PÓ

A metalurgia do pó pode ser definida como uma técnica metalúrgica para a fabricação de componentes metálicos, não metálicos e cerâmicos, os quais têm apresentado enorme desenvolvimento tecnológico e em crescente expansão, conquistando espaço não somente nos variados ramos daindústria, como também em centros de pesquisa e universidades[9].

A popularidade desta técnica esta relacionada com a simplicidade do seu processo e por sua produção econômica em série, uma vez que está técnica é capaz de fabricar peças com geometrias complexas e próximas ao formato final, sendo muitas vezes sem a necessidade de operações posteriores ou acabamento, além de ser, em casos específicos, a única alternativa viável para confecção de certos materiais, visto que podem ser impossíveis ou muito difíceis de serem obtidos pelo processo tradicional[10,11]. Logo, trata-se de uma metodologia utilizada principalmente como rota alternativa para materiais que apresentam alto ponto de fusão, cujo processo de fundição iria gerar um alto gasto com energia térmica[12].

Nesta técnica, a principal característica que a distingue de outros métodos de fabricação é a forma como seu processo ocorre, pois, na metalurgia do pó, a matéria prima pode se manter em estado sólido durante toda a cadeia produtiva. No entanto, em alguns casos, a presença parcial de fase líquida também pode ser comum devido à composição elementar utilizada na mistura[13].

Sendo assim, o processo de metalurgia do pó pode ser consistido em basicamente três etapas fundamentais, como

apresentado na Figura 1, sendo a obtenção e preparação dos pós, na qual é feita a redução e/ou mistura de partículas, seja a partir de metais puros ou sucatas, para obter uma composição uniforme dos pós; a compactação, em que é aplicado uma pressão para conformar o pó na geometria desejada a partir de um molde e, por último, a sinterização, que promove a ligação metalúrgica do compacto[14]. Porém, dependendo do produto que se deseja fabricar e da qualidade da matriz utilizada para compactação, etapas complementares como calibragem, impregnação ou tratamento térmico são necessários para que o material alcance os resultados finais desejados[15].

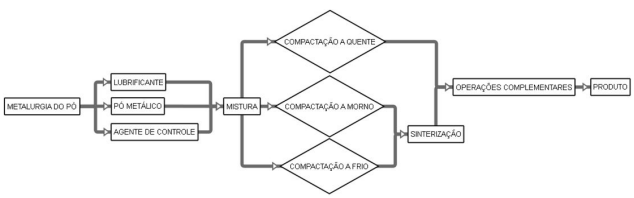



**Figura 1:** Fluxograma do processo da metalurgia do pó. **Fonte:** Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009 (Adaptado).

Nesse sentido, o processo de sinterização é responsável por diminuir a carga térmica consumida por esta técnica em relação a processos convencionais como a fundição. Trata-se de uma etapa na qual a temperatura chega na ordem de 2/3 a 2/3 da temperatura de fusão do material dependendo principalmente do estado da sinterização, sendo auxiliada por uma fase líquida ou ocorrendo por difusão em uma fase sólida[15,16]. Além disso, a principal complicação do processo é a presença ou não de uma atmosfera protetora no forno, por que ajuda a evitar oxidações superficiais no material aumentando o nível de porosidade. No caso do alumínio, devido ao material apresentar alta afinidade pelo oxigênio é comum a utilização de uma atmosfera inerte de nitrogênio seco[17].

Entretanto, a matéria-prima para este tipo de conformação é o pó metálico, e a sua obtenção depende principalmente de processos como a moagem, ajudam a quebrar o material sólido diminuindo a sua granulometria e ajudando posteriormente a obter resultados satisfatórios na metalurgia do pó, como o aumento da densidade e de algumas propriedades mecânicas à medida que o material apresenta uma menor partícula[18].

## MOAGEM DE ALTA ENERGIA

A moagem de alta energia é um processo destinado àfragmentação e/ou à mistura de componentes elementares, na qual, por meio da ativação mecânica, estes materiais passam por uma série de reações, caracterizada por uma frequente transferência de energia com ação simultânea entre atrito, abrasão e compressão, de modo que possibilite uma mistura mais homogênea e controlada[12].

Nestes moinhos de alta energia, o processo consiste normalmente em submeter o material a um ciclo de deformação de quatro etapas, conforme apresentado na Figura 2, sendo a primeira etapa uma fase em que as partículas sofrem deformação plástica devido à ocorrência das primeiras colisões, resultando em partículas achatadas. No segundo momento, estas partículas passam por um aumento de tamanho, ocasionado pela soldagem a frio no momento em que duas ou mais partículas são unidas pelo impacto entre os agentes moedores. No terceiro momento, com o decorrer do tempo de moagem, as partículas começam a diminuir por fratura, pois com este tempo, elas se tornam mais resistentes e o encruamento ocorre devido ao aumento do número de discordâncias na microestrutura do material. Com isso, as partículas se tornam cada vez mais frágeis e, ao atingirem seus limites de ruptura, passam por uma fragmentação, resultando em mais partículas. Na última etapa, o equilíbrio entre soldagem e fratura é atingido, causando uma estagnação na redução destas partículas e assim homogeneizando a mistura[19]. No entanto, os efeitos específicos que a moagem de alta energia pode oferecer ao material varia de acordo com o tipo de elemento e tipo de moagem utilizado, pois este processo abrange diversos tipos, e com eles vários parâmetros dependentes entre si, na qual buscam atender aos mais variados tipos de materiais, visto que estes podem sofrer alterações conforme suas propriedades específicas reagem ao ambiente de moagem[20].

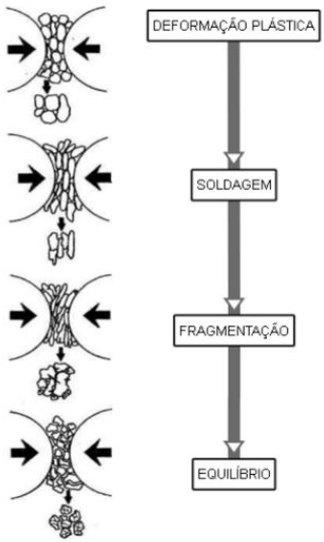



**Figura 2:** Processo de moagem de alta energia. **Fonte:** Leite, D. W., 2010 (Adaptado).

Apesar de toda esta complexidade, a moagem de alta energia ainda é o processo que melhor atende à metalurgia do pó, já que é o método mais comum para obtenção de pós elementares, e que permite uma variedade de possibilidades para a técnica de consolidação de pós, visto que é capaz de produzir microestruturas ultrafinas e com combinações de materiais que normalmente seriam incompatíveis pelo processo convencional devido seus diferentes pontos de fusão[21,22]. Além disso, trata-se de uma metodologia que também conta com o rigoroso controle da combinação elementar, a possibilidade de obter uma variedade de morfologias do grão e o tamanho controlado de partícula, sendo este último a característica de maior relevância, pois, quanto menor for o tamanho de partícula e maior for a distribuição homogênea, melhor é a qualidade de processamento nas etapas de compactação e sinterização, na metalurgia do pó[23].

Portanto, por meio dos temas apresentados este trabalho tem como objetivo desenvolver uma revisão bibliográfica sistemática, com o intuito de relatar por meio das publicações selecionados, se é viável a utilização dos processos de moagem de alta energia e metalurgia do pó como uma alternativa de reciclagem de alumínio e ligas de alumínio, na qual possa substituir a metodologia por fundição. Para tanto destacando-se as principais publicações em um período de 20 anos, principais periódicos, metodologias utilizadas, principais autores, regiões que geraram mais publicaçõese uma síntese dos resultados fundamentais de cada autor catalogado.

# Metodologia

Para esta revisão bibliográfica sistemática utilizou-se como guia o material de Conforto, C. E. *et al*. (2011), por que sofreu adaptações com o intuito de atender às necessidades deste trabalho[24]. Portanto, definiu-se em primeiro instante o objetivo geral do trabalho para ser usado como solução da problematização apresentada na introdução e como base de análise dos artigos encontrados nas buscas. Desta forma, as buscas por trabalhos que correlacionassem com o tema proposto por este artigo foram realizadas na base de dados Science Directe Web of Science, por apresentarem em suas estruturas de pesquisa mecanismos que destaquem e filtrem publicações relevantes ao tema. Logo, realizou-se uma busca preliminar por fontes (artigos) no Science Direct, com o intuito de verificar as principais palavras-chave utilizadas pelos autores, assim este processo ajuda a refinar a pesquisa diminuindo a quantidade de trabalhos, mas concentrando os mais relevantes para o tema. Durante o processo utilizaram-se formulações de termos e operados como: “recycling; aluminium; high energy grinding”, “recycling AND aluminium AND powder metallurgy” e “recycling AND aluminium AND high energy grinding AND powder metallurgy”. Assim, definiu-se a string de busca, na qual funcionasse corretamente com os operadores lógicos AND e OR, além de ser aplicável em ambas bases. Tal string se limitou a apresentar termos como, reciclagem (recycling), sucata de alumínio (aluminium scrap), moinho de alta energia (high energy grinding), moinho de bolas (ball mill) e metalurgia do pó (powder metallurgy). Vale ressaltar, que para pesquisa por publicações filtraram-se somente artigos científicos de língua inglesa, além de limitar o período de busca em 20 anos.

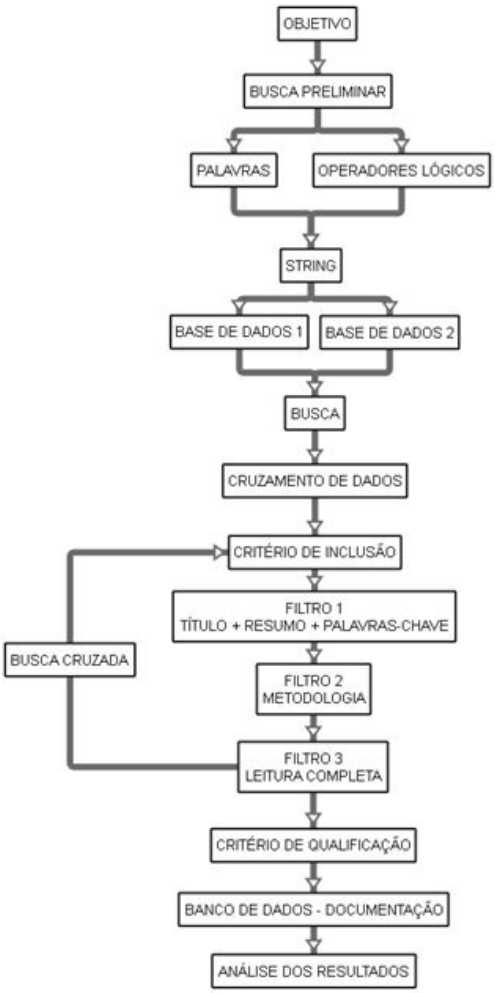



**Figura 3:** Fluxograma da metodologia. **Fonte:** Autores.

Após a busca, com a ajuda da ferramenta StArt realizou-se um cruzamento de dados de ambas bases com o propósito de verificar a possível duplicação de trabalhos, para então diminuir a quantidade de publicações analisadas durante a aplicação dos critérios de inclusão. A Figura 4 apresenta esta etapa e a de seleção dos artigos por meio do uso do programa StArt, sendo que este fluxograma foi desenvolvido com cunho educativo exibindo as principais seções da ferramenta.

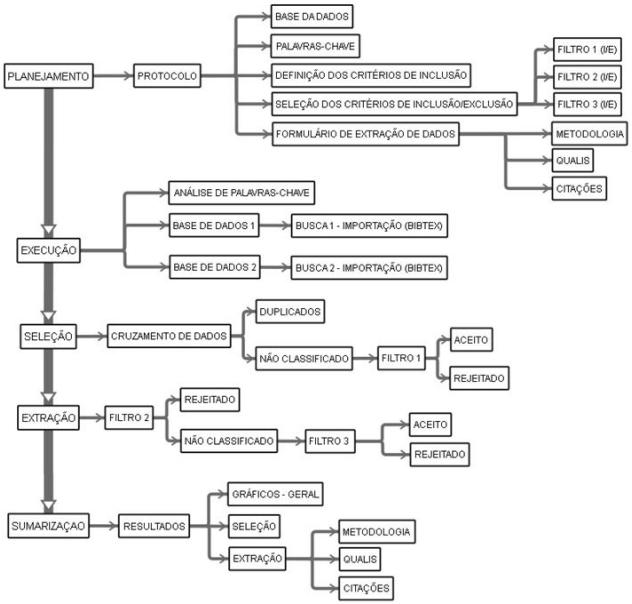



**Figura 4:** Fluxograma do procedimento na ferramenta StArt. **Fonte:** Autores.

Nesse sentido, como critério de inclusão buscou-se filtrar as publicações por 3 filtros distintos, conforme apresentados no fluxograma da Figura 3. No primeiro filtro executou-se a leitura do título, resumo e palavras-chave, com o intuito de identificar semelhança entre o objetivo da revisão sistemática e o apresentado no artigo. No segundo, realizou-se a leitura da metodologia dos artigos selecionados, objetivando escolher produções científicas que demonstrassem uma parte experimental mais elaborada, dando ênfase aos trabalhos que abordassem análise de dados econômicos do processo. Por fim, no terceiro filtro, verificaram-se os artigos selecionados por meio de uma leitura completa com o propósito de analisar se os resultados e conclusões, se interligam à proposta da metodologia definida pelo autor. Além disso, durante está etapa estudaram-se os critérios de qualificação como a quantidade de citações, qualidade do periódico, ano de publicação, variabilidade de amostragem do experimento e H-Index da autoria. Para a aplicação de ambos critérios, utilizou-se a ferramenta StArt, que facilita a separação dos artigos em cada fase, além de proporcionar

melhor análise dos trabalhos finais desta revisão. Nesse sentido, esta ferramenta, conforme exibe a Figura 4, é dividida em 5 seções, sendo eles o planejamento, execução, seleção, extração e sumarização. O planejamento define a base estrutural da revisão sistemática, na qual são determinados as bases de dados e os critérios de inclusão. Já a execução é a etapa de importação de dados de cada base, apresentando o resultado bruto. Por outro lado, a seleção e extração representam a primeira e última etapa de aplicação dos critérios de inclusões, respectivamente. Por fim, a sumarização exibe o resumo gráfico e em forma de mapas mentais, dos resultados da seleção dos artigos de cada etapa.

Assim, ao final do processo de inclusão, realizou-se nos artigos selecionados uma busca cruzada, na qual objetivou-se identificar no referencial bibliográfico, de cada trabalho, possíveis materiais que passaram despercebidos pelos procedimentos de busca. Nesse sentido, analisou-se cada referência de acordo com os filtros determinados nesta metodologia.

**Tabela 1:** Formulário para banco de dados. **Fonte:** Autores.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Filtro | | Quantidade de artigos encontrados | | Quantidade de artigos excluídos | |
| Data de busca | | Quantidade de artigos selecionados | | Taxa de aproveitamento | |

| | Encontrados | Filtro 1 | Filtro 2 | Filtro 3 |
|---|---|---|---|---|
| Ano | Quantidade de artigos | Selecionados | Selecionados | Selecionados |

Portanto, desenvolveu-se o formulário apresentado na Tab. 1 com a finalidade de identificar e resumir o número de artigos excluídos e a taxa de aproveitamento de cada estágio pós cruzamento de dados. Além disso, com a ajuda do Mendeley documentou-se o material aprovado no filtro 1, por que facilita a leitura das publicações exigida pelos próximos filtros, de modo que para cada filtro excluíam-se os artigos rejeitados. Logo, com a finalização do processo de busca, análise e documentação, desenvolveu-se uma síntese dos resultados obtidos do processo de seleção, além disso relatou-se dados como quantidade de publicações por ano de cada base, periódicos importantes para o tema, principais autores, países que mais publicaram a respeito do tema, principais metodologias utilizadas, foco dos resultados das pesquisas científicas selecionadas e análise econômica do processo experimental utilizado pelos autores, buscando identificar se as metodologias apresentam viabilidade econômica como um novo processo de reciclagem de ligas de alumínio.

# Resultados

Por meio da busca preliminar no Science Direct,foi possível definir a string resultante para uso nas bases de dados, na qual as combinações de termos e operadores lógicos “recycling; aluminium; high energy grinding”, “recycling AND aluminium AND powder metallurgy” e “recycling AND aluminium AND high energy grinding AND powder metallurgy”, resultaram em 2860, 1649 e 359 publicações encontradas, respectivamente. Durante esta pesquisa prévia, observou-se que a redução de artigos ajudou a concentrar trabalhos mais relevantes para esta revisão, uma vez que nas primeiras buscas foram encontradas pesquisas científicas que desvinculavam do tema proposto. Portanto, o refinamento no início resultou na string “recycling AND aluminium scrap AND (high energy grinding OR ball mill) AND powder metallurgy”, cujo sintetiza todos os principais termos encontrados em artigos da pesquisa prévia.

Nesse sentido, como resultado das buscas em ambas bases de dados, foram encontradas ao todo 829 publicações em um período de 20 anos, sendo 127 (15%) do Science Direct e 702 (85%) da Web of Science. Assim, por meio do Gráfico 1 é possível analisar a quantidade de publicações por ano de cada base de dados, com o objetivo de avaliar a evolução de produções científicas pelo o período determinado. É importante destacar que ambas as buscas foram finalizadas e atualizadas até a data de 22 de maio de 2020.

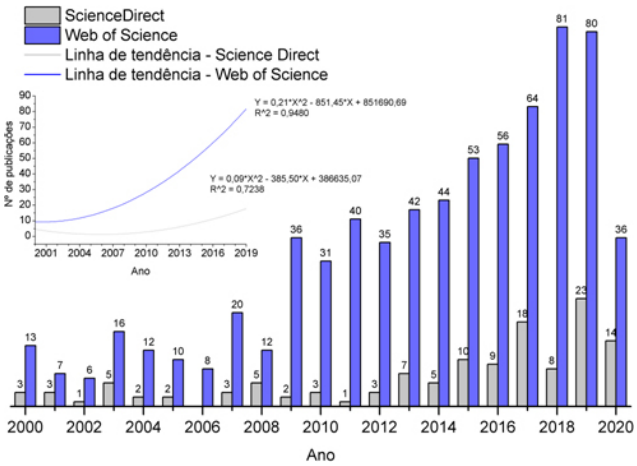



**Gráfico 1:** Resultados dos artigos encontrados (Ano $\chi$Nº de publicações). **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

Ao analisar o Gráfico 1, verificou-se que, em apenas no período de 10 anos a quantidade de publicações encontradas do Science Direct equivaleu-se a 98 trabalhos de 127, retratando 77% da quantidade encontrada.

Já na Web of Science, o mesmo período foi responsável por produzir 531 publicações equivalendo a 76% dos 702 trabalhos encontrados, contudo 4 vezes mais que na primeira base. Portanto, tal análise estatística além de revelar a diferença de resultados entre ambas bases de pesquisa, demonstra que o tema em questão apresenta importância científica para o mercado atual, uma vez que preocupações ambientais e econômicas estão se tornando mais imponentes no setor industrial nos últimos 10 anos. Além disso, o gráfico exibe o resultado das linhas de tendência de ambas bases, em que foi desenvolvida a curvatura do crescimento de produções científicas (2000-2019) do tema desta revisão, sendo representado por um polinômio de segundo grau. Logo, por meio deste estudo, observa-se a evolução na quantidade de publicações científicas por ano, na qual a Web of Science apresentou uma taxa de crescimento média de 22,38%, já o Science Direct entre 2000 e 2006 a taxa de crescimento média resultou em 24,76% e entre 2007 e 2019 exibiu um resultado de 47,44%. Este resultado é comprovado pelos coeficientes de determinação, da qual para o Web of Science apresenta um valor de 0,9480, mas para o Science Direct exibe um valor de 0,7238, pois seus dados apresentam valores iguais. É importante realçar que até o momento de finalização deste trabalho, o ano de 2020 ainda exibe dados incompletos, justificando a brusca queda em relação ao período anterior e a não inclusão na análise sobre a taxa de crescimento.

Entretanto, a quantidade de produções científicas encontradas ainda é considerada baixa para o período de 20 anos. Outro ponto importante a ser examinado é o ano de 2006 no Sience Direct, em que não foram encontradoas publicações a respeito do tema, mas em comparação ao ano anterior e posterior a diferença de trabalhos se torna mínima na mesma base de dados.

Desta forma, com a ajuda da ferramenta StArt, o cruzamento de dados de ambas bases resultou em 5 materiais duplicados, tal conclusão fez com seja necessário o estudo de 824 publicações. Nesse sentido, o Gráfico 2 apresenta os principais periódicos utilizados pelas publicações científicas encontradas, mesclando ambas as bases.

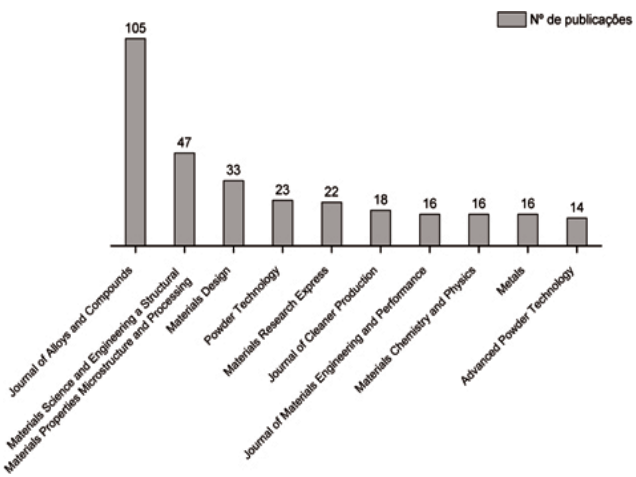



**Gráfico 2:** Resultados dos principais periódicos. **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

Nesse segmento, ao examinar o gráfico acima verificaram-se os 10 mecanismos para publicação que mais receberam trabalhos sobre o tema analisado nesta revisão bibliográfica sistemática. Além dessa análise, a Tab. 2 identifica a classificação Qualis Capes de cada periódico na área de Engenharia III. Tal classificação foi obtida por meio da plataforma Sucupira, com o propósito de facilitar o trabalho de futuros autores em localizar periódicos com um grande banco de dados a respeito do tema desta revisão.

**Tabela 2:** Classificação Qualis/Capes dos periódicos. **Fonte:** Autores (Plataforma Sucupira).

| Periódico | Qualis Capes |
|---|---|
| Journal of Alloys and Compounds | A2 |
| Materials Science and Engineering a Structural Materials Properties Microstructure and Processing | A2 |
| Materials & Design | A1 |
| Powder Technology | A1 |
| Materials Research Express | B1 |
| Journal of Cleaner Production | A1 |
| Journal of Materials Engineering and Performance | B1 |
| Materials Chemistry and Physics | A1 |
| Metals | B1 |
| Advanced Powder Technology | A2 |

Portanto, ao estudar ambos os resultados percebeu-se uma grande concentração de publicações no periódico "Journal of Alloys and Compounds", por que apresenta uma classificação A2 e é responsável por 12,74% das publicações encontradas. Já os periódicos que exibem a maior classificação (A1) como "Materials Design", "Powder Technology", "Journal of Cleaner Production" e "Materials Chemistry and Physics" resultaram em uma participação, em relação aos 824 artigos, de 4, 2,79, 2,18 e 1,94%, respectivamente.

Assim, por meio das bases de dados, este trabalho realizou um estudo a respeito das principais regiões do mundo que mais apresentam número de produções científicas envolvendo os assuntos apresentados nesta revisão, o objetivo é identificar possíveis correlações entre o âmbito acadêmico e dados econômicos do setor industrialde alguns países. O resultado dessa observação é apresentado no Gráfico 3.

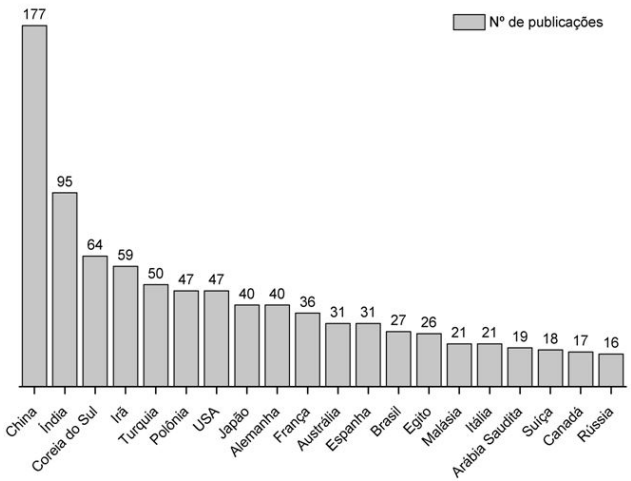



**Gráfico 3:** Resultados das principais regiões por publicação. **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

É importante ressaltar que nesta análise a região é determinada por autoria e não por publicação diretamente, logo um único trabalho pode apresentar várias regiões de acordo com a quantidade de autores e seus respectivos países. Entretanto, é possível determinar uma analogia com a quantidade exata de trabalhos encontrados nas buscas. Nesse sentido, ao estudar o Gráfico 3 a China foi responsável por apresentar 21,48% das publicações encontradas. Ao correlacionar esses resultados com dados econômicos do país no setor de produção de alumínio primário, observou-se que esse apresentou uma escaladana produção deste material a partir da entrada do século XXI, constatando em 2009 uma participação global na produção de alumínio primário de 36%, além de um crescimento do setor de 19% entre 2002 e 2010[25]. Além disso, a China, em 2010, representou uma participação de 41,3% no consumo de alumínio no mundo, demonstrando a importância deste material para o país[26]. Entretanto, a relação entre o consumo doméstico e o material reciclado posiciona o país abaixo da média mundial de 27,8%, em 2017[1]. Logo, a combinação desses dados econômicos e o fato de o país

apresentar números extravagantes em relação à emissão de GEE, demonstra a preocupação da China em encontrar meios alternativos, sustentáveis e eficientes que envolvam a produção e reciclagem de alumínio. Além disso, outro dado relevante é a participação do país em publicação de produções científicas na área de ciência dos materiais, somente entre 2004 e 2008, foi responsável por 20,84% na contribuição de publicações mundiais[27].

Já a Índia resultou em uma participação de 11,53% das 824 publicações encontradas. Nesse sentido, o país vem apresentando crescimento constante no setor de produção de alumínio primário, no qual entre 2002 e 2010, houve um aumento de 11,41%, contudo em uma escala abaixo do que foi apresentado pela China[26]. Por outro lado, a relação entre consumo doméstico e material reciclado apresentou uma taxa, em 2017, de 30,7%, estando acima da média mundial[1]. No entanto, o que mais justifica o posicionamento do país no Gráfico 3 é alavancada na participação de publicações científicas mundial, da qual somente em 2016 o mesmo ficou em terceiro lugar com 4,8% das produções científicas no mundo. Outro dado relevante é o crescimento em produções científicas anual entre 2006 e 2016, em que exibiu 11,1%. Portanto, esses dados, demonstram como a Índia vem crescendo dentro do ambiente acadêmico em várias áreas que envolvem pesquisa e desenvolvimento[28].

Por outro lado, o USA, Japão e Alemanha, um trio importante para a economia mundial, apresentaram uma participação de 5,70, 4,85 e 4,85%, respectivamente. Logo, ao estudar os dados econômicos do setor de produção e reciclagem de alumínio nesses países, observou-se que a Alemanha e o USA apresentaram um decrescimento na produção de alumínio primário de -6,09 e -5,48%, respectivamente, entre 2002 e 2010[26]. Mas, a relação entre sucata recuperada e consumo, em 2017,resultou em 23,7 e 41,9%, respectivamente, cujo a Alemanha ficou abaixo da média mundial, diferente do Japão que apresenta esta relação com um resultado de 33,2%[1]. Contudo, o que mais destaca esses países no Gráfico 3 é o consumo de alumínio primário, no qual o USA, Japão e Alemanha apresentaram em 2010 uma participação global de 10,3, 5,3 e 4,5%, respectivamente, sendo o trio responsável por 20,1%, representando quase metade da participação da China no mesmo ano[26]. Além disso, este trio é responsável por uma grande participação no número de desenvolvimento de publicações científicas, por que em 2016 resultaram em uma contribuição de 26,5%, na qual somente o USA equivaleu a 17,8%[28]. Logo, este estudo revela o fluxo do alumínio nestes países, os quais demonstraram-se mais preocupados em importar e reciclar este material, do que produzi-los em escalas industriais, gerando grande consumo energético para o país.

Por fim, o Brasil foi responsável por apresentar uma taxa de 3,28% de participação nas 824 publicações estudadas. Além dos dados econômicos, apresentados na introdução, justificarem a importância do tema para o país, é relevante expor o fato que a indústria de alumínio é responsável por 6% da energia consumida. Assim, por meio dos trabalhos analisados é possível demonstrar que maioria das publicações de autores brasileiros se preocupem em definir metodologia eficientes economicamente e energeticamente[26].

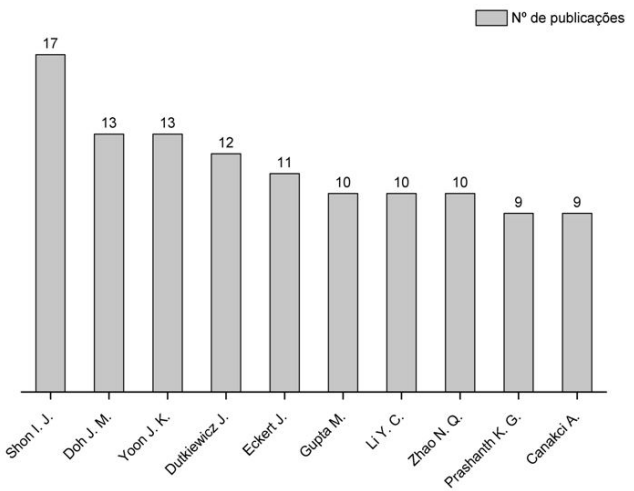



**Gráfico 4:** Resultado dos principais autores. **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

Portanto, além da análise de regiões, outro resultado obtido pelas bases de dados é o estudo dos 10 autores que mais apresentaram publicações entre os trabalhos encontrados, conforme apresenta o Gráfico 4. Esta observação permite identificar autorias que são importantes para o tema proposto nesta revisão, de modo que ajuda a apontar materiais promissores para a análise de resultados. Assim, foram analisadas mais de 2000 autorias, entre os autores principais, Shon I. J apresentou uma participação, entre os 824 artigos estudados, de 2,06%, seguido de Doh J. M. e Yoon J. K. que apresentaram a mesma porcentagem de 1,58%. Por conseguinte, esta pesquisa exibe a enorme diversidade de autores que este tema exibe, já que a quantidade de publicações por autores é relativamente baixa em comparação à quantidade de trabalhos encontrados, possibilitando encontrar possíveis variações de metodologias a serem estudadas.

Em vista disto, com apuração da aplicação dos critérios de inclusão, o Gráfico 5 resume os resultados de cada etapa de filtragem, apresentando a relação entre a quantidade de publicações escolhidas por filtro e os seus respectivos anos de publicação. É por meio deste gráfico que é possível verificar a evolução da aplicação dos critérios de inclusão durante o estudo de seleção por meio da ferramenta StArt.

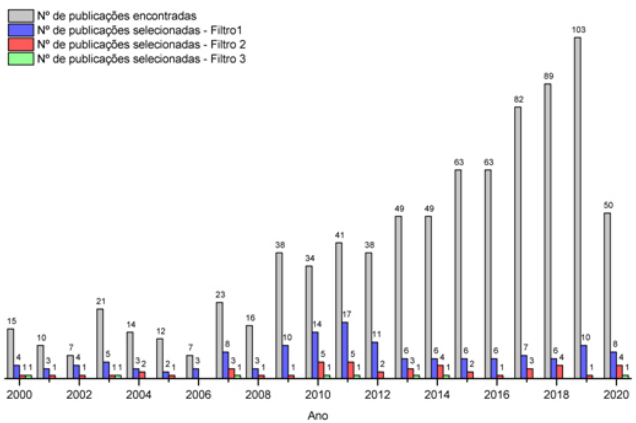



**Gráfico 5:** Resultados das publicações selecionadas. **Fonte:** Autores.

A partir do Gráfico 5, o filtro 1 obteve como resultado 142 artigos selecionados dos 824 encontrados pós cruzamento de dados, totalizando uma taxa de aproveitamento de 17,23%. Todas publicações escolhidas apresentaram título e objetivo que condizem com o tema proposto neste trabalho, mas poucas foram muito específicos com a proposta desta revisão. Nesse sentido, ao analisar o gráfico, percebe-se que os trabalhos inclusos estão bem distribuídos ao longo dos 20 anos de publicação, de modo que os últimos 10 anos foram responsáveis por 58,45% dos artigos selecionados.

Por conseguinte, seguindo os critérios de inclusão analisou-se a metodologia dos trabalhos escolhidos, e a aplicação do segundo filtro resultou, conforme o Gráfico 5 exibe, na exclusão de 96 publicações científicas a qual gerou uma taxa de aproveitamento de 32,39%. Entre os materiais catalogados, os anos de 2000, 2003, 2014 e 2020 foram os que mais apresentaram trabalhos promissores para análise final, apresentando metodologias mais coerentes com a proposta deste trabalho. Assim, é importante ressaltar, que a exclusão de 96 publicações ocorreu devido ao procedimento experimental apresentados pelos autores não coincidir com a ideia desta revisão, uma vez que foram encontrados nestes trabalhos processos de conformação diferentes da metalurgia do pó, como forjamento e uso de processos de soldagem, além de metodologias que envolviam apenas etapas de moagem e obtenção do pó metálico para usoem ligas metálicas, destinados a aplicações específicas.

Para o filtro 3, a leitura completa das publicações inclusas resultou na seleção de 8 artigos científicos exibindo uma taxa de aproveitamento de 17,39% e 0,97% das 824 produções científicas estudadas. Durante este estudo, encontraram-se trabalhos que apresentavam análise experimentais similares, mas com materiais diferentes. Logo, prevaleceu-se a seleção de publicações com uma classificação maior durante a aplicação dos critérios de qualificação. Nesse sentido, os artigos catalogados do número 1 ao 8 da Tab. 3, passaram pelo processo de busca cruzada com o objetivo de verificar o referencial teórico em busca de trabalhos promissores, na qual foram examinadas, ao todo, 234 referências, sendo que, somente duas passaram (9 e 10 – Tab. 3) pelos três filtros determinados

na metodologia, resultando em uma taxa de aproveitamento de 0,85%. O que se observou durante esta etapa, é que foi possível encontrar grande quantidade de publicações analisadas durante o processo de busca nas bases de dados, o que justifica a quantidade de exclusões.

**Tabela 3:** Resultado dos artigos catalogados do filtro 3 e busca cruzada. **Fonte:** Autores (Dados da pesquisa). *(3) Área Qualis - Materiais.

| Nº | Título do artigo | Autor principal | Periódico | Ano | Qualis | Citações | H-Index |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy | Rojas-Díaz, L. M. | Powder Technology | 2020 | A1 | 0 | 0 |
| 2 | A new technique for recycling aluminium scrap | Samuel, M. | Journal of Materials Processing Technology | 2003 | A1 | 64 | 7 |
| 3 | Recycling aluminium (Al 6061) chip through powder metallurgy route | Fuziana, Y. F. | Materials Research Innovations | 2014 | B1 | 3 | 1 |
| 4 | New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling | J. Gronostajsk | Journal of Materials Processing Technology | 2000 | A1 | 89 | 12 |
| 5 | Effect of nano-size Al2O3 reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying | Mobasherpour, I. | Materials Chemistry and Physics | 2013 | A1 | 46 | 12 |
| 6 | The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al-Al2O3 composite | Rahimian, M. | Materials & Design | 2011 | A1 | 91 | 6 |
| 7 | Processing and surface properties of Al-AlN composites produced from nanostructured milled powders | Abdoli, H. | Journal of Alloys and Compounds | 2010 | A2 | 20 | 9 |
| 8 | Optimization of processing parameters for the Al+10% B4C system obtained by mechanical alloying | Abenojar, J. | Journal of Materials Processing Technology | 2007 | A1 | 59 | 21 |
| 9 | The Effect of Microstructures and Hardness Characteristics of Recycling Aluminium Chip AA6061/Al Powder on Various Sintering Temperatures | Irfan M. | International Journal of Integrated Engineering | 2018 | - | 4 | 2 |
| 10 | Fabrication of Al7075/Al, two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route | Z. Sherafat | Journal of Alloys and Compounds | 2009 | A2 | 35 | 6 |

Ao estudar a Tab. 3, é verificado o resultado da aplicação dos critérios de qualificação durante o final do filtro 3 e da busca cruzada, na qual a quantidade de citações e o H-Index foi determinada pela base de dados. Entretanto, em uma publicação encontrada durante a busca cruzada não se conseguiu estabelecer a qualificação do seu respectivo mecanismo de publicação. Mas os resultados e metodologias definidas pela autoria foram responsáveis por determinar como material essencial para esta revisão bibliográfica sistemática. Além disso, outra observação importante é a falta de citações no artigo (1), uma vez que trata-se de uma publicação muito recente, e até o momento de finalização desta revisão não foi encontrada nenhuma.

Nesse sentido, entre os artigos catalogados foram escolhidas 6 (1-4, 9 e 10) publicações que o processo experimental envolve reciclagem de alumínio proveniente de resíduos de usinagem. Já os 4 trabalhos restantes (5-8) envolvem análise de eficiência do processo de metalurgia do pó e moagem de alta energia na criação de ligas de alumínio, além disso, são publicações que definem como a adição de agente de controle auxilia o processo a obter materiais com melhores propriedades. Logo, essas publicações realçam a importância de encontrar pontos de controle na produção de materiais por meio dessas técnicas, uma vez que a variação de elementos de liga influencia diretamente na aplicação dos parâmetros de controle em toda cadeia produtiva.

Portanto, o Gráfico 6 foi desenvolvido com o intuito de listar as principais etapas metodológicas utilizadas pelos autores selecionados e a quantidade de publicações que realizaram a metodologia, objetivando facilitar a produção de futuros trabalhos a respeito do tema analisado por esta revisão. Logo, por meio deste estudo verificou-se que somente um trabalho realizou um parecer sobre os custos operacionais do processo, consequentemente esta análise demonstra como a maioria desses trabalhos não apresentam uma aplicação para o setor industrial, tornando-se produções puramente acadêmicas. Além disso, quase todos os trabalhos envolvendo reciclagem se preocuparam em realizar uma pré-limpeza do material, eliminando impurezas como a presença de lubrificantes derivados de processos de usinagem, poucos trabalhos não utilizaram lubrificantes para obtenção da sucata ou não buscou identificar esta etapa.

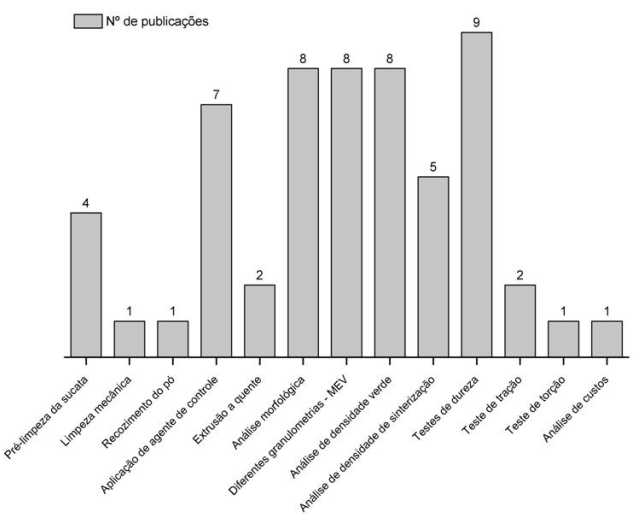



**Gráfico 6:** Seleção das principais metodologias utilizadas. **Fonte:** Autores.

Vale ressaltar que se observou em 80% das publicações a presença de uma análise morfológica do material pós sinterização, consequentemente, isso demonstra a preocupação dos autores em verificar o estado em que o material produzido se encontra e as condições relacionadas à presença de poros e impurezas superficiais provenientes do processo de sinterização. Assim, como o estudo metalográfico, outro importante teste para avaliação das amostras é a análise de densidades verde e de sinterização, cujas características definem a proximidade do material secundário com o primário e por consequente a eficiência do processo experimental. Entre ambas análises, o estudo da densidade verde foi a que mais prevaleceu, sendo responsável por 80% das publicações catalogadas. Por fim, é possível identificar a preferência de análise de teste de dureza na identificação de propriedade mecânicas do produto, já que testes de tração e torção se limitaram a trabalhos que acrescentaram o processo de extrusão a quente em suas metodologias.

Desta maneira, a Tab. 4 exibe a característica de cada metodologia, apresentando uma síntese do processo. Esta foi elaborada com o propósito de identificar os trabalhos que realizaram tais etapas metodológicas, na qual este estudo permite apontar os principais focos dos autores catalogados, de modo que ajuda a definir uma prévia dos resultados esperados por essas publicações. É importante ressaltar que este estudo foi realizado com o auxílio da ferramenta StArt, foi criado um Data Form em lista apresentando as metodologias a serem analisadas em cada trabalho.

Em vista disso, durante o estudo dos resultados entre os artigos selecionados, observou-se uma massiva preocupação dos autores em definirem pontos de equilíbrio para a cadeia produtiva. Essa análise é possível ser observada no trabalho de Rojas-Díaz, L. M. *et al*. (2020), por que destaca a importância da variação do tempo de moagem durante o processo de reciclagem, apresentando pontos como a formação de geometrias diferentes à medida que se aumenta o tempo de moagem, e a necessidade de se definir um limite neste período. Além disso, o autor realça que o processo de reciclagem via metalurgia do pó foi capaz de obter até 95% da dureza do material primário, cuja variabilidade na quantidade de amostras definida pela autoria traz confiança aos seus resultados[29].

**Tabela 4:** Lista das principais metodologias e suas definições. **Fonte:** Autores.

| Metodologia | Características | Publicação (Nº) |
|---|---|---|
| Pré-limpeza da sucata | Limpeza da sucata, com intuito de eliminar presença de lubrificante proveniente de operações de usinagem. | (1) (2) (3) (4) |
| Limpeza mecânica | Limpeza, por meio de imãs, com objetivo de eliminar presença de partículas de ferro, provenientes da parede do moinho ou esferas, dependendo do material de fabricação dos mesmos. | (2) |
| Recozimento do pó | Tratamento térmico realizado no pó objetivando diminuir a dureza pós moagem. Facilita processo de compactação e sinterização obtendo materiais com densidade mais absolutas. | (2) |
| Aplicação de agentes de controles | Processo de limpeza química, objetivando diminuir oxidações no pó. Trata-se também de elementos adicionais com intuito de servir como fases de reforçamento de liga, melhorando propriedades como densidade do produto. Ou a utilização de lubrificantes em pó, que ajudam a diminuir o atrito entre o pó e as paredes do moinho durante a moagem. | (2) (4) (3) (5) (6) (7) (8) |
| Extrusão a quente | Processo desenvolvido com o intuito de substituir a etapa de sinterização, permitindo uma melhora da difusão entre as partículas, de modo que resulta em materiais com densidades mais absolutas. | (4) (10) |
| Análise morfológica | Análise metalográfica realizada para identificar estado do material e a possível presença de impurezas e poros superficiais nas amostras. | (1) (2) (3) (6) (7) (8) (9) (10) |
| Diferentes granulometrias - MEV | Estudo desenvolvido com o intuito de determinar eficiência do processo de moagem, deliberando tempo exato para obter o material em pó que apresenta características mecânicas satisfatórias para o processo. | (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) |
| Análise de densidade verde | Análise de densidade pós compactação. Obtida medindo as amostras e pesando. Ajuda a definir proximidade do material reciclado com a fonte. | (1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (10) |
| Análise de densidade de sinterização | Análise de densidade do produto pós sinterização. Obtido por meio do Princípio de Arquimedes, onde a amostra é pesada e mergulhada em recipientes com intuito de medir deslocamento volumétrico (ASTM B328). | (6) (4) (7) (8) (9) |
| Teste de dureza | Testes desenvolvidos com o propósito de definir a influência de agentes de controle e diferentes granulometrias nas características das propriedades mecânicas do produto. | (1) (2) (3) (4) (5) (6) (9) (8) (10) |
| Teste de tração | | (5) (10) |
| Teste de torção | | (4) |
| Análise de custos | Análise que determina custos operacionais do processo experimental com a finalidade de aproximar o máximo possível de uma aplicação industrial, definindo a versatilidade econômica da metodologia em comparação a técnicas convencionais. | (2) |

Por outro lado, o artigo de Fuziana, Y. F. *et al*. (2014) buscou definir a eficiência de sua metodologia por meio de estudo da influência da velocidade de rotação, durante o processo de moagem, na formação de poros em diferentes temperaturas de sinterização, sendo reciclado o material Al 6061. O mesmo destaca uma maior difusão de partículas em temperaturas de sinterização maiores, e que com o aumento da rotação tende a resultar em grãos mais finos, densidade verde e dureza maiores, apresentando materiais com menos porosidade[18]. Contudo, é importante ressaltar que o aumento de velocidade durante a moagem pode acarretar em centrifugação, tornado o processo ineficiente[18], além de que o aumento na temperatura de sinterização pode acarretar na formação de fase líquida mudando os parâmetros do processo. Logo, seguindo a mesma lógica, o trabalho apresentado por Irfan, M. *et al*. (2018) focaliza sua pesquisa no estudo da variação de temperatura de sinterização na reciclagem do Al 6061, com o objetivo

de relatar a influência deste parâmetro nas características do material final. A publicação relata que o aumento de temperatura a partir de 552°C resultou em densidades menores, na qual tal temperatura determinou a densidade mais próxima do material base, sendo o ponto ideal para a sinterização deste material[30].

Deste modo, o que pode ser observado em ambas as publicações é como os parâmetros de controle influenciam diretamente nas características mecânicas do material resultante, em que uma única propriedade pode apresentar uma gama de valores, dependendo destas variáveis e do elemento liga a ser reciclado. Esta abordagem pode ser melhor observada nos trabalhos que estudaram a influência de agentes de controle, como aplicação de fases de reforço.

Nesse sentido, os trabalhos de Mobasherpour, I. *et al*.(2013) e Rahimian, M. *et al*.(2011) evidenciam a influência da alumina, como fase de reforço, nas características do material produzido. Na qual, o segundo autor destaca que o aumento deste material no composto resulta em níveis de porosidades menores, e a junção desta característica com a redução dos grãos de alumina resulta em alta dureza nos compósitos. Já Mobasherpour, I. *et al*. (2013) realça a possibilidade de encontrar durezas, densidade e resistências à tração melhores do que encontrado na matriz base[31,32]. Ainda nesse seguimento, o trabalho de Abdoli, H. *et al*. (2010) relata como diferentes teores de elementos de reforço podem influenciar nas propriedades de processamento mecânico. Para isso, o autor utiliza o AlN como agente de controle, no qual ele relata que o aumento deste teor resulta em menor tamanho médio de partícula e maior resistência ao desgaste do material. Porém, o tempo de sinterização necessário para que o compacto atinja completa densificação se prolonga[33].

Por fim, tem-se o trabalho de Abenojar *et al*. (2007) que busca estudar a metalurgia do pó como alternativa para a fabricação da liga Al-10%B4C. Por meio da variação dos parâmetros de controle, como tempo de moagem, pressão de compactação, agente de controle e temperatura de sinterização, o autor busca definir pontos ideais em cada etapa de processamento, de modo que otimize a produção deste compósito. Neste estudo foi relatado que os materiais obtidos pela metalurgia do pó apresentaram maior resistência mecânica, e que a resistência à flexão foi cerca de 86% de um alumínio puro, valor que se demonstrou bastante elevado quando comparado ao fabricado por outros métodos[34].

Sendo assim, entre os trabalhos analisados, a publicação de Samuel M. (2003) foi a que mais se destacou, por apresentar um estudo a respeito de custos operacionais da metodologia aplicada pela autoria, em que evidencia economia de 41% no custo de produção de alumínio reciclado via metalurgia do pó. Em seus resultados, é possível verificar a comparação que o autor faz entre o material reciclado e o material disponível no mercado, com o propósito de estudar semelhanças entre as propriedades mecânicas de ambos produtos. Nesse sentido, destaca a importância de agentes de controles no processo, para compensar perdas em propriedade do produto, que no caso da densidade poderia chegar a 13%[7].

Contudo, durante as buscas observou-se uma enorme variedade de metodologias utilizando vários processos de conformação, e o que mais se destacou foi a adição de processos de extrusão a quente, com objetivo de substituir o processo de sinterização, como apresentam os autores Gronostajski, J. (2000) e Sherafat, Z. (2009), este processo melhora a difusão entre as partículas durante a conformação. Além disso, ambos autores destacam o processo por melhorar a economia energética e de materiais durante a cadeia produtiva. Entretanto, Gronostajski, J (2000) focaliza seu trabalho na importância das fases de reforço na reciclagem de sucata de alumínio, melhorando as características do produto. Já Sherafat, Z. (2009) evidencia a influência deste processo de conformação nas propriedades mecânicas do produto reciclado, e relata que o aumento de temperatura de extrusão resulta em propriedade melhores devido uma melhor ligação entre o cavaco e pó de alumínio reciclado[6,35].

Isto posto, ao estudar os resultados obtidos de cada autoria, observa-se uma variedade de metodologias que envolvem este tema, de modo que a simples variação de material leva a produzir novas cadeias de conformação. Além disso, por meio desta análise foi possível determinar a importância dos parâmetros de controle em cada

experimento avaliado, e como o processo de metalurgia do pó e moagem de alta energia, poderiam ser importantes para aplicação em processos de reciclagem.

# Conclusão

Por meio desta revisão bibliográfica sistemática, em que 829 publicações científicas foram submetidas a rigorosas avaliações de seleção, é possível afirmar que esta temática ainda é pouco abordada no cenário acadêmico, visto que houve um baixo número de publicação encontradas durante o período de busca determinado, 20 anos. Entretanto, esse número demostrou ser suficiente para determinar o processo de metalurgia do pó como apto para alternativa de reciclagem de alumínio e ligas de alumínio, uma vez que existe uma grande diversidade de regiões participantes nessas pesquisas, sendo os três principais a China, Índia e Coreia do Sul, com 21,48%, 11,53% e 4,8%, respectivamente. Além disso, outro fator que contribuiu com a aprovação da metodologia em questão é a quantidade de autores envolvidos, pois é estimado mais de 2000 autorias, sendo o autor de maior predominância responsável por apenas 2% dos trabalhos encontrados, resultando em uma enorme variabilidade de processos experimentais.

Sendo assim, apenas 8 artigos foram aprovados para análise final. Apenas um destes artigos relata estudo de custos operacionais, em que evidencia a economia no processo quando comparado ao processo convencional, porém, a verificação de um único trabalho se torna insuficiente para confirmar esta observação. Em contrapartida, nos trabalhos restantes, foi observado que os autores estudaram a influência de agentes de controle, como aplicação de fases de reforço, para averiguar as propriedades do material reciclado, cujo resultado demostrou ser bastante próximo do produto primário, e em casos específicos até melhores. Consequentemente, isto mostra a eficiência desta técnica e como ela poderia ser aplicada nesta situação e principalmente em processos de reciclagem de materiais especiais como alumínio aeronáutico.

# Referências


1. ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. Fundamentos e aplicações do alumínio. ABAL. São Paulo, **2019**.
2. International Energy Agency (IEA). Energy Technology Transitions for Industry, **2019**.
3. Paraskevas, D. *et al*. Environmental impact analysis of primary aluminium production at country level. Procedia CIRP, v. 40, p. 209-213, **2016**.
4. Liu, G. *et al*. Stock dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle. Nature Climate Change, v. 3, n. 4, p. 338, **2013**.
5. Shamsudin, S. *et al*. Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminium: a review. Procedia CIRP, v. 40, p. 256-261, **2016**.
6. Gronostajski, J. *et al*. New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. Journal of materials processing technology, v. 106, n. 1-3, p. 34-39, **2000**.
7. Samuel, M. A new technique for recycling aluminium scrap. Journal of Materials processing technology, v. 135, n. 1, p. 117-124, **2003**.
8. Ingarao, G. *et al*. Energy demand reduction of aluminum alloys recycling through friction Stir Extrusion Processes Implementation. Procedia Manufacturing, v. 33, p. 632-638, **2019**.
9. Dunkley, J. Mim – A global perspective. Powder metallurgy, v.43, n.4, p.296-298, **2000**.
10. Wu, C. Y. *et al*. Theflow of powder into simple and stepped dies. Powder Technology, v. 134, n. 1-2, p. 24-39, **2003**.
11. Stadtler, W. A. Production of metallurgy parts. ASTM, Powder Metallurgy, Ohio, p. 449-463, **1989**.
12. Suryanarayana, C. Mechanical alloying and milling. Progress in Materials Science, 46, p. 1-184, **2001**.
13. Ghadiri, M. *et al*. Particle characterization size and morfology. The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy an Overview, London, p. 56-75, **1991**.
14. Chiaverini, V. Metalurgia do pó. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, **2001**.
15. Fogagnolo, J. B. *et al*. Estudo do processo de fabricação de materiais compósitos de matriz de alumínio por metalurgia do pó, via moagem de alta energia e extrusão. **2000**.
16. Thummler, F.; Oberacker, R. Introduction to powder metallurgy. Oxford Science Publications, **1993**. 346, **1993**.
17. Neubing, H. C.; Jangg, G. Sintering of aluminum parts: the state-of-the-art. Metal Powder Report, v. 42, n. 5, p. 354-358, **1987**.
18. Fuziana, Y. F. *et al*. Recycling aluminium (Al 6061) chip through powder metallurgy route. Materials Research Innovations, v. 18, n. sup6, p. S6-354-S6-358, 2014.

19. Benjamin, J. S. Mechanical alloying. Scientific American, v. 234, n. 5, p. 40-49, **1976**.

20. Madavali, B. *et al*. Effects of atmosphere and milling time on the coarsening of copper powders during mechanical milling. Powder technology, v. 256, p. 251-256, **2014**.

21. Froes, F. H.*et al*. Synthesis of advanced lightweight metals by powder metallurgy techniques. Powder Metallurgy, London, v. 39, n.1, p.63-65, **1996**.

22. Canakci, A.; Varol, T. A novel method for the production of metal powders without conventional atomization process. Journal of Cleaner Production, v. 99, n. July, p. 312–319, **2015**.

23. Castagnet, M. Avaliação da compressibilidade de mistura de pós de nióbio e alumínio ativadas termicamente. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), IPEN-USP. São Paulo, **2008**.

24. Conforto, E. C. *et al*. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. Trabalho apresentado, v. 8, **2011**.

25. Chen, W. Q; Shi, L.Analysis of aluminum stocks and flows in mainland China from **1950** to **2009**: exploring the dynamics driving the rapid increase in China's aluminum production. Resources, Conservation and Recycling, v. 65, p. 18-28, **2012**.

26. Cardoso, J. G. R. *et al*. A indústria do alumínio: estrutura e tendências. BNDES Setorial 33. **2011**.

27. Adams, J. *et al*. Global Research Report – China. Research and collaboration in the new geografy of science. Thomson Reuters. **2009**.

28. National Science Foundation. Science and Engineering Indicators Report **2018**, Appendix Tables. **2018**.

29. Rojas-Díaz, L. M. *et al*. Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy. Powder Technology, v. 360, p. 301-311, **2020**.

30. Irfan, M. *et al*. The effect of microstructures and hardness characteristics of recycling aluminium chip AA6061/Al powder on various sintering temperatures. Internaltional J. Integr. Eng, v. 10, n. 3, p. 53-56, **2018**.

31. Mobasherpour, I. *et al*. Effect of nano-size $Al_2O_3$ reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying. Materialschemistryandphysics, v. 138, n. 2-3, p. 535-541, **2013**.

32. Rahimian, M. *et al*. The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al–$Al_2O_3$ composite. Materials & Design, v. 32, n. 2, p. 1031-1038, **2011**.

33. Abdoli, H. *et al*. Processing and surface properties of Al–AlN composites produced from nanostructured milled powders. Journalofalloysand compounds, v. 490, n. 1-2, p. 624-630, **2010**.

34. Abenojar, J. *et al*. Optimization of processing parameters for the Al+ 10% B4C system obtained by mechanical alloying. Journal of Materials Processing Technology, v. 184, n. 1-3, p. 441-446, **2007**.

35. Sherafat, Z. *et al*. Fabrication of Al7075/Al, two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route. Journal of Alloys and Compounds, v. 487, n. 1-2, p. 395-399, **2009**.

36. GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental. 1 ed. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, **2009**. 320 p.

37. Leite, D. W. Obtenção do cermet Ni-$ZrO_2$ por moagem de alta energia. 59f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, **2010**.

**Juliano L. Navarro*, Leonardo A. Lopes, André P. Silva, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Rosemberg F. N. Rodrigues**

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: julianolemos23@gmail.com

# Viabilidade da Aplicação do Aço Inoxidável Aisi 420 Tratado Termicamente

Alexander S. Duarte, Rodrigo L. Almeida
& Gino B. Colherinhas

Neste trabalho foi realizado um tratamento térmico em uma peça de aço inoxidável AISI 420, para aplicação em uma máquina de envase de cerveja. Devido sua resistência à corrosão e suas propriedades mecânicas, esse material é muito utilizado na indústria alimentícia, o tratamento térmico irá aumentar sua dureza, diminuindo o desgaste por atrito, ao qual a peça será submetida. A peça tem a função de apoiar a garrafa de vidro durante a transferência de cada fase do envasamento do produto final, o atrito da garrafa com a peça faz com que o desgaste seja prematuro, aumento os custos da manutenção do equipamento. Trabalho foi dividido em pesquisas científicas e escolha do material adequado para confecção da peça.

**Palavras-chave:** *tratamento térmico; aço inox 420; têmpera AISI 420.*

In this work, a heat treatment was carried out on a piece of stainless steel AISI 420 for application in a beer filling machine. Due to its resistance to corrosion and its mechanical properties, this material is widely used in the food industry, the heat treatment will increase its hardness, reducing the friction wear, in which the piece will be submitted. The piece has the function of supporting the glass bottle during the transfer of each phase of the filling of the final product, the friction of the bottle with the piece makes the wear premature, increasing the maintenance costs of the equipment. Work was divided into scientific research and choosing the appropriate material for making the piece.

**Keywords:** *heat treatment; 420 stainless steel; AISI 420 hardening.*

# Introdução

Os desenvolvimentos dos aços inoxidáveis começaram simultaneamente, em 1910 na Inglaterra, Alemanha e Estados Unidos. Em 1911, Christiam Dantsizen e Frederick Becket realizaram experimentos em ligas contendo cromo e carbono. Com esses estudos, os aços inoxidáveis ferríticos foram desenvolvidos. No ano de 1913, o metalúrgico Harry Brearley desenvolveu, na Inglaterra, aços resistentes à corrosão. O resultado desses estudos contribuiu com desenvolvimento de outras pesquisas, os doutores Brenno Strass e Eduard Maurer desenvolveram os aços inoxidáveis martensíticos e austeníticos[1].

Os aços inoxidáveis são utilizados onde as peças devem ser resistentes à corrosão, a indústria alimentícia em seus processos utiliza o aço inoxidável principalmente por essa resistência a corrosão, além dessa resistência, algumas aplicações requerem uma resistência mecânica que suporte o atrito que venha a ser submetido, seja por impacto ou deslizamento. A propriedade mecânica depende do tipo de microestrutura do material, que são os ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecidos por precipitação, que a partir de um tratamento térmico obtém se uma estrutura martensítica ou austenita retida, essa estrutura depende de sua composição química. Tipo martensítico são ligas do sistema Fe-Cr-Ni contendo cromo 11,5 a 18% e carbono 0,1 a 1,2%, e são austeníticos a altas temperaturas 950°C, e necessitam estabilizar esta fase devido à presença de cromo, que é um elemento alfagênico. Os aços inoxidáveis martensíticos são empregados em ambientes onde há exigência de resistência mecânica aliada à resistência à corrosão e à dureza[2].

Os aços inoxidáveis são um grupo de ligas que possuem resistência à corrosão em convívio com o meio atmosférico, apresentando resultados satisfatórios na presença de diversos meios agressivos e em temperaturas superiores[3]. O que justifica grande aplicação da liga em ambientes indústrias, nos quais o ambiente exige bons desempenhos das ligas usadas, seja por viabilidade econômica ou por normas para controlar a contaminação no caso das indústrias alimentícias e farmacêuticas. A alta ductilidade das ligas de aço inoxidáveis para algumas aplicações pode tornar seu uso inviável, uma alternativa seria aplicar um tratamento térmico na liga para melhorar suas propriedades mecânicas.

Segundo Strobel (2007) "O tratamento térmico desses aços consiste de uma têmpera seguida de um revenido simples, cujas condições são otimizadas para proporcionar ao aço a resistência mecânica, dureza e tenacidade necessárias". A necessidade de aumentar a dureza do material é devido ao desgaste por atrito, melhorando essa propriedade pode se aumentar o tempo de vida útil da peça, ampliando o campo de aplicação do material.

Segundo Chiaverini (2008, p.82) o tratamento térmico é o agrupamento de procedimentos de aquecimento a que são sujeitos os aços, sob situações controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o propósito de alterar as suas qualidades ou conferir-lhes características determinadas. A têmpera consiste em aquecer o material até a temperatura de autenetização, seguido de resfriamento até uma temperatura abaixo da temperatura Mi, ágil o suficiente para obtenção de martensita[2].

Os aços inoxidáveis martensíticos podem ser temperados devido à alta temperabilidade conferida pelo alto teor de cromo, geralmente esfriado em ar, óleo ou água[4]. Para obter o tratamento térmico nos aços inoxidáveis martensíticos, primeiramente, esse material é aquecido até a temperatura na faixa de 900 ºC a 1100 ºC destinada como temperatura de austenetização e depois é resfriado numa taxa suficiente para a formação da martensita[5]. O aumento da dureza é comumente realizado por meio desta prática[6]. A combinação de processamentos termodinâmicos e de tratamento térmico em aços inoxidáveis martensíticos é desenvolvida para modificar a distribuição dos carbonetos[7].

Aços que dispõem de boas propriedades mecânicas, como os martensíticos, apresentam baixa resistência à corrosão se comparados aos austeníticos e ferríticos[8]. Os martensíticos são assim designados porque podem ser temperados, associado a resistência à corrosão, dureza e ao desgaste. Possuem como principal elemento de liga o cromo, em teores de até 18%[9]. A classe popularmente usada de aço inoxidável martensítico de 13% Cromo, contém de 0,2% de teor de carbono, que no tratamento térmico exibe

uma estrutura martensítica de ripas temperada distribuição de carboneto que fortalece a matriz, oferece boa resistência à corrosão e também garante boa temperabilidade[7].

O diagrama de fases do sistema Fe-C 18 % Cr 13,0 %, característico do aço inoxidável martensítico AISI 420 indica que as principais transformações de fase podem ser observadas por meio da linha tracejada[10], conforme indicado na Figura 1.

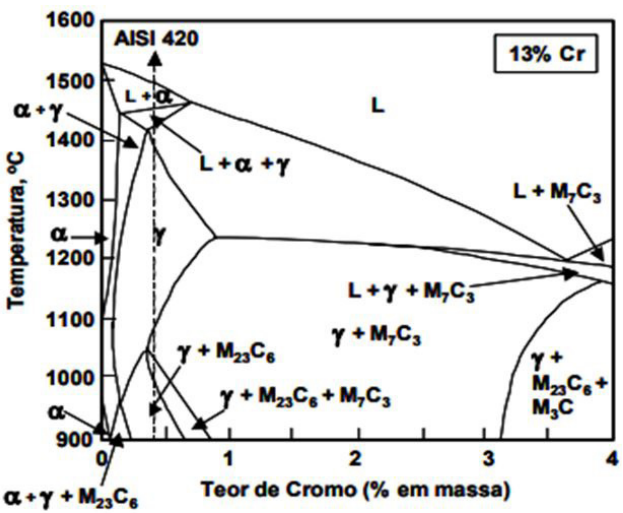



**Figura 1:** Diagrama do sistema Fe-C-Cr. **Fonte:** referência [10].

O objetivo é aplicar conhecimentos científicos sobre tratamentos térmicos, identificar os tipos de tratamentos térmicos aplicáveis a aços inoxidáveis, distinguir os tipos de aços inoxidáveis martensiticos quanto a sua aplicação, para melhorar as propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico, principalmente, a dureza do material. Submeter o material ao tratamento térmico, analisar amostras antes e depois do tratamento e empregar esse material na confecção de uma chapa de deslize de garrafas de vidro, a fim de reduzir a periodicidade de troca da peça, otimizando a manutenção do equipamento.

# Metodologia

Diante de tal necessidade apresentada, optou-se por confeccionar dois corpos de prova do mesmo material (Inox AISI 420), um em seu estágio padrão de comercialização, o outro tratado termicamente para efeito de comparação. A partir dos resultados um terceiro corpo pode ser fabricado peça visada a solucionar tais problemas de desgaste por atrito, a princípio apenas um corpo será direcionado ao forno para o tratamento térmico, daí em diante ambos serão seccionados para serem submetidos às etapas necessárias para fazer as análises metalográficas e de dureza. Então de posse aos resultados obtidos serão comparados e avaliada a viabilidade e forma de fabricação do terceiro corpo que será a peça para instalação no equipamento.

A fabricação da peça se dará de forma a obtê-la sem que nenhuma região seja afetada estruturalmente além do que já foi testado pelas amostras. Após tratada termicamente, um ensaio de dureza também será realizado nesta terceira. Posteriormente será aplicada ao equipamento para que finalmente se avaliem os resultados de trabalho na prática, para isso periodicamente essa peça será analisada conforme os métodos que serão apresentados neste capítulo.

## TRATAMENTO TÉRMICO

Como já mencionado o material utilizado o aço inoxidável AISI 420, foi colocado no interior do forno elétrico, modelo 7809613 da marca JUNG com limite máximo de temperatura de 1300° C, trifásico e ano de fabricação 2013, aferido regularmente e dentro do prazo de validação. Com este ainda desligado e a peça devidamente posicionada em sua parte interna, pode-se dar início ao processo de aquecimento para que a peça aquecesse juntamente com o forno gradualmente até a temperatura de 800° C onde permaneceu por 10 minutos, a fim de que a temperatura se equalizasse no interior da peça como nas demais regiões.

A temperatura estabelecida para esse tratamento foi de 1000°C, velocidade média de aquecimento de 0,13°C/s e a manutenção dessa temperatura deu-se por 15 minutos e logo após a peça foi retirada e resfriada no óleo que, por sua vez, estava em temperatura ambiente.

## SECCIONAMENTO TRANSVERSAL DAS AMOSTRAS

As amostras foram retiradas do material com e sem têmpera para que pudesse ser feito um comparativo que é objetivo deste estudo. Para isso utilizou-se um arco de serra manual para retirar uma secção maior do material que coubesse na policorte e posteriormente seccionasse várias amostras para futuras etapas desse processo de estudo, tanto o arco de serra manual quanto a policorte foram selecionadas para essa etapa por serem indicadas por não deixar que o material não tenha uma zona termicamente afetada (ZTA), o segundo por ser um corte por abrasão e demandar muita energia e consequentemente calor é fundamental que fosse refrigerado para que não houvesse mudanças estruturais na peça através das mudanças de temperatura, além de remover resíduos e lubrificar o corte.

Como esse material é um bom condutor de calor o refrigerante foi direcionado sobre o corte com vazão constante e suficiente para manter o canal de corte totalmente submerso a fim de que a peça não sofra mudança de temperatura, para isso foi utilizado equipamento próprio para fins de ensaios metalográficos com bomba de refrigeração acoplada diretamente a policorte.

## EMBUTIMENTO À QUENTE

O embutimento tem como objetivo facilitar o manuseio das amostras nas operações subsequentes ao corte e preservar as bordas em uma superfície plana evitando arredondamentos dos cantos ou que danifiquem as lixas e os panos de polir precocemente. Esse processo baseia-se em circuncidar as amostras retiradas do material em um polímero, nesse caso o utilizado foi o baquelite e o equipamento uma prensa de embutimento da marca Panambra Zwick modelo panpress 30, à temperatura de trabalho a 150°C por 15 minutos e com pressão constante na faixa de 125 a 150 kgf/mm² indicada por um led aceso na face do equipamento, o processo de resfriamento também se deu sob a mesma pressão.

Após o embutimento pode-se observar que as amostras se encontravam perfeitamente circuncidadas neste polímero, que por sua vez, estavam livres de fendas tanto radiais, quanto circunferenciais e em total fusão atendendo a todos os objetivos do embutimento a amostra embutida também estava bem fixada centralizada em uma das faces conforme designada, apta aos trabalhos posteriores.

## LIXAMENTO

Esta próxima etapa visa à obtenção de uma superfície plana, livre de sulcos e riscos oriundos dos processos anteriores, é uma operação exaustiva pois demanda tempo e exige cuidados, para que a amostra esteja perfeitamente acabada.

Nesse caso, foi utilizada uma lixadeira elétrica rotativa fixa onde a peça era movimentada manualmente sobre o disco onde as lixas são fixadas no equipamento a 300rpm velocidade de rotação do disco, sob o fluxo constante de água, que evita o empastamento dos resíduos que se desprende tanto da amostra quanto da lixa durante o processo entre as superfícies em contato e aquecimento do material. A seleção das lixas e a sequência de utilização delas são: 120-240-320-400-600-800-1200-2500, obedecendo à ordem da maior para a menor, note que quanto maior o número menor a granulometria, a substituição da lixa é realizada quando a lixa atual tenha retirado completamente os riscos deixados pela lixa anterior, quando não era possível uma lixa de maior granulometria era selecionada e reiniciado o lixamento.

A amostra do material devidamente seccionada e embutida foi referenciada quanto a sua orientação sobre o disco de lixamento para que pudesse girar a 90° sempre que a lixa fosse trocada alternando assim a direção do lixamento, antes de iniciar o processo com uma nova lixa a superfície da amostra era limpa com água corrente para que todos os resíduos provenientes da peça e da lixa utilizada anteriormente fossem eliminados.

O movimento da amostra sobre o disco com a lixa é realizado de forma linear, em forma de vai-e-vem que iniciou-se pela periferia do disco até o centro retornando a periferia e assim subsequente até o término do uso lixa sem girar a peça mantendo sempre a mesma orientação, para que não houvesse desgaste desigual da amostra a pressão manualmente exercida sobre a peça foi

mantida de forma sobre ela, bem como a velocidade dos movimentos sobre a lixa.

## POLIMENTO

Subsequente ao processo de lixamento, o polimento tem como finalidade a obtenção de uma superfície de alta refletividade e acabamento fino que proporcione uma boa aproximação microscópica, durante essa operação foi utilizado o mesmo equipamento usado para lixar, com alterações no fluido aplicado, nesse caso, o alumina de 1 µm e a substituição das lixas por panos de polir. A limpeza do equipamento com água e sabão é indispensável para que se tenha um total desprendimento dos resíduos deixados pelo lixamento, a limpeza das amostras também foi realizada antes de iniciar essa etapa, bem como todas as vezes que se reiniciava o processo, mãos e ambiente também se enquadraram nos quesitos de limpeza.

Sob velocidade de 300 rpm o pano de polir umedecido com alumina de 1µm recebeu as amostras após o lixamento e a preparação da politriz, manualmente conduzidas com movimentos lineares da periferia ao centro e do centro à periferia sucessivamente até o término dessa etapa, mantendo sempre pressão e velocidade uniforme como no processo anterior, isso se repete até a obtenção de uma superfície de alta refletividade. O agente polidor nesse caso o alumina foi adicionado a cada repetição pois tende a perder eficiência quando os fragmentos em sua composição sofre danos nas arestas de corte, alterando os resultados, foram utilizados também dois panos de polir para alternar o polimento entre estes com o intuito de otimizar o efeito esperado, sempre com a cautela de eliminar os restos depositados no tecido e repetindo a adição do agente polidor até a conclusão do processo.

## ATAQUE QUÍMICO E ANÁLISE MICROSCÓPICA

Essa etapa visa à microanálise do material, para isso utiliza-se do ataque químico para evidenciar os contrastes na microestrura das amostras, como: contorno dos grãos e mudanças de fases. Antes do ataque químico seguiram-se os padrões de limpeza utilizados nos processos anteriores para eliminar todo tipo de resíduos sobre as superfícies das amostras, evitando que parte delas sejam mais atacadas quimicamente do que outras, o reagente usado foi água régia + glicerina que é indicado para esse material, a solução foi gotejada sobre a superfície a ser analisada e o tempo de reação se deu por 3s, tanto antes como depois, a peça foi limpada com álcool e um chumaço de algodão e secada com o auxílio de um secador.

A análise microscópia foi realizada através do microscópio metalográfico da marca Pantec Panambra, com aproximação de 150x e filtro colorido para que os constrastes na microestrutura ficassem mais evidentes o equipamento contava também com ajuste de luminosidade, ajuste de distância interpupilar, ajuste macro e micro de focalização e câmera fotográfica acoplada para captura das imagens. As amostras são colocadas sobre a mesa do microscópio perpendicularmente ao feixe polarizado de luz projetado sobre a superfície dessas, basicamente essa luz é refletida á lente tornando possível a observação da microestrutura do material.

## ENSAIOS DE DUREZA

Para análise de dureza utilizou-se um durômetro da marca digimess, houve a cautela de submeter o material aos testes apenas após o lixamento para que os óxidos formados na superfície não mascare os resultados coletados, 5 amostras do material de referência e 5 amostras do material com têmpera foram utilizadas e foi considerado uma média de cada tipo de amostras para efeito de comparação, para todas foi utilizado ponta de esfera em escala Rockwell C exceto o material de referência mensurado em escala Rockwell B pois não atinge a anterior. Se verificada a viabilidade da fabricação da peça com base nos ensaios será analisada em pontos distintos, a fim de obter uma média quanto a dureza adquirida.

## FABRICAÇÃO DA PEÇA

O protótipo utilizado neste projeto teve como foco puramente a aplicação de tratamento térmico, ignorando o dimensionamento do projeto que já está pré-definido, pois o principal objetivo é a otimização do material para o

ambiente que está inserido, respeitando todas as dimensões do projeto inicial.

Por conter um formato irregular, o processo escolhido para confecção da peça foi o corte a jato d`água por comando numérico computadorizado (CNC), levando em conta os custos e os benefícios do processo como: precisão, acabamento e conservação das propriedades mecânicas do material. Refere-se a um corte a frio evitando que a região próxima ao corte seja afetada termicamente.

Uma chapa laminada com espessura de 6,35 mm, a mesma da peça, foi utilizada como material de construção, restava apenas cortá-la no formato do modelo, o corte a jato d'água basicamente consiste em um processo que utiliza um recurso natural (água) como objeto de corte combinado a pressões elevadíssimas e velocidade supersônica. A pressão da água que sai pelo bico que possui orifício que varia de 0,6 mm a 1,0 mm é de aproximadamente 4100 bar a 6400 bar, nota-se a diferença se comparada à pressão que tem uma mangueira de incêndio que é de aproximadamente 14 bar, mas para romper com as tensões do material e ocasionar o seccionamento, tal pressão precisa estar associada a alta velocidade do jato que é em torno de 4000 km/h.

O corte da peça foi realizado em menos de uma hora desde sua preparação ao término, foi adicionado um aditivo abrasivo misturado à água normalmente utilizado na usinagem de metais, o processo atendeu todas as tolerâncias dimensionais da peça de duas casas decimais em mm e outros processos, como por exemplo, acabamento nas laterais a peça não sofreu mudanças de temperatura significativa como é de característica do corte a jato a jato d´água.

### APLICABILIDADE

Após a fabricação, a peça passará por ensaios de dureza para constatação da eficácia do tratamento térmico e em seguida, será instalado no equipamento de transporte de garrafas de vidro, um cronograma de checagem das condições irá definir um período de 15 em 15 dias o monitoramento e coleta de informações pertinentes à peça a partir de sua instalação, onde serão registrados dados como: aspecto geral da peça, medições para verificar se houve desgaste naquele intervalo e ausência de trincas ou deformações, horas trabalhadas do equipamento e o quanto ele produziu. Para comparação instalou-se uma chapa no outro equipamento da mesma linha produtiva sem aplicação do tratamento térmico, a comparação será necessária para justificar o custo benefício de instalar peças com o mesmo tratamento nos demais equipamentos da linha.

### VIABILIDADE ECONÔMICA

Para avaliar a viabilidade econômica, um paralelo entre a peça anteriormente utilizada e a peça proposta por esse trabalho científico será realizado levando em conta custos de fabricação e durabilidade, além de mensurar disponibilidade do equipamento, produtividade, tempo médio de reparo, o que deixou de produzir durante as trocas desse componente, todos esses dados serão baseados dentro de um ano, utilizando o ano anterior como referência. Como a empresa trabalha com gerenciamento de dados de manutenção por meio do SAP, os custos e periodicidade de troca podem ser coletados a partir do histórico gerado por esse gerenciamento.

## Resultados e Discussão

### FABRICAÇÃO

O objetivo principal na fabricação da peça era mantê-la sem alterações em sua microestrutura, impedir que algumas regiões, obviamente as mais próximas ao corte, fossem afetadas termicamente, tendo em vista que o material em questão possui uma baixa condutividade térmica conforme Tabela 1. Esse fator é de alta relevância, pois tende a concentrar calor na região a ser usinada ao invés de dissipá-lo às demais áreas e evitar que parte dessa energia se acumule na ferramenta de corte, como por exemplo: brocas e ferramentas de corte diversas. Uma boa condutividade térmica minimiza os impactos gerados pelo alto aquecimento proveniente dos desprendimentos das partículas do material durante o corte.

**Tabela 1:** Condutividade Térmica. **Fonte:** referência [11].

| Material | k, W/(m·K) |
|---|---|
| Cobre | 401 |
| Alumínio | 240 |
| Ferro | 80,2 |
| Aço (AISI 1010) | 63,9 |
| Aço inox (AISI 304) | 14,9 |

| Material | k, W/(m·K) |
|---|---|
| Fibra de vidro (placa) | 0,058 |
| Placa de fibra mineral | 0,049 |
| Fibra de vidro (manta) | 0,038 |
| Poliestireno, expandido | 0,027 |
| Uretana, espuma | 0,026 |

O tipo de corte utilizado, a jato d'água, permitiu que, durante todo o processo, a peça estivesse em temperatura ambiente, o fluxo constante de água sob pressão aproximada de 4500bar. Ao invés de uma ferramenta fixa que estaria sujeita a desgaste no fio de corte ou vibrações, fatores que fomentariam ainda mais o aquecimento afetando as propriedades do material em algum ponto de sua área, ou cortes que demandam muita energia térmica para realização dessa atividade. Por conta dessas condições foi bastante vantajoso a seleção desse equipamento em relação aos outros.

Outro ponto importante, oriundo desse processo, está relacionado justamente à estabilidade dimensional, que também pode ser afetada durante um processo de usinagem por conta de aquecimento. Eliminado esse problema volta-se para a eficiência e versatilidade do corte a jato d'água controlado por comando numérico computadorizado (CNC), o que viabilizou tolerância dimensional na faixa de 0,05mm, considerada excelente para essa aplicação, o formato irregular da peça era tido como inviável aos processos convencionais de usinagem, mas foi executado de forma relativamente simples com o bico de orifício de 0,6mm pelo qual passa o fluxo de água se deslocando por meio de movimentos robotizados por todo o perímetro de corte, que durou menos de uma hora desde a fixação, a programação e o seccionamento do material.

A medição da peça revelou a precisão que o equipamento devidamente em boas condições de uso oferecia, dentro do alcance de tolerância de centésimos de milímetros, utilizou-se um paquímetro de 0,02mm, as exigências dimensionais da peça eram de até 0,1mm para mais ou para menos, e em todas as cotas estabelecidas obtiveram-se variações de no máximo 0,05mm, ou seja, sempre dentro do tolerável, uma excelente precisão no cumprimento das cotas previamente desenhadas. Apesar desse processo não oferecer superfícies pós-usinagem de baixa rugosidade, foi necessário apenas um leve lixamento nos cantos da peça já que esse tipo de processo não gera rebarbas.

## TRATAMENTO TÉRMICO

A liga utilizada AISI 420 de composição C – 0,15%, Cr – 13%, Mn – 1%, Si – 0,75%, Ni – 0,5% demonstrou resultados após o tratamento térmico de têmpera bastante satisfatórios, os elementos constituintes como: C e Cr responsáveis pela transformação de fase que garantem a liga maior dureza e consequentemente uma maior resistência ao desgaste por conta da ação sofrida pelo movimento de transporte das garrafas sobre a peça nesse caso, o que provocava perda progressiva de material sobre a superfície da peça.

A presença dos elementos de liga C e Cr com teores em aproximadamente 0,15% e 13% respectivamente dentre outros elementos que formam a liga são predominantes na formação da ferrita no estágio natural da liga. Através do aquecimento da peça a uma temperatura de 1000°C, Figura 2, fez-se com que a fase presente no material, a ferrita transformasse-se em austenita, à temperatura dentro da faixa de 925 a 1065ºC é responsável pela dissolução dos carbonetos e decomposição de ferrita-delta, o processo de aquecimento de forma gradual à velocidade de 0,13°C/s permitiu a obtenção de uma peça homogênea livre de deformações e de regiões que não tivesse sofrido os efeitos do tratamento.

A transformação de ferrita em austenita não é o suficiente para os efeitos do tratamento térmico de têmpera, assim como nos aços comuns o material precisa que sua temperatura seja elevada a zonas de transformação de fase, nesse caso é denominada como temperatura de austenitização e posteriormente resfriado bruscamente em óleo, Figura 3, para a formação da estrutura martensítica onde o material teve os ganhos desejados em suas propriedades como: dureza e resistência ao desgaste.

**Figura 2:** Forno elétrico. **Fonte:** Autores.

**Figura 3:** Peça sendo resfriada à óleo. **Fonte:** Autores.

## DUREZA

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza se dividem em duas etapas, assim como já mencionado no presente trabalho: em um primeiro estágio verificaram-se as amostras tratadas termicamente e as compararam-se com as amostras não tratadas e em um segundo estágio a peça a ser instalada na enchedora foi submetida aos ensaios.

As amostras analisadas foram emparelhadas entre duas classes: cinco delas sem tratamento e cinco com tratamento térmico de têmpera, os valores apresentados revelaram a boa temperabilidade da liga utilizada o aço AISI 420, que ao ser comparado demonstrou números significativos relacionados a dureza adquirida pós-tratamento, os resultados das cinco amostras gerou média e dessa forma pode-se ter uma maior confiabilidade do grau de dureza correspondente. A Tabela 2 a seguir apresenta os valores obtidos relacionados a cada amostra e a média que representa cada tipo de classe.

**Tabela 2:** Resultados da dureza nos tipos de classe. **Fonte:** Autores.

| Amostra | AISI 420 S/ têmpera(HRB) | AISI 420 Tratado termicamente(HRB) |
|---|---|---|
| 01 | 82 | 53 |
| 02 | 78 | 51 |
| 03 | 84 | 51 |
| 04 | 81 | 49 |
| 05 | 80 | 53 |

O ensaio da peça sucedeu após a realização de uma limpeza na superfície da peça que teve o intuito de retirar a camada carbonizada que se formou e evitar distorções nos valores reais obtidos durante a análise,. Vale ressaltar que esse procedimento não foi necessário para as amostras pois elas passaram por todo o processo de metalografia descrito antes de se verificar a dureza. Além da retirada dos resíduos sobre a superfície da peça provenientes da têmpera, pontos aleatórios foram selecionados para a verificação do grau de dureza da peça e a média dos valores coletados foi utilizada para maior confiabilidade dos resultados, conforme descritos na Tabela 03.

**Tabela 3:** Dureza obtida em pontos aleatórios da peça. **Fonte:** Autores.

| Ponto | Dureza da peça Em escala (HRC) |
|---|---|
| 01 | 51 |
| 02 | 51 |
| 03 | 50 |
| 04 | 51 |
| 05 | 52 |
| 06 | 49 |
| 07 | 50 |
| 08 | 50 |
| Média | 50,5 |

A dureza mecânica adquirida tende a resistir à penetração de outro material, bem como ao desgaste gerado pelo atrito sofrido pelas garrafas ao serem transportadas sobre a peça nesse caso, e em uma série de outros que envolvam tal propriedade mecânica e ações que resultem em perda indesejada de material progressivamente. A comparação do material não temperado revela os ganhos significativos dessa resistência e boa temperabilidade do material.

## METALOGRAFIA

Nesta etapa, os resultados foram divididos em três fases: a primeira consiste no corte das amostras, o embutimento a quente Figura 4, o lixamento e o polimento da peça Figura 5, de acordo com a metodologia utilizada baseada em normas e técnicas voltadas para ensaios metalográficos que possibilitou com êxito o ataque químico e a análise microscópica, segunda e terceira fase respectivamente, o objetivo até aqui era de corpos de prova com alta refletivade livre de sulcos e rabos de cometa, ambos defeitos foram verificados se ausentes sob as lentes do microscópio antes de se aplicar o reagente, a ausência também de imperfeições no embutimento e de ZTAs provenientes do seccionamento das amostras demonstraram boas condições para os ensaios.

**Figura 4:** Equipamento utilizado para o embutimento à quente das amostras. **Fonte:** Autores.

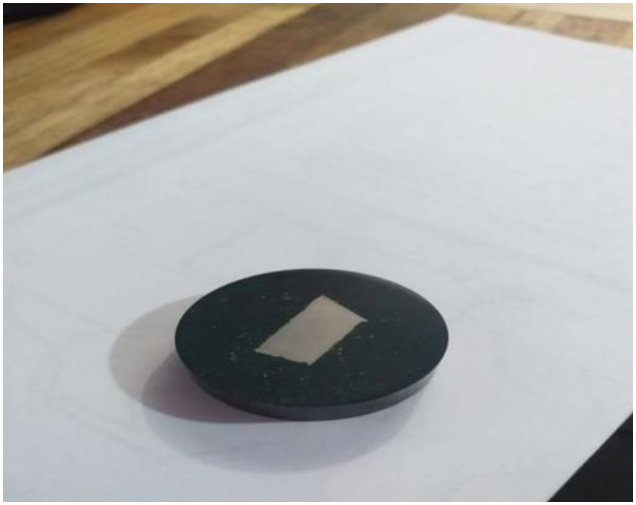


**Figura 5:** Liga AISI 420 embutida à quente em baquelite verde. **Fonte:** Autores.

Durante o ataque químico, avaliou-se também o tempo de exposição das amostras ao reagente utilizado glicerina + água régia (Hcl + 10ml glicerol + 5ml $Hno_3$), os ensaios foram realizados com a solução fresca, ou seja, manipulada no dia do ensaio, o tempo médio de reação foi de 5s para

uma melhor definição das fases à observação microscópica. Após esse período, ocorria a queima da superfície devido ao tempo excessivo de exposição das amostras ao reagente, tornando necessário retornar ao polimento para recuperar o polimento do corpo de prova e daí reiniciar o ataque químico, fez-se necessário também retorná-las à politriz quando o tempo de reação era insuficiente para revelar os contrastes das fases existentes do material, retomava-se então a superfície refletiva antes de atacá-la novamente.

**Figura 6:** Aplicação do reagente. **Fonte:** Autores.

Os elementos que compõem determinado material e as fases presentes em sua microestrutura revelam as propriedades existentes. A observação das mudanças de fases desta liga, vistas através do microscópio óptico nos corpos de prova, foi um fator relevante ao considerar que se deveria dar continuidade a tal experiência e fabricar a peça a ser instalada na enchedora, pois as comparações feitas entre as amostras tratadas e não tratadas termicamente com têmperas revelaram particularidades distintas nos dois casos, conforme mostram as Figuras 7, 8 e 9 a seguir:

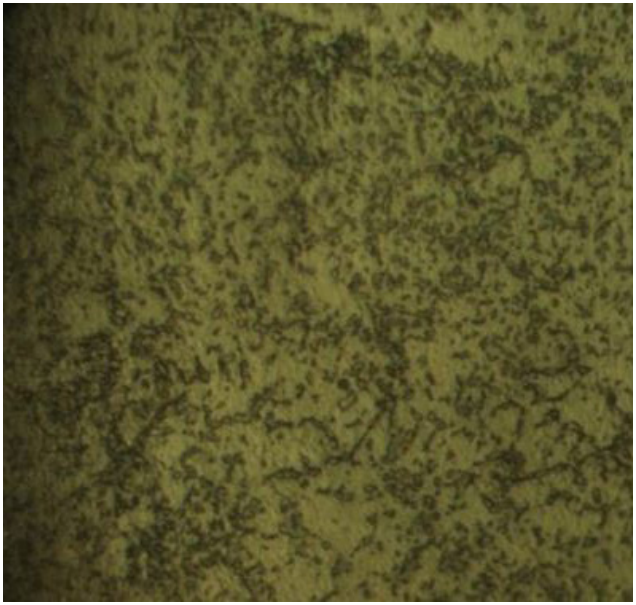


**Figura 7:** Microscópica com aumento de 50x da liga AISI sem têmpera, fase ferrita. **Fonte:** Autores.

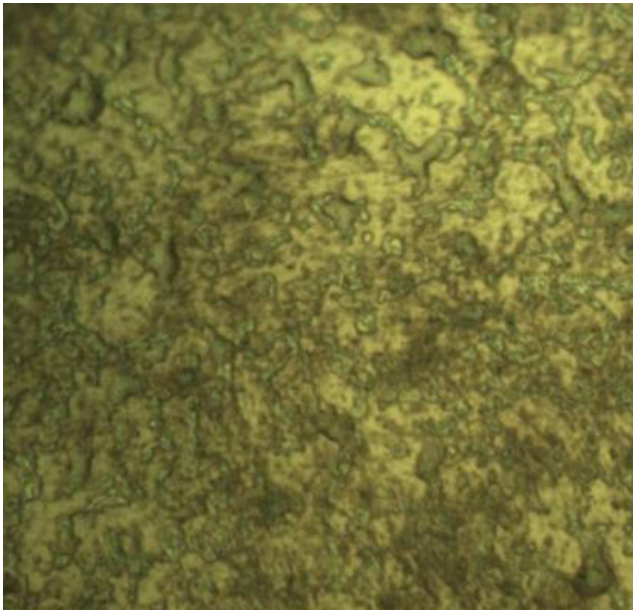


**Figura 8:** Microscópica com aumento de 50x da amostra temperada, fase martensita. **Fonte:** Autores.

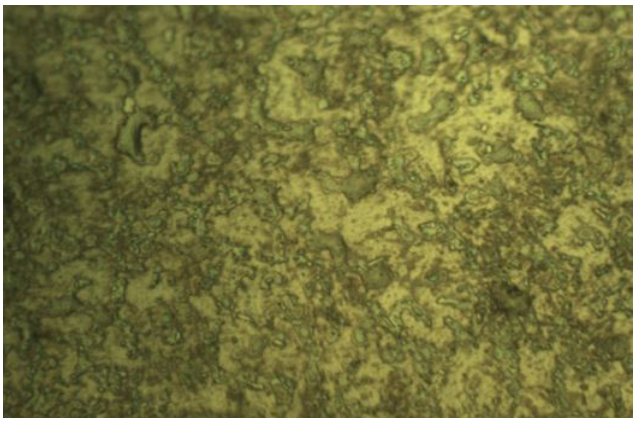


**Figura 9:** Aumento 50x da amostra temperada, os carbonetos de cromo são dissolvidos na temperatura de austenitização e a martensita é formada após resfriamento brusco do material. **Fonte:** Autores.

Os elementos químicos presentes na liga, não apenas a caracteriza como um material de boa temperabilidade, mas também influencia no retardo às transformações de fase durante o processo de têmpera. Prova disso foi a temperatura utilizada na zona crítica, faixa de austenitização, se comparada a do aço com teores de carbono entre 0,022% a 0,76% que pode ser temperado à temperatura de 727° C aproximadamente, a liga estudada o aço inox AISI 420 tem seus elementos dissolvidos na austenita acima de 900°C até 1100°C e nesse caso os resultados obtidos foram à temperatura de 1000°C, onde ocorreu as transformações necessárias e a formação de carbonetos por parte dos elementos da liga.

## APLICABILIDADE

Para aplicação da pesquisa utilizaram-se duas peças, uma com o material em seu estado normal e a outra com o devido tratamento para alteração de suas propriedades. O equipamento escolhido trata-se de uma enchedora isobárica, ou seja, o princípio de enchimento baseia se na igualdade das pressões entre o tanque de armazenamento e o recipiente a ser envasado. A linha contem duas enchedoras do mesmo fabricante, porém com modelos diferentes, enchedora 01 contém 73 válvulas de enchimento e 12 cabeçotes arrolhadores e a enchedora 02 contém 63 válvulas e 12 cabeçotes arrolhadores, a Figura 10 mostra o local de instalação das peças.

**Figura 10:** Enchedora 01. **Fonte:** Autores.

Na enchedora 02 foi instalada a chapa com tratamento térmico, esse equipamento rodou cerca de 1110 horas com a chapa instalada, isso corresponde dois meses de produção, a chapa não apresenta desgaste desde sua instalação, comprovando assim a efetividade do trabalho realizado. A Figura 11 mostra o estado da chapa após as horas trabalhadas, nota-se a área polida, pois o atrito da garrafa com a chapa deixou visual a forma com que as garrafas deslizam sobre a chapa.

**Figura 11:** Chapa de passagem com tratamento térmico. **Fonte:** Autores.

Para a enchedora 01 instalou-se a chapa em seu estado normal, as duas chapas foram instaladas no mesmo dia, portanto, a quantidade de horas trabalhadas é a mesma, com isso tem-se uma comparação mais precisa do período de troca antes e depois da realização do trabalho. A Figura 12 mostra o desgaste da chapa, principalmente, no início da passagem da garrafa, pois nesse ponto a peça recebe o impacto da garrafa, esse desgaste tem cerca de 2mm de profundidade, esse valor corresponde 28% da espessura da chapa.

**Figura 12:** Chapa de passagem sem tratamento térmico. **Fonte:** Autores.

O desgaste gerado pelo atrito é bem considerado, levando em consideração o tempo curto de trabalho, exemplo citado conforme a enchedora 02 causa prejuízos nos itens de custo da produção como quebra de garrafas, perda de produto, entre outros.

## VIABILIDADE ECONÔMICA

Histórico gerado por meio de relatório pelo sistema SAP, mostra a quantidade de vezes que a chapa foi substituída nos últimos 14 meses, o sistema SAP é utilizado para gerenciamento de manutenção da empresa, conforme Tabela 4, constata-se a data e o problema descrito na ordem. Essa linha possui duas enchedoras, cada enchedora possui três chapas de passagem, cada uma com suas medidas particulares, exercendo a mesma função dentro do equipamento mencionado.

**Tabela 4:** Relatório SAP. **Fonte:** Autores.

| ORDEM | LOCAL DE INSTALAÇÃO | DESCRIÇÃO | DATA DE CRIAÇÃO |
|---|---|---|---|
| **60239832** | CE-05010-ENCHEDORA 01 | Chapa de passagem danificada. | 08/01/2020 |
| **28320557** | CE-05010-ENCHEDORA 01 | Melhorar a fixação da chapa de passagem. | 09/02/2020 |
| **28365684** | CE-05010-ENCHEDORA 01 | Chapa de passagem intermediaria. | 29/01/2020 |
| **28441817** | CE-05010-ENCHEDORA 01 | Realiza ajuste na chapa de passagem | 05/03/2020 |
| **27891045** | CE-05010-ENCHEDORA 02 | ENCH 02- Chapa de passagem da estrela | 05/06/2020 |
| **27839869** | CE-05010-ENCHEDORA 02 | Chapa de passagem da estrela de saída | 12/06/2019 |
| **27843518** | CE-05010-ENCHEDORA 02 | Chapa de passagem da estrela de saída | 13/06/2019 |
| **28021906** | CE-05010-ENCHEDORA 02 | Troca da chapa de passagem do arrolhador | 26/08/2019 |
| **28127244** | CE-05010-ENCHEDORA 02 | Chapa de passagem danificada. | 04/10/2019 |
| **28414877** | CE-05010-ENCHEDORA 02 | Substituição da chapa de passagem. | 20/02/2020 |

Levando em consideração o histórico de troca desse componente, faz-se uma projeção de economia que a empresa pode ter com a redução de troca deste item de desgaste, os custos de troca de uma peça levam-se em conta a mão de obra especializada, a fabricação da peça e as horas paradas do equipamento, mas para esse trabalho específico coloca-se apenas o custo de fabricação da peça.

Relatório mostra um consumo de dez peças durante o ano, cada peça custa para a empresa R$ 791, a fábrica gastou cerca de R$ 7910 em um ano. A peça com o devido tratamento térmico aplicado custará para a empresa R$ 1000, como a linha é composta por duas enchedoras investimento inicial de R$ 2000. Levando em consideração a análise de aplicação da peça, estima-se durabilidade acima de 8760 horas, reduzindo 75% de gastos do ano anterior.

# Conclusão

Conclui-se que o tratamento realizado na peça atinge a expectativa, que é aumentar a dureza, melhorar as propriedades do material quanto ao desgaste por atrito. Os ensaios comprovam a eficácia do trabalho, podendo em outras oportunidades ser utilizados em outros componentes, pois a principal propriedade do aço inoxidável se manter preservada, que é a resistência à corrosão. A viabilidade econômica justifica se, devido ao baixo investimento para melhorar as propriedades do material, estudos analíticos e práticos comprovam esse dado importante.

Manter-se no mercado competitivo requer muito trabalho e dedicação de todos envolvidos, a área de manutenção de uma empresa encontra muitas dificuldades para uma

atuação efetiva, visto que a manutenção é uma despesa que nenhum empresário quer ter. Para a solução desse conflito, cabe aos envolvidos na área mostrar por meio de análises e projeções os ganhos em manter um equipamento, propor soluções e ações que justifique o investimento.

# Referências


1. Padilha, A. F.; Guedes, L. C. Aços inoxidáveis Austeníticos - Microestrutura e Propriedades, Editora Hemus Ltda., 170 p., São Paulo, **1994**.
2. Strobel Filho, Eloy; Lima, Alex Pereira de; Mariano, Neide Aparecida. Efeito do tratamento térmico na caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0, 02C. Rem: Revista Escola de Minas, v. 60, n. 1, p. 123-127, **2007**.
3. Ferreira, E. W. S. Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos utilizados em aplicações como Biomateriais. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPMEC). São João Del Rei – MG, **2013**;
4. Chiaverini, Vicente. Tratamento térmico das ligas metálicas. ABM. São Paulo: **2008**;
5. Bandeira, Giselly. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE TÊMPERA E REVENIMENTO SOBRE A RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO AISI 420. Disponivel em:<https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2018/INTERCORR2018_203.pdf> Acesso em: 23 de fevereiro de **2020**.
6. H. Chandler, Heat Treaters Guide: Practice and Procedure for Iron and Steel, 2nd ed., ASM international, **(1994)**, 775
7. Srivatsa, Kulkarni; Srinivas, Perla; Balachandran, G.; Balasubramanian, V. Improvement of Impact toughness by modified hot working and heat treatment in13%Cr Martensitic Stainless Steel. Disponível em:< https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316311133> Acesso em: 22 de setembro de **2019**.
8. Marcuci, José; Camilo, Claudia; Lorenzo, Pedro; Rollo. João. Mathematical modeling of dilatometric behavior of 420A and 440C martensitic stainless steels used in surgical tools, disponivel em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeb/v29n1/a04v29n1.pdf> Acesso em: 16 de Novembro de **2019**.
9. Chiaverini, Vicente. Aços e ferros fundidos. ABM. São Paulo: **2008**;
10. Bungardt, V. K. – "Untersuchungen über der Aufbau des Systems EisenChrom-Kohlenstoff", Arch. Eisenhüttenwesen, 29(3):193-203, **1958**.
11. Incropera, Frank P. *et al*. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, **2008**.



## Alexander S. Duarte*, Rodrigo L. Almeida & Gino B. Colherinhas

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: santos_alexduarte@hotmail.com.br

# Otimização Paramétrica Veicular Via Algoritmos Genéticos

Vinícius P. Lemes & Gino B. Colherinhas

Este trabalho apresenta uma aplicação de algoritmos genéticos em um veículo automotivo, para buscar parâmetros ótimos de rotação de motor utilizados nas mudanças de marcha com o objetivo de otimizar a economia de combustível e performance em aceleração de 0 a 100 km/h. Foram considerados os testes de economia de combustível padronizados FTP e HWFET. A otimização buscou três perfis de direção ótimos: uma otimização global, uma otimização específica que desconsidera o teste HWFET e uma que desconsidera o teste FTP. Os resultados foram comparados a um perfil típico de condução com mudanças de marcha a 3000 rpm e reduções de marcha a 1000 rpm. A solução da otimização global obteve 11,55% de melhoria na economia de combustível FTP, mas houve redução de 14,30% na economia de combustível HWFET. As soluções encontradas pelo AG nas otimizações específicas alcançaram melhorias de 13,71% na economia de combustível no teste FTP e 1,53% na economia de combustível no teste HWFET. Em todas as otimizações foram obtidas melhorias no tempo de 0 a 100 km/h de até 3,79%. Os resultados demonstraram que o algoritmo genético conseguiu obter bons resultados nas otimizações específicas.

**Palavras-chave***: otimização paramétrica; cadeia cinemática; veículo; algoritmos genéticos.*

This work presents an application of genetic algorithms in an automotive vehicle to search for optimum engine speed parameters used in gear changes in order to optimize fuel economy and acceleration performance from 0 to 100 km/h. Standardized FTP and HWFET fuel economy tests were considered. The optimization sought three direction profiles: a global optimization, a specific optimization that disregards the HWFET test and one that disregards the FTP test. The results were compared to a typical driving profile with gear changes at 3000 rpm and gear reductions at 1000 rpm. The global optimization solution achieved 11.55% improvement in FTP fuel economy, but there was a 14.30% reduction in HWFET fuel economy. The solutions found by AG in the specific optimizations achieved improvements of 13.71% in fuel economy in the FTP test and 1.53% in fuel economy in the HWFET test. In all the optimizations, improvements were made in the time from 0 to 100 km/h of up to 3.79%. The results showed that the genetic algorithm managed to obtain good results in the specific optimizations.

**Keywords:** *parametric optimization; powertrain; vehicle; genetic algorithm.*

# Introdução

Algoritmo genético (AG) é uma técnica de busca de dados utilizados em programação, introduzido por John Henry Holland na década de 1970. Os AGs são amplamente utilizados em diversas áreas da ciência como no gerenciamento de redes (supervisão do tráfego nos links e das filas nos buffers dos roteadores para descobrir rotas ótimas), problemas de otimização complexos (problemas com muitas variáveis e espaços de soluções de dimensões elevadas, como no gerenciamento de carteiras de fundos de investimento) e ciências biológicas (modelagem e processos biológicos para o entendimento do comportamento de estruturas genéticas)[1].

AG se baseia na evolução e na genética de populações utilizando a seleção de dados para atingir um objetivo, iniciando-se com um conjunto de soluções chamado de população. Cada solução é representada por um cromossomo. A cada geração o *fitness* de cada cromossomo é avaliado para selecionar os cromossomos da próxima geração[2,3].

Existem diversos métodos de seleção, entre eles o método da roleta, da classificação e do torneio. O método da roleta é clássico e usa uma seleção proporcional na qual cada cromossomo corresponde a uma "fatia" da roleta. O tamanho da fatia é proporcional à aptidão do cromossomo. O número de vezes que a roleta gira é o mesmo número de indivíduos da população e, quando a roleta para, seleciona o indivíduo marcado para a próxima geração. No método da classificação os indivíduos são classificados de acordo com sua aptidão e os valores esperados de cada indivíduo dependem da sua classificação, ao invés de sua aptidão bruta. Na classificação linear, cada indivíduo da população é classificado em ordem crescente de aptidão. O método do torneio seleciona uma parcela da população de forma aleatória. Esta parcela compete entre si de acordo com suas aptidões. Aquele que possuir a melhor nota é selecionado. Um parâmetro *k* define a quantidade de indivíduos selecionados para a competição. Alguns dos cromossomos selecionados cruzam e geram prole. Enquanto a prole é gerada ocorre, randomicamente, mutação e crossover. O crossover é a troca de parte dos genes entre dois cromossomos selecionados. Desta troca, são gerados novos descendentes. Este processo de evolução é repetido até que o objetivo seja alcançado[4].

O vasto campo de aplicação dos algoritmos genéticos permite que esta técnica seja utilizada na engenharia mecânica para buscar melhores parâmetros em veículos para obter um veículo ótimo. Dessa forma, os AGs podem ser utilizados para otimizar a aceleração ou velocidade máxima de um veículo, a economia de combustível, emissão de gases poluentes e outras características mecânicas como resistência e massa.

Entre suas aplicações, os AGs podem ser utilizados para otimizar as características de veículos elétricos híbridos com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e emissões de poluentes e aumentar a performance[5-8] e minimizar custos e massa[9]. A literatura também fornece estudos na otimização de veículos de combustão interna para velocidade máxima do motor[10] obter uma cadeia cinemática adaptada à diferentes perfis de uso[11] e na calibração de motor a diesel para reduzir emissões[12].

Este trabalho tem o objetivo de usar um AG para obter uma otimização paramétrica de performance em aceleração e em economia de combustível em um carro por meio da busca de parâmetros ótimos de rotação de motor utilizado nas mudanças de marcha.

# Referencial Teórico

Em se tratando de veículos de combustão interna a literatura fornece aplicações de AGs em ônibus para definir a velocidade de rotação limite mais adequada para mudança de cada marcha[10] e assim reduzir o consumo de combustível. Simulando 3 diferentes cursos que replicam o consumo de combustível do ônibus em diferentes cenários, foi possível obter uma rotação de motor ótima para a mudança de cada marcha que resultou em um ganho de 13,33% na economia de combustível comparado com o ônibus mudando marcha sempre em 2200 rpm.

Outra aplicação dos AGs em veículos de combustão interna está na otimização das razões de transmissão com

o objetivo de obter diferentes perfis de desempenho para um veículo[11]. O algoritmo procurou um perfil *Family*, que prioriza a economia de combustível, e um perfil Sport, que prioriza o desempenho em aceleração. Também há um perfil Best que prioriza ambas. Os resultados da otimização estão na Tabela 1.

**Tabela 1:** Otimização entre configurações Melhor, Sport e Family. **Fonte:** Colherinhas *et al*.[10] (p. 4, 2014)

| Setting | Veículos Otimizados | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Best | Sport | Family | Original |
| Fitness | 244,87 | 241,53 | 232,58 | 224,15 |
| Consumo (km/l) | 11,07 | 10,65 | 13,84 | 11,64 |
| 0-100 km/h (s) | 8,9 | 8,8 | 10,9 | 10,1 |
| rr (mm) | 283 | 286 | 289 | 290 |
| Ra | 4,17 | 4,03 | 3,4 | 2,95 |
| Rt1 | 3,62 | 3,44 | 3,51 | 3,25 |
| Rt2 | 2,72 | 2,41 | 2,84 | 2,06 |
| Rt3 | 2,55 | 1,62 | 1,26 | 2,42 |
| Rt4 | 0,88 | 0,98 | 1,09 | 1,03 |
| Rt5 | 0,72 | 0,8 | 0,66 | 0,73 |

A comparação dos resultados mostra que a otimização foi bem eficiente. O veículo *Best* superou o veículo original em 9,2%. O modelo Sport obteve aceleração 12,8% mais rápida e o modelo *Family* foi 18,9% mais econômico.

AG também tem se mostrado eficiente na redução de emissões e de consumo de combustível por meio da otimização na calibração de um motor a diesel[12]. Esta aplicação do AG foi capaz de reduzir simultaneamente as emissões de NOx em 20% e o consumo específico de combustível do freio (BSFC) em 1% sem aumentos em outras emissões.

# Metodologia

Primeiramente, são coletados os dados técnicos sobre o veículo que será otimizado (Saturn SL2 1.9L Manual 5 marchas). São informações essenciais a serem coletadas: massa do veículo, base da roda, raio da roda, razão de transmissão do eixo dianteiro, razões de transmissão para cada marcha do veículo, distância do centro de gravidade ao eixo traseiro, distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro, altura do centro de gravidade, aceleração máxima, rotação de passagem de marcha (rpm), coeficientes de arrasto, curvas de desempenho (aceleração, velocidade torque e potência). Também é importante obter o gráfico de consumo específico de combustível do freio (BSFC) e de potência média efetiva do freio (BMEP).

Um modelo matemático é programado em MATLAB para simular a performance do veículo a ser otimizado em diferentes testes como, tempo de 0-100 km/h e consumo de combustível em testes padronizados (HWFET e FTP). O módulo de otimização usado no MATLAB pode ser obtido em[13].

O Federal Test Procedure (comumente conhecido como FTP-75) é um teste padronizado pela US Environmental Protection Agency (EPA) para testar a economia de combustível de carros de passageiros por meio de uma rotina que simula um percurso na cidade Figura 1. Pode ser notado que neste teste a velocidade do carro oscila bastante devido aos vários momentos de parada do veículo, portanto é esperado que o consumo de combustível também descreva várias oscilações e que aconteça mais mudanças de marcha.

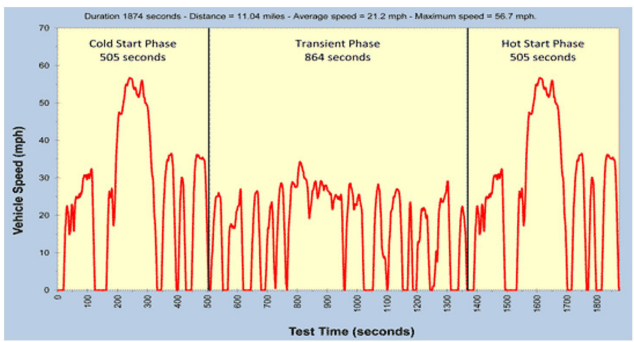



**Figura 1:** EPA Federal Test Procedure. **Fonte:** U.S Department of Energy[14]

A EPA também especifica o Highway Fuel Economy Test (HWFET), que é uma rotina para a simulação da economia de combustível em de um carro de passageiros

em uma auto  estrada Figura 2. O teste HWFET descreve um percurso com bem menos oscilações de velocidade que o teste FTP pois não há momentos de parada. Sendo assim, espera-se menos variação de consumo de combustível e menos mudanças de marcha nesse teste.

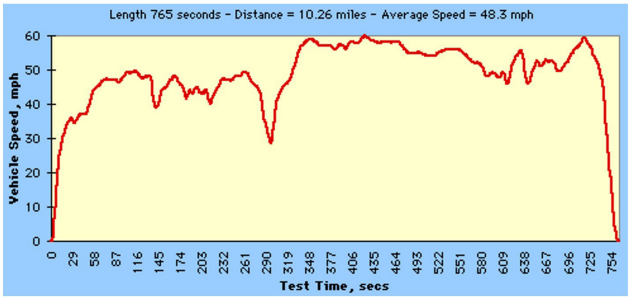



**Figura 2:** EPA Highway Fuel Economy Test. **Fonte:** U.S Department of Energy[14]

Nestas simulações foi considerado que o carro avança para a próxima marcha a 3000 rpm e retorna à marcha anterior a 1000 rpm. Estas rotações foram escolhidas porque refletem um cenário típico de condução do veículo que trabalha em rotações mais baixas.

Para simular o tempo de 0-100 km/h também foi considerado que o carro faz a mudança de marcha a 3000 rpm. Entretanto, foi feito um teste com a mudança em 6000 rpm que reflete a melhor aceleração possível do veículo para servir de comparação com os resultados buscados pelo algoritmo. Naturalmente, o AG buscará valores de rpm que fornecem um tempo de 0-100 km/h intermediário entre a aceleração típica a 3000 rpm e a aceleração máxima à 6000 rpm pois ele também considera a economia de combustível.

Se os resultados destes testes corresponderem com os resultados esperados para o veículo otimizado, o programa pode ser executado por meio de AG para que uma solução ótima seja encontrada.

# Resultados e Discussão

A otimização foi executada com 100 gerações, 100 cromossomos por geração, dizimação a cada 50 gerações, porcentagem de dizimação de 50%, probabilidade de elitismo de 2%, probabilidade de mutação de 2% e probabilidade de crossover de 60%. O AG utilizou, para seleção dos cromossomos, o método da roleta.

As primeiras tentativas de otimização consideravam o mesmo peso para o resultado dos testes de economia de combustível e de performance, entretanto, o AG buscou rotações baixas demais para mudança de marcha. Sendo assim, consideraram-se pesos diferentes para cada variável da otimização e os resultados mais adequados foram obtidos com um peso de 4 para o tempo de 0-100 km/h e peso 1 para cada teste de economia de combustível. O número de gerações foi aumentado para 2000 Figura 3.

Posteriormente, foram realizadas outras otimizações: uma chamada "Otimização (FTP)" Figura 4 pois desconsidera o teste HWFET e outra chamada "Otimização (HWFET)" Figura 5 pois desconsidera o teste FTP. Estas outras otimizações foram realizadas para buscar soluções mais específicas para um trajeto urbano e outro em autoestrada. As soluções mais adequadas para essas otimizações específicas foram encontradas usando um peso de 2.8 para o teste e aceleração e 1 para o teste de economia de combustível. Para diferenciar das demais, a primeira otimização foi chamada de "Otimização Global".

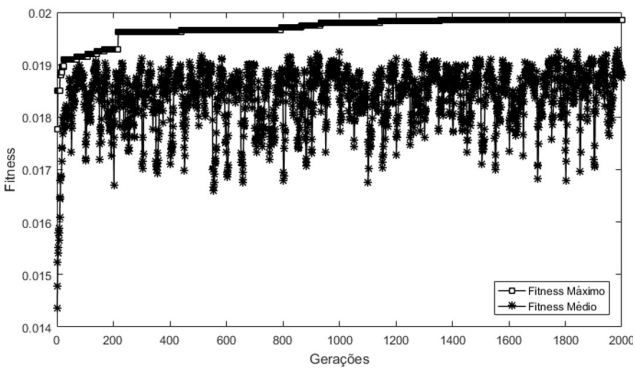



**Figura 3:** Execução da Otimização Global. **Fonte:** do autor

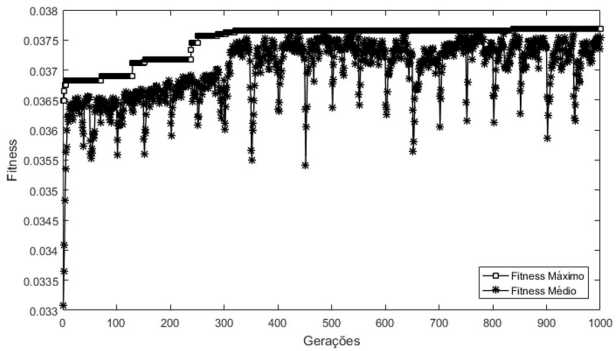



**Figura 4:** Execução da Otimização (FTP). **Fonte:** do autor

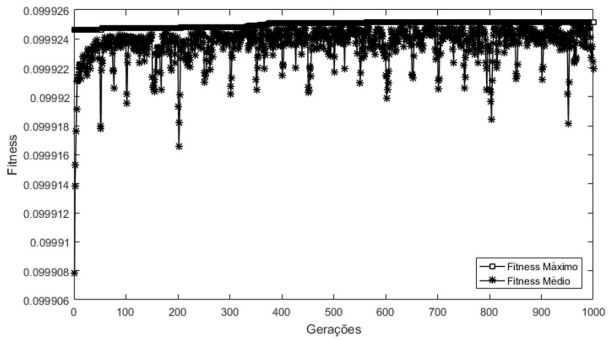



**Figura 5:** Execução da Otimização (HWFET). **Fonte:** do autor

O tempo de execução da otimização foi de 3006,4 segundos na Otimização Global, 1578,6 segundos na Otimização (FTP) e 1384,27 segundos na Otimização (HWFET) em um computador com processador AMD Ryzen 3 2200G e 16GB de RAM à 2933MHz. Pode ser observado que o aumento do número de gerações para 2000 na Otimização Global possibilitou que soluções melhores fossem encontradas até a geração de número 1357. Nas outras otimizações, 1000 gerações foram suficientes para alcançar convergência. A Tabela 2 a seguir lista os resultados encontrados em todas as otimizações.

**Tabela 2:** Resultados. **Fonte:** do autor

| | Original | Otimização Global | Otimização (FTP) | Otimização (HWFET) |
|---|---|---|---|---|
| **Tempo 0-100 km/h (s)** | 15,82 | 15,58 | 15,22 | 15,46 |
| **Economia Teste FTP (km/L)** | 9,70 | 10,82 | 11,03 | 6,99 |
| **Economia Teste HWFET (km/L)** | 15,04 | 12,89 | 9,70 | 15,27 |
| **Mudança da 1ª para 2ª marcha (rpm)** | 3000 | 2024 | 2232 | 4244 |
| **Mudança da 2ª para 3ª marcha (rpm)** | 3000 | 2530 | 2004 | 3049 |
| **Mudança da 3ª para 4ª marcha (rpm)** | 3000 | 3512 | 4653 | 2898 |
| **Mudança da 4ª para 5ª marcha (rpm)** | 3000 | 3086 | 3506 | 5330 |
| **Mudança da 2ª para 1ª marcha (rpm)** | 1000 | 1020 | 1001 | 1193 |
| **Mudança da 3ª para 2ª marcha (rpm)** | 1000 | 1013 | 1002 | 1909 |
| **Mudança da 4ª para 3ª marcha (rpm)** | 1000 | 2065 | 2992 | 1007 |
| **Mudança da 5ª para 4ª marcha (rpm)** | 1000 | 2965 | 2506 | 2738 |

A execução do teste de performance Figura 6 mostra um pequeno ganho de aceleração de 0-100 km/h em todas as otimizações. Na Otimização Global obteve-se um tempo de 15,58 segundos, o que representa uma melhoria de 1,52% quando comparado ao tempo da aceleração típica de 15,82 segundos. A Otimização (FTP) alcançou 15,22 segundos e a Otimização (HWFET), 15,46 segundos, o que representa uma melhoria de 3,79% e 2,28%, respectivamente. Todas ainda estão consideravelmente distantes da aceleração máxima possível (com mudança de marcha em 6000 rpm) de 10,07 segundos.

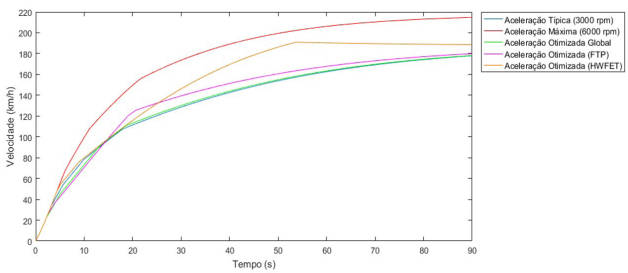



**Figura 6:** Teste de performance. **Fonte:** do autor

Assim como esperado, ocorreram mais mudanças de marcha no teste FTP e menos mudanças no teste HWFET Figura 7. Tanto na Otimização Global quanto na Otimização (FTP), o comportamento das mudanças de marchas no teste FTP mostrou uma tendência de manter marchas mais altas quando comparado à mudança de marchas típica a 3000 rpm. Entretanto, no teste HWFET, a Otimização (HWFET) é que mantém marchas mais altas na maior parte do teste,

enquanto que na Otimização Global há um uso mais prolongado da terceira marcha do instante 17 segundos até 338 segundos e na Otimização (FTP) sequer há uso da quarta marcha. Esta resistência ao uso da quarta marcha nessas otimizações pode ser explicada pela Tabela 2 devido a estas soluções terem buscado rotações de mudança da 3ª para 4ª marcha mais altas (4653 rpm e 3512 rpm, respectivamente).

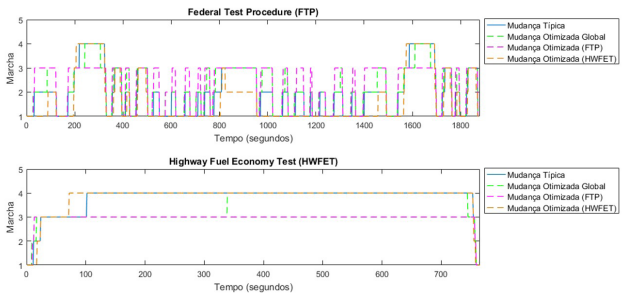



**Figura 7:** Mudança de marchas. **Fonte:** do autor

Pode ser observado na Figura 8 que o BSFC original se mantém entre 88 e 120 g/kWh na maior parte do tempo, com oscilações para 0 indicando os momentos de parada do carro, o que representa um consumo esperado para este tipo de veículo. No HWFET não há paradas (exceto ao fim do teste), consequentemente os valores de BSFC têm menos oscilação. Um comportamento semelhante ao original é observado com o BSFC Otimizado Global no teste FTP, entretanto com valores um pouco menores, indicando uma redução no consumo de combustível.

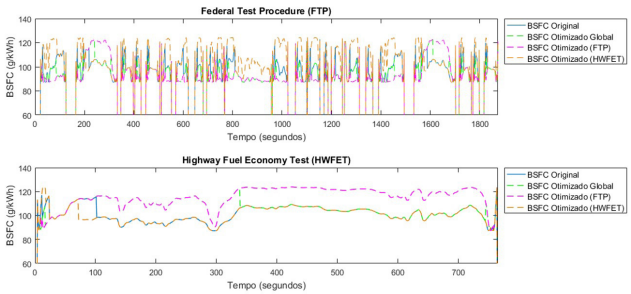



**Figura 8:** BSFC. **Fonte:** do autor

A Otimização (FTP) obteve valores de BSFC ainda menores que a Otimização Global. No teste HWFET, porém, o BSFC nas soluções Otimizado Global e Otimizado (FTP) foram maiores, explicitamente devido ao uso prolongado da terceira marcha.

A natureza inversamente proporcional entre BSFC e economia de combustível é observada no gráfico da economia de combustível instantânea Figura 9, com a Otimização Global exibindo valores mais altos de economia na maior parte do teste comparado à economia original. Percebe-se que a Otimização Global obteve uma economia média no teste FTP de 10,82 km/L, o que é melhor que a economia original de 9,70 km/L. No teste HWFET observa-se novamente uma redução na economia de combustível, com 12,89 km/L na economia otimizada média e 15,04 km/L na economia original.

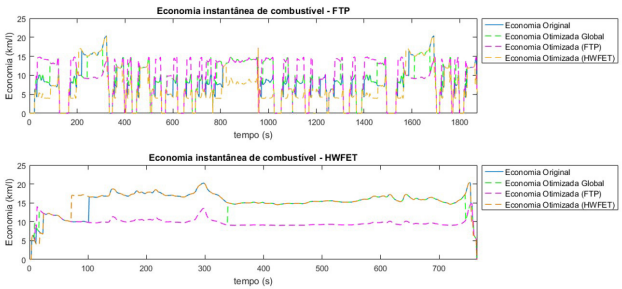



**Figura 9:** Economia de combustível instantânea. **Fonte:** do autor

As otimizações específicas, entretanto, obtiveram melhores resultados nos testes para os quais são voltados. A Otimização (FTP) alcançou uma economia de 11,03 km/L no teste (FTP). A Otimização (HWFET) obteve 15,27 km/L na economia de combustível comparado a 15,04 km/L na economia original.

# Conclusões

Este artigo apresenta uma ferramenta de otimização utilizando algoritmos genéticos para a redução do consumo de combustível e aumento da performance por meio da

busca de parâmetros ótimos de rotação do motor para mudança de marchas de um veículo automotivo típico, considerando distintos parâmetros de otimização focados para três perfis de direção: 1) a otimização global, que considera, simultaneamente, a direção na cidade (teste FTP) e na estrada (teste HWFET); 2) a otimização focada para a direção na cidade (FTP); 3) otimização para direção na estrada (HWFET).

As soluções encontradas pelo AG obtiveram resultados com ganhos significativos de economia de combustível sem comprometer a performance em aceleração comparado ao veículo com mudança de marcha em rotações fixas (3000 rpm para avançar a marcha e 1000 rpm para reduzir).

A Otimização Global gerou ganho de 11,55% no teste FTP com melhoria de 1,52% no tempo de 0 a 100 km/h, indicando que esta solução é adequada para trajetos urbanos. Entretanto, a Otimização Global obteve uma redução de 14,30% na economia de combustível no teste HWFET devido ao uso estendido da terceira marcha.

Os melhores resultados foram obtidos com as otimizações específicas para cada teste. A Otimização (FTP) obteve ganhos de 13,71% na economia de combustível no teste FTP com 3,79% de redução no tempo de 0 a 100 km/h. A Otimização (HWFET) obteve ganhos de 1,53% de na economia de combustível no teste HWFET com 2,28% de redução no tempo de 0 a 100 km/h. Naturalmente, as otimizações específicas não geraram resultados ótimos nos testes para os quais não foram otimizados: a Otimização (FTP) reduziu em 35% a economia do teste HWFET e a Otimização (HWFET) reduziu em 53,52% a economia do teste FTP. Entretanto, isto não significa um problema pois o veículo não trafega em um trajeto urbano e na autoestrada ao mesmo tempo.

Como as otimizações específicas apresentaram bons resultados quanto ao perfil de condução na estrada e na cidade, a ferramenta apresentada é bastante promissora para a programação de sistemas de transmissão inteligentes.

# Referências


1. M. N. D. Miranda., Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações, UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), [online]. Disponível em: http://www.nce.ufrj.br/GINAPE/VIDA/alggenet.htm. [Acesso em 22 05 **2020**].
2. D. Whitley, A genetic algorithm tutorial, Statatics and Computing, vol. 4, pp. 65-85, **1994**.
3. Kumar, M.; Husian, M.; Upreti, N.; Gupta, D. Genetic Algorithm: Review and Application, International Journal of Information Technology and Knowledge Management, vol. 2, nº 2, pp. 451-454, **2010**.
4. G. B. Colherinhas, Ferramenta de Otimização via Algoritmos Genéticos com Aplicações em Engenharia, Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM - 243 A/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xvii, 84p, **2016**.
5. W. Gao E S. K. Porandla, Design Optimization of a Parallel Hybrid Electric Powertrain, **2005** IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, p. 6, **2005**.
6. B. Huang, Z. Wang e Y. Xu, Multi-Objective Genetic Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Parameter Optimization, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5177-5182, **2006**.
7. L. Li, Y. Zhang, C. Yang, X. Jiao, L. Zhang e J. Song, Hybrid genetic algorithm-based optimization of powertrain and control parameters of plug-in hybrid electric bus, Journal of the Franklin Institute, vol. 352, nº 3, pp. 776-801, **2015**.
8. Z. Chen, C. C. Mi, R. Xiong, J. Xu e C. You, Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming, Journal of Power Sources, vol. 248, nº 15, pp. 416-426, **2014**.
9. O. Hegazy e J. V. Mierlo, Particle Swarm Optimization for optimal powertrain component sizing and design of fuel cell hybrid electric vehicle, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 601-609, **2010**.
10. I. Reis, I. Zeigerman, A. Diniz e A. Rodrigues, Optimization of the upper limit engine speed in urban buses using genetic algorithm technique, 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, **2015**.
11. G. B. Colherinhas, P. H. C. Dias, A. Diniz e A. P. S. P. Rodrigues, Automotive powertrain optimization by genetic algorithm analysing transmission ratios, EngOpt - 4th International Conference on Engineering Optimization, At Lisbon, Portugal, **2014**.
12. F. Millo, P. Arya e F. Mallamo, Optimization of Automotive Diesel Engine Calibration Using Genetic Algorithm, vol. 158, nº 1, pp. 807-819, **2018**.
13. G. B. Colherinhas, Genetic Algorithm MATLAB toolbox. Repositório Github [online]. Disponível em: https://github.com/Ginobc/Genetic-Algorithm-MATLAB-toolbox. [Acesso em: 22 10 **2020**.]

14. U.S. Department Of Energy, fuel economy – detailed test information, [online]. Disponível em: https://fueleconomy.gov/feg/fe_test_schedules.shtml [Acesso em 22 08 **2020**].

## Vinícius P. Lemes* & Gino B. Colherinhas

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: vena.p.lemes@outlook.com

# Avaliação do Projeto de Substituição de Gás Liquefeito de Petróleo para Gás Natural Liquefeito em uma Empresa Automobilística

Gino B. Colherinhas & Thâmara F. R. Araújo

Este artigo visa apresentar o projeto de substituição da matriz energética utilizada atualmente em uma fábrica para o gás liquefeito de petróleo (GLP). Com finalidade de mudanças do gás atual para o gás natural liquefeito (GNL), é possível obter qualidade no processo de pintura dos veículos, segurança do trabalho, energia limpa com redução de $CO_2$ e redução do custo de manutenção. Com este objetivo foram analisados, relatórios de condutas que operam o GNL, comportamentos estratégicos e suas consequências referentes às condutas que proporcionem lucros nos processos de pintura de carrocerias. Estes gases são aplicados em empresas automobilísticas, nos secadores, na cabine de pintura e no abastecimento de empilhadeiras. Para a utilização do GNL, é essencial a mudança nos cavaletes dos queimadores, de acordo com norma ABNT NBR 12313:2000, do sistema de combustão. Conclui-se, com a análise do payback que o gás natural apresenta redução de gasto de 10% do consumo atual e diminuição emissão pós-combustão de $CO_2$ de 14%.

**Palavras-chave***: gás liquefeito de petróleo; gás natural liquefeito; energia limpa; eficiência energética.*

This article aims to present the project to replace the energy matrix currently used in a factory for liquefied petroleum gas (LPG). With the purpose of changing from current gas to liquefied natural gas (LNG), it is possible to obtain quality in the vehicle painting process, work safety, clean energy with reduction of CO_2 and reduction of maintenance cost. To this end, reports of conduct that operate LNG, strategic behaviors and their consequences of conduct that provide profits in the painting processes of bodies were analyzed. These gases are applied, in automobile companies, in dryers, in the paint booth and in the supply of forklifts. For the use of LNG, it is essential to change the burner trestles, according to ABNT NBR 12313: 2000, of the combustion system. It is concluded, with the analysis of the payback that the natural gas presents a 10% reduction of the current consumption and a 14% post-combustion emission reduction of $CO_2$.

**Keywords:** *liquefied petroleum gas; liquefied natural gas; clean energy; energy efficiency.*

# Introdução

O Gás natural é um combustível fóssil mais limpo e eficiente, pois esta substância é composta por hidrocarbonetos que permanecem em estado gasoso em condições atmosféricas normais. É essencialmente composta pelos hidrocarbonetos metano ($CH_4$), com teores acima de 70%, seguida de etano ($C_2$ $H_6$) e, em menores proporções, o propano ($C_3$ $H_8$), usualmente com teores abaixo de 2%. É produzido tanto em associação com o petróleo (gás associado) com origina da forma independente (gás não-associado).

A liquefação do gás natural é produzida por meio de processo criogênico, o qual se deve refrigerar e manter a uma temperatura a cerca de -162ºC, ou inferior, a uma pressão próxima da atmosférica. Este processo exige um complexo sistema de armazenamento e transporte específico para a operação nessas condições. Entretanto, sob a forma de GNL, 600 m³ de gás natural, sob condições normais de pressão e temperatura (25°C e 100kPa), ocupam apenas 1 m³. O GNL deve ser conservado em tanques criogênicos sendo ainda necessário vaporizá-lo antes de sua utilização, uma vez que, atualmente, o estado liquefeito é utilizado somente para distribuição e armazenagem. Neste recurso de vaporização, há uma grande liberação de "frio", que pode ser utilizado, por exemplo, em câmaras frigoríficas[1,2].

Em um processo industrial, seu principal objetivo é a redução de custo para crescimento da lucratividade e maior competitividade de um produto. Dentre os principais recursos de um processo produtivo, tem-se obtenção de energia, em todas as suas formas, sendo ela elétrica, térmica e mecânica. Desta forma, as empresas apresentam constante preocupação com a minimização de custos, havendo a necessidade de buscar novas fontes de energias, sem prejudicar a produtividade. A empresa automobilística conta com um Sistema de Gestão Integrado (IMS) para melhoria contínua, que envolve as normas: ISO 9001:2015 sobre qualidade, ISO 14001:2004 sobre meio ambiente e ISO 45001:2018 sobre segurança do trabalho.

O processo produtivo em uma montadora de veículos, apresenta três tipos de áreas produtivas: montagem bruta, pintura e montagem final. O setor de logística fornece as peças direcionadas para a montagem bruta, dando a origem da carroceria. Na sequência, o produto segue para a pintura à base d´água, que é favorável ao meio ambiente. Por fim, segue para montagem final, que agrega acabamento ao carro. Durante cada processo de montagem do carro são feitas as medições e inspeções para assegurar o padrão[3].

O gás apresenta grande importância na etapa de pintura, composta por duas etapas: o pré-tratamento, que prepara a carroceria para receber a tinta, e o DeckLack, que é a pintura propriamente dita. Estes procedimentos consistem em várias camadas que são aplicadas separadamente, mas que precisam trabalhar juntas para fornecer a proteção contra corrosão, durabilidade e qualidade na cor[4].

O fluxo de um processo de pintura na indústria de automobilística. Após o processo de montagem bruta a carroceria é transportada para o buffer, que garante o fluxo na produção. Desta forma, caso suceda uma parada emergencial, isso não afetará produtividade dos outros setores. Em seguida, a carroceria é transportada do buffer para o setor da pintura, sendo realizada a troca dos trollers e a pré-limpeza da superfície das carrocerias, removendo as impurezas de todo o processo anterior e preparando a mesma para o banho da carroceria. Este banho conta com os seguintes passos: remoção da sujidade de óleo e graxas das carrocerias, remoção do líquido de desengraxante com a água potável, deposição de proteção anticorrosiva e aderência na carroceria através do tanque de fosfato, sendo finalizado pela aplicação de uma camada de tinta através do banho da carroceria com eletrodeposição (ED), gerando uma proteção contra corrosão. Em seguida, a carroceria passa pelo secador que é uma estufa a gás, que favorece a cura em temperaturas entre 160ºC a 220°C, dependendo do processo. Posteriormente, realiza-se a vedação nas junções entre a chapas da carroceria com a aplicação de sealer, evitando infiltrações de água e poeira[4-5].

Após a vedação e lixamento, inicia-se a etapa de Decklack, o qual remove as imperfeições decorrentes dos processos. O primeiro estágio é o primer, do qual pequenas imperfeições são preenchidas com uma base

e após pelo secador que realiza a cura do processo. O segundo estágio é denominado top coat, apresentando passos similares ao anterior, porém nesta etapa define-se a cor definitiva da carroceria e dá proteção à essa, aplicando o verniz que dá brilho e proteção à base. Finalizada a pintura da carroceria se desloca para estufa, para cura final. A seguir, a equipe de qualidade realiza o polimento e inspeção do produto. Caso a carroceria reprove, é feito o reparo no local. Por fim, aplica-se a cera na carroceria, e esta é movida para o buffer indo para a parte final da montagem, como pode ser observado na Figura 1 [6].

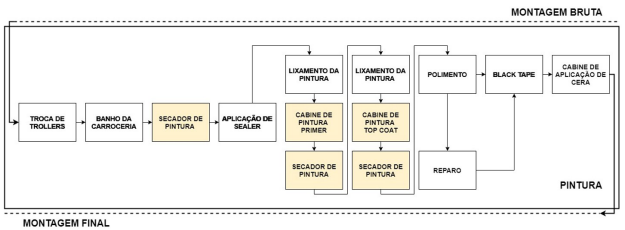



**Figura 1:** Fluxograma de processo de pintura. **Fonte:** referência [5].

Cada etapa do processo é muito importante, e obter uma carroceria com propriedades químicas, mecânicas, bom aspecto e acabamento perfeito é o que todo usuário de carro precisa. Portanto, neste trabalho, será abordada a importância do uso de combustível no processo de pulverização, sendo que a parte destacada no fluxograma é a aplicação de combustível.

## SECADOR DE PINTURA

Os secadores de pintura são processos de cozimento que concluem o tratamento de superfície da carroceria, com objetivo de polimerizar as camadas aplicadas. Ao secar, este endurece garantindo propriedades de proteções químicas e mecânicas. Este processo dever ser homogêneo em temperatura por toda extensão da estufa, para que o calor seja aplicado igualmente à carroceria, este processo denomina-se estufa de convecção forçada[6].

**Figura 2:** Saída da carroceria do secador. **Fonte:** Autor

Estes fornos de convecção são usados indiretamente no processo, os combustíveis usados nesse procedimento têm combinação de hidrocarbonetos (moléculas de carbono e hidrogênio) para realização da ignição, desta forma, a queima do combustível não incorpora na pintura e não suja o interior do forno. O tempo decorrido nos estágios que a carroceria é levada ao forno obtendo-se temperaturas por volta de 160ºC a 220ºC, dependendo do estágio da pintura. A carroceria é fixada no transportador terrestre (com suporte de troller) ou na transportadora de elevação (lançadeira), usados para carregar e descarregar a carroceria na posição apropriada. Inicialmente, do ponto 1 ao ponto 2 tem-se a entrada da carroceria ao secador, no qual há aumento na temperatura gradualmente. No momento de chegada da carroceria no ponto 2 ao ponto 4 a temperatura é uniforme sendo percorrida por uma corrente de ar na qual realiza-se a transferência de calor, dando-se a cura do material depositado. Enfim, do ponto 4 ao ponto 5, a temperatura diminui gradativamente até a conclusão da etapa no secador, como mostra a Gráfico 1 [6].

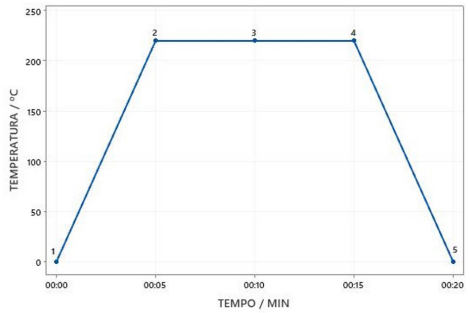



**Gráfico 1:** Estágio da carroceria no secador. **Fonte:** Autor

Para se realizar o cozimento são utilizadas fornalhas que atinjam temperaturas adequadas. As fornalhas são recipientes nos quais ocorre a ignição. Os queimadores são equipamentos cuja função é preparar a mistura de combustível e ar para realizar a combustão, numa fornalha ou câmara de combustão. O combustível e o ar entram separadamente e a quantidade desses são reguladas. Ao realizar a mistura ocorre a ignição da mistura. As chamas de gás, em sistema de combustão contínua, são alcançadas através de descargas contínuas dos regentes pelo bocal do queimador, pois dependendo da velocidade os escoamentos podem ser laminares ou turbulentos. O processo esquemático do queimador, no qual ocorre a mistura no bocal do queimador. Não há nenhuma possibilidade de retorno de chama, conforme a Figura 3 [7].

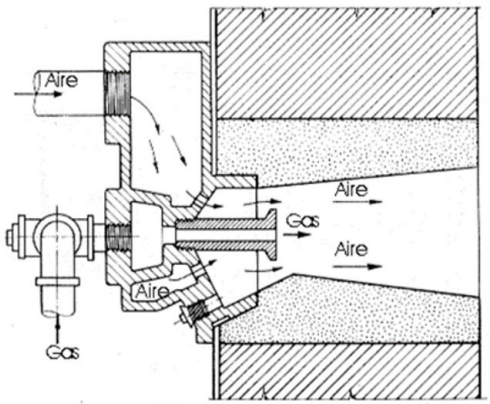



**Figura 3:** Ignição do queimador. **Fonte:** referência [8].

Após a combustão das fornalhas, secadores de pintura e cabine de pintura, ocorre a evaporação de gases dos produtos usados. Estes contêm principalmente éteres de glicol, ou outros mais pesados, como olefinas polietoxiladas derivadas de resinas epóxi, estes tipos gases chamam-se Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs). Estes gases podem causar problemas de adesão entre as camadas aplicadas, por isso os parâmetros de CO, $CO_2$, $NO_2$, $SO_2$ devem ser monitorados em todos os processos. Os gases VOCs direcionados ao Regenerative Thermal Oxidizer (RTO). O RTO são câmaras de redução de emissão de gases por meio de oxidação térmica (combustão), a qual destrói as moléculas de gases e reduz a poluição ambiental. Atualmente, o RTO é operado principalmente sob baixa temperatura, com uma concentração média de VOC de 200 a 600 ppm com base no propano. A eficiência de destruição de VOC está entre 97,5 e 98,5% [9].

## CABINE DE PINTURA

O processo na cabine de pintura requer grande quantidade de energia térmica, sendo necessário garantir a temperatura e umidade dentro do estande, devendo estar em aproximadamente 25°C e 60%, respectivamente. Desta forma, é necessário realizar a queima do gás que contém as moléculas de propano, portanto esses gases apresentam características de consumo energia relevantes para processo. Robôs são utilizados na pintura a spray. Este processo consiste na fixação de uma pistola de tinta spray ao atuador do robô, durante a aplicação o excesso é absorvido pelo ar que flui verticalmente pela cabine e é direcionado para um lavador na parte inferior sendo coletado.

O sistema de fluxo descendente com extração lateral. Dependendo da estação, esse ar será filtrado do teto a uma velocidade de 0,2 a 0,5 m/s. O insuflador capta o ar, guiando-o por dutos. O exaustor faz o trabalho oposto, coletando todo o ar da cabine e jogando-o em direção ao duto do RTO, de acordo com a Figura 5[10].

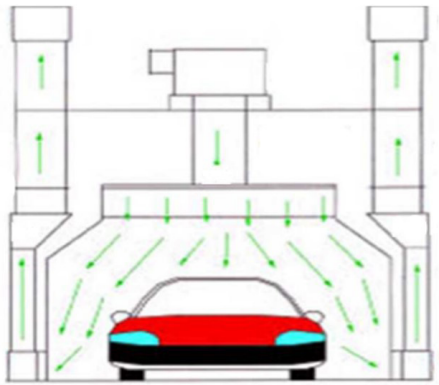


**Figura 4:** Cabine de pintura descendente extração lateral. **Fonte:** referência [10].

O sistema de fluxo descendente, realiza insuflação de ar direcionado aos filtros tipos bolsa com eficiência

95% e partículas de 25 mícron. Logo após, um queimador a gás com temperatura aproximada de 180°C e, em seguida, ocorre um processo de resfriamento com água potável. Por fim, o fluxo passa em dois filtros antes da entrada na cabine. As salas devem ser limpas e devem estar com a mesma temperatura da cabine, o que protegerá de efeitos extremos com sujeiras e variação de temperaturas e umidade.

# Metodologia

Nesta seção, os métodos usados para realizar a implementação do projeto serão apresentados. A estratégia de aplicação do estudo de caso é melhorar o processo de abastecimento de combustível e ajustar a distribuição do gás durante o processo de pintura. Após estudar a possibilidade de implantação, a empresa fez uma aquisição, possibilitando a substituição do GLP pelo GNL.

Para a avaliação deste projeto, pode-se definir o tipo de problema de acordo com o método do problema, caracterizá-lo de forma quantitativa e processá-lo em pesquisas, dados estatísticos e indicadores, seja ele desenvolvido na coleta de dados, ou em sua implementação real. O método escolhido é o mais adequado para o tipo de pesquisa proposta.

## ABASTECIMENTO E LOGÍSTICA

Atualmente, o método de controle do consumo de combustível na indústria é o gás liquefeito de petróleo (GLP), sendo utilizado indicador magnético em cada um dos tanques de combustível: P60.000 para abastecimento do prédio de pintura e P8.000 abastecimento de empilhadeiras, como mostra a Figura 5. A carreta abastece inicialmente o tanque P60.000 e, logo após, o P8.000.

O indicador magnético tem por finalidade indicar o percentual do gás contido no tanque. O reservatório possui uma boia em que é realizada a medição de consumo através do indicador magnético. Com isso pode-se ocorrer variação na mensuração de 5% a 10%. O consumo médio mensal de GLP no processo de pintura e das empilhadeiras, conforme a Tabela 1.

**Figura 5:** Tanque de combustível. **Fonte:** Autor

**Tabela 1:** Consumo mensal de GLP na indústria. **Fonte:** Autor

| Consumo Mensal de GLP na Indústria | |
|---|---|
| **ABASTECIMENTO** | **CONSUMO MÉDIO** |
| Processo de Pintura | 123.000kg |
| Empilhadeiras | 600kg |

## O FLUXOGRAMA DE SUPRIMENTO E COMPRA DE GLP

Inicialmente, o indicador magnético do tanque P60.000 é checado diariamente. Quando este atinge 30% de sua capacidade é determinada a substituição do GLP. Após notificação à equipe de logística, a solicitação é realizada diretamente ao fornecedor. Conforme a carreta entra na indústria, é realizado a pesagem em uma balança de 70 toneladas e, em seguida, os tanques são preenchidos. Ao término do abastecimento a carreta retorna novamente a balança e, caso haja excesso de combustível, a devolução é confirmada por meio de nota fiscal, de acordo com a Figura 6.

**Figura 6:** Fluxograma abastecimento atual. **Fonte:** Autor

A tecnologia moderna contribui para a informação e comunicação. Na área de logística, buscando uma nova etapa da Indústria 4.0 para atender aos requisitos de eficiência, redução de custos e gestão inteligente, é necessário investir em novos recursos tecnológicos e desenvolver processos e equipes qualificadas.

## INSTALAÇÃO DO GNL

A instalação dos dutos para implantação do combustível GNL exige reestruturação de rede e é imprescindível para manutenção da confiabilidade ao sistema de distribuição de gás ao processo de pintura. Portanto, a oleína (óleo ou graxa) no GLP e o conteúdo de substâncias insaturadas no gás aumenta, o que pode quebrar a cadeia de carbono e conectar cadeias maiores para formar uma "oleína" solidificada, principalmente, para reduzir a evaporação na aplicação taxa. No gasoduto atual, o filtro é aplicado onde o óleo pode ser removido, mas o filtro não pode eliminar completamente a passagem durante o período de guia, então as partículas farão com que o injetor de gás do queimador bloqueie. Como o gás natural liquefeito é produzido por meio de um processo de baixa temperatura, nenhuma oleína é usada no processo de produção.

A conversão de queimadores em GNL é essencial. Como o forno foi projetado para ser capaz de usar energia térmica e obter eficiência térmica, é um dispositivo que permite que o combustível seja completamente queimado de forma eficiente e contínua. Atualmente, o controle do fluxo de gás não é necessário pois a válvula de combustível e o dispositivo de controle são mecânicos.[10]

A Figura 7 mostra o processo de combustão do forno, que compreende os seguintes itens:

- Tanque de combustível: com as tubulações, contendo válvulas de expansão, válvulas de seguranças, filtros para remover as impurezas do gás, o combustível é direcionado para queimador, e ocorre no queimador ignição.
- Câmara de combustão: é projetada para o espaço onde o combustível deve ser oxidado para liberar energia térmica.
- Entrada de ar: a entrada de ar pelo bocal do queimador é ajustável, podendo produzir ar-combustível.
- Saídas dos gases: são as saídas do gás produzido pela combustão, para o forno a descarga do gás ocorre pela válvula de exaustão, sendo o gás de combustão conduzido imediatamente para a RTO.

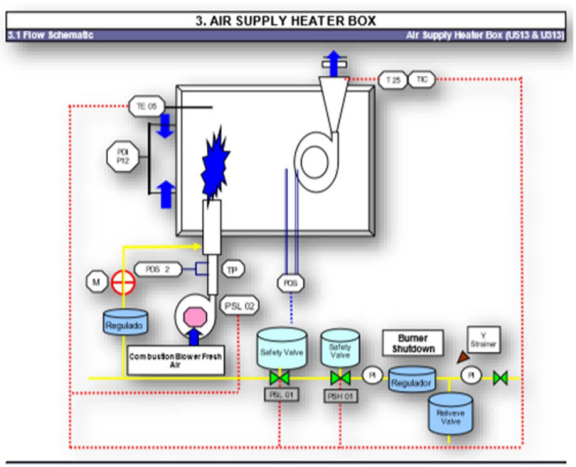



**Figura 7:** Diagrama da Fornalha. **Fonte:** Autor

A densidade e o calor são diferentes entre GNL e GLP, e a densidade é definida como a massa contida em uma unidade de volume. Portanto, para realizar a conversão do gás, é necessário trocar o bocal de gás dentro do queimador. A substituição dos bocais dos queimadores, os requisitos mínimos da norma de sistema de combustão ABNT NBR 12313 não foram alterados e as medidas de segurança são aplicáveis para iniciar, operar e parar equipamentos a gás. O orifício do bocal será maior, então o poder calórico do GNL é reduzido em comparação com o GLP. O volume e a massa do GNL são pequenos, portanto, podem ser controlados, como demostra a Tabela 2 [11].

**Tabela 2:** Tabela de conversão de combustível. **Fonte:** referência [14].

| Tabela de Conversão de Combustível | | | |
|---|---|---|---|
| COMBUSTÍVEL | PCI | DENSIDADE | FATOR DE CONVERSÃO |
| Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) | 11.025 kcal/kg | 2,50 kg/m³ | 1,25 m³/kg |
| Gás Natural Liquefeito (GNL) | 9.065 kcal/Nm³ | 0,766 kg/m³ | 1,00 m³/kg |

Para se obter eficiência térmica efetiva e contínua no forno substituído por gás, é necessário analisar o consumo médio mensal de GLP na Tabela 1. Portanto, é necessário multiplicar o consumo pelo fator de conversão para obter o equivalente em m³, atender ao trabalho necessário para o processo de pintura.

$$GNL = \text{Consumo GLP X } 1{,}25 \qquad \text{(Eq. 01)}$$

Comparado com outros combustíveis fósseis, o gás natural liquefeito apresenta vantagens ambientais significativas devido às menores emissões de gases poluentes que causam o efeito estufa. Os principais poluentes atmosféricos emitidos pela indústria de gás natural são dióxido de carbono ($CO_2$), óxidos de nitrogênio (NOX) e, em menor grau, monóxido de carbono e alguns hidrocarbonetos de baixo peso molecular, incluindo metano.

A indústria apresenta relatórios técnicos, mostrando resultados relacionados ao monitoramento de emissões atmosféricas de sistemas de pós-combustão usados em RTO. Portanto, em comparação com o GPL, a ISO 6974 reduz o $CO_2$ em 14% durante o processo de combustão gás natural liquefeito. Por meio de coleta de amostras e análises laboratorial, é determinada a concentração de material particulado (PM): os gases de combustão são os dióxidos de enxofre ($SO_2$), dióxido de nitrogénio ($NO_2$) e monóxido de carbono (CO). No processo de pintura, são descarregados metal e VOC, e todos esses componentes são encaminhados diretamente para a RTO, que possuem duas câmaras de recuperação de calor regenerado, proveniente da combustão interna do gás GLP.

As atividades de coleta, análise e medição em campo obedecer às Normas Técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), USEPA (U. S. Environmental Protection Agency) e CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Os limites de emissão permitidos na indústria é conforme resolução (Concelho Nacional do Meio Ambiente) CONAMA 316/2002, Art. 38, que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos e Resolução (Secretária do Meio Ambiente) SEMA 16 do Estado do Paraná. Seção III - Padrões de Emissão Atmosférica para Fontes Estacionárias por Poluentes, Subseção V Substâncias Gasosas Inorgânicas, Art. 68, itens V[12].

Embora cada negócio tenha seus próprios riscos, calcular o tempo necessário para obter o retorno do investimento é importante para a viabilidade da empresa. É necessário utilizar as mais diversificadas tecnologias existentes e utilizadas no mercado, bem como os mais amplos conhecimentos para investir no mercado para analisar e avaliar todas as possibilidades e características de implementação de projetos de investimento, e o objetivo é fornecer mecanismos e os possíveis riscos e incertezas são reproduzidos para eliminar ou reduzir os possíveis danos causados por esses riscos e incertezas, ou seja, nesta fase, a importância desta análise inicial de investimento é mais evidente. Riscos de projeto mais diretos, possíveis e importantes podem identificar sinais de problemas maiores que podem levar ao encerramento ou abandono de projetos de investimento[13].

$$Payback = \frac{Custo\ GNL + Investimento\ Projeto}{Soma\ Do\ Custo\ GLP\ (acumulativo)} \qquad \text{(Eq. 02)}$$

A Equação 02 é interpretada como o cálculo de um período de payback simples: o custo de utilização do GNL no processo e os recursos investidos no projeto, dividido pela soma do custo do GNL, o período é cumulativo. O período é o tempo desde a execução inicial do investimento até a amortização do investimento, ou seja, o tempo em que o fluxo de caixa acumulado se torna um número positivo.

# Resultados e Discussão

Para realizar nova logística e abastecimento do combustível, não há necessidade de inspeção visual in loco para proceder à requisição e reposição do gás. Por meio do sistema de telemetria, foi projetado o monitoramento online de parâmetros do nível do tanque de combustível e consumo real, no qual o EDI (Electronic Data Interchange)

emite alerta ao departamento de logística e ao fornecedor, para realizar reposição combustível na indústria evitando-se retrabalho. O fornecedor fará imediatamente o transporte, à medida que a carreta for avançando, a rastreabilidade do combustível. Ao entrar na indústria, o procedimento continuará a determinar o peso da carreta e abastecimento dos tanques. Por meio desse controle de abastecimento, a indústria pode controlar e gerenciar as operações para não afetar a produtividade, como na Figura 8.

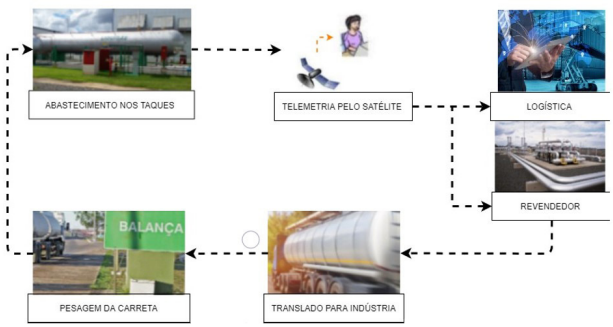



**Figura 8:** Fluxograma abastecimento atual. **Fonte:** Autor

A partir da análise do projeto sistema de telemetria, possui eficientes capacidades de gestão logística. Os dados do consumo mensal gás GLP são de janeiro de 2019 a agosto de 2020, sendo que dezembro 2019 férias coletivas e mês de abril 2020 a produção foi suspensa devido à pandemia global de coronavírus (COVID-19). O consumo do processo pintura depende da demanda da produção, então a equação (1) é usada para calcular o consumo de GNL necessário para atende o processo.

Observar que o gás GNL terá um maior consumo no processo, pois a razão para esse aumento é que o poder calórico entre os dois gases conforme mostrado na Tabela 2, deve atingir a mesma capacidade de trabalho fornecida pelo GLP nas cabines de pintura e secadores, conforme a Gráfico 2.

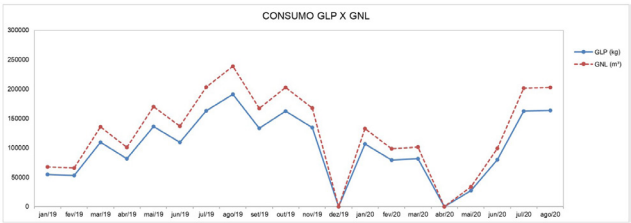



**Gráfico 2:** Consumo dos combustíveis. **Fonte:** Autor

A partir da análise do consumo dos combustíveis conclui-se que o valor comercial entre os dois gases é diferente. No Brasil, o custo unitário do gás liquefeito de petróleo é em média de 4,28 reais/kg, e o valor unitário do gás natural liquefeito é em média de 2,00 reais/m$^3$. O gás natural tem um preço barato no mercado enquanto o GLP, por ser um combustível popular (como gás de cozinha) será constantemente ajustado.

O custo de consumo utilizado na produção. Vale destacar que mesmo que o consumo do processo de GNL seja alto, haverá retorno. Quanto maior o consumo comportamental do gás natural liquefeito, maiores serão os benefícios de sua utilização e quanto maior será o consumo do gás liquefeito de petróleo, prejudicial ao uso do gás, e o custo da indústria será elevado, como pode ser observado no Gráfico 3.

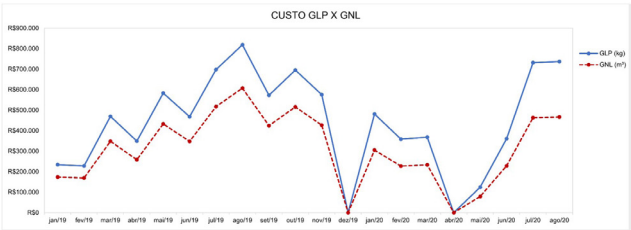



**Gráfico 3:** Custo consumo dos combustíveis. **Fonte:** Autor

A indústria fornece os resultados do monitoramento do sistema de pós-combustão das emissões atmosféricas a cada dois meses. O gás que sai do processo de pulverização é direcionado para a RTO, na qual a câmara amolece as partículas do gás. A indústria contrata equipe terceira para fornecer relatórios da análise. O que precisa ser esclarecido é que em função da escuta das leis e regulamentos municipais,

estaduais ou federais, os regulamentos estipulam os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para as atividades industriais. As resoluções do CONAMA e SEMA são utilizadas como padrões de comparação.

A amostragem foi realizada em triplicata por um eixo horizontal cruzando o orifício da fonte de coleta (chaminé). Cada coleta dura 60 minutos e são avaliados os seguintes parâmetros: temperatura, velocidade, vazão, umidade do gás e isocinética dos gases. Todos os parâmetros avaliados e fontes selecionadas atendem aos requisitos de procedimentos de amostragem e padrões técnicos aceitos por todas as agências do país. Neste projeto, o $CO_2$ será reduzido, o que mostra o relatório elaborado entre 2019 e 2020, pois o estudo constatou que existe uma diferença entre os dois gases. De acordo com a análise da ISO 6974 das emissões $CO_2$ entre os dois gases, o GNL será reduzido em 14%, conforme dados do Gráfico 4 [14].

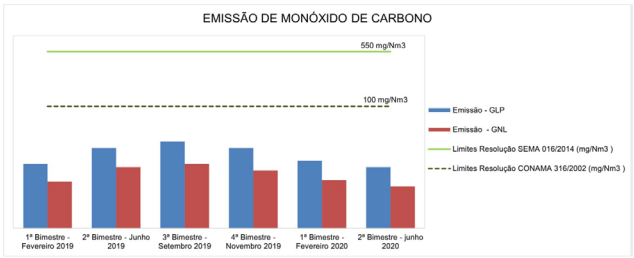



**Gráfico 4:** Emissão de monóxido de carbono. **Fonte:** Autor

Calcular o período de payback simples nada mais é do que saber a quantidade de períodos (podem ser dias, meses ou anos), para que o fluxo de receitas ultrapasse o capital de investimento. As tendências de mercado, especialmente aquelas no setor de combustíveis, é de rápida mudança econômica, portanto, considerando o investimento na implementação de projetos, os dados podem mudar. O investimento inicial é de R$1.241.000,00 (um milhão e duzentos e quarenta um mil reais). Calcular o retorno anual do investimento de acordo com a Equação 02, mostrando a relação entre o custo do GNL mais o investimento e o custo do GLP, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3:** Tabela de conversão de combustível. **Fonte:** Autor.

| Payback Simples Acumulativo | | | |
|---|---|---|---|
| CUSTO | 2019 | 2020 | **TOTAL** |
| GLP | R$36.722.400,00 | R$104.517.600,00 | **R$141.240.000,00** |
| GNL e Investimento do Projeto | R$42.234.744,00 | R$92.713.656,00 | **R$134.948.400,00** |

O faturamento médio mensal do primeiro ano, portanto o capital de investimento será totalmente quitado em 11 meses. Em dois anos, o mesmo o projeto reduzirá R$ 6.291.600,00 (seis milhões, duzentos e noventa um mil e seiscentos reais). A avaliação do período de recuperação do investimento uma apresenta uma solução econômica atraente para o setor com resultados satisfatórios, como mostra no Gráfico 5.

**Gráfico 5:** Payback simples (acumulativo). **Fonte:** Autor

Fazendo uma análise geral, a avaliação do projeto de substituição do gás liquefeito de petróleo para o gás natural liquefeito busca meios e inovações ao apresentar novas tecnologias e energia limpa no processo.

# Conclusões

Este trabalho apresenta a importância e relevância do projeto de substituição do GLP pelo GNL. São apresentados métodos e resultados que atendem de forma satisfatória aos objetivos propostos, obtendo resultados conclusivos sobre o desempenho e custo do gás GNL.

Estudos demonstram que os sistemas de telemetria podem ajudar a fornecer informações e comunicações, atender aos requisitos de eficiência, redução de custos e gestão inteligente, por isso é necessário investir em novos recursos tecnológicos, processos de desenvolvimento e equipes. Considerando essa análise dos resultados, esse método reduz o retrabalho, controla e gerência as operações para evitar impacto na produtividade.

Em relação à reestruturação da tubulação, com a troca do combustível, reduz-se o custo de manutenção dos equipamentos, com controle de entrada ar-combustível e redução de oleínas, minimizando manutenções corretivas, adotando nos queimadores a manutenção preditiva com acompanhamento periódico dos equipamentos. A emissão de monóxido de carbono apresenta comportamento diferente entre os dois gases. O gás GNL apresenta concentrações inferiores de material particulado dentre outros componentes, destacando-se como energia limpa em processo.

O objetivo proposto é o de analisar a viabilidade econômica de implantação de um projeto de substituição de gás liquefeito de petróleo para o gás natural liquefeito em uma empresa automobilística, apresentando os índices encontrados e evidenciando o retorno esperado para este projeto, bem como o método mais adequado de análise. Observou-se no payback simples em dois anos que o projeto reduzirá R$ 6.291.600,00 (seis milhões, duzentos e noventa mil e seiscentos reais).

Após a conclusão desta pesquisa, provou-se que o investimento se tornou viável no estudo de caso da empresa aplicadora. Também vale ressaltar a importância do estudo de viabilidade do projeto e fornecer aos investidores (condições) necessárias de decisões relacionadas a investimentos e projetos.

# Referências


1. P. A. Gomes, Avaliação das Oportunidades do Gás Natural Liquefeito em Pequena Escala no Brasil sob as Perspectivas do Produtor, Transportador e do Consumidor Final: UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, **2018**. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/ 2018/132-avaliacao-das-oportunidades-do-gas-natural-liquefeito-em-pequena-escala-no-brasil-sob-as-perspectivas-do-produtor-transportador-e-do-consumidor-final. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
2. D. M. Shen, Estudo da Viabilidade Técnica de um Ciclo de Liquefação de Gás Natural de Pequena Escala: São Paulo, SP, **2006**. Disponível em: http://www.mecanica-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2012/08/TCC_005_2006.pdf. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
3. L. Faria, A Prática da Melhoria Contínua em Processos Sustentáveis: Estudo de Caso Sobre a Redução do Consumo de Água em uma Indústria Automobilística, Trabalho de Conclusão de Curso, Juíz de Fora, MG, **2010**. Disponível em: https://www.ufjf.br/engenhariadeproducao/trabalho-de-conclusao/banco-de-tccs/tccs-2010-3/. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
4. C. M. Ciconelli, Estudo de Caso: Aplicação da ferramenta Kaizen no processo de recirculação de tintas no setor de pintura de uma indústria automotiva, Monografia, UFJF, Juíz de Fora, MG, **2007**. Disponível em: https://www.ufjf.br/ep/files/2009/06/tcc_jan2007_carlosciconelli.pdf. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
5. Bysko, Sara; Krystek, Jolanta; Bysko, Szymon. Automotive Paint Shop 4.0. Computers & Industrial Engineering, v. 139, p. 105546, **2020**. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835218305965. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
6. F. G. Garcia, Proceso De Pintura En La Industria De Automoción. Valladolid, Espanha, 2014. Disponível em: http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/11607/TFM-I-180.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
7. M. A. Dantas, Análise Do Desempenho De Um Queimador Infravermelho Funcionando Com Gás Liquefeito De Petróleo E Glicerina, Natal, RN, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/12918/1/An%C3%A1liseDesempenhoQueimador_Dantas_2010.pdf. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
8. E. Brizuela e J. C. Loza, 67.30 Combustión (2da parte), Facultad de Ingeniería, UBA, Buenos Aires, Argentina, 2003. Disponível em: https://xdoc.mx/documents/6730-combustion-5e8a406bb1955. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
9. B. B. Soares, A Utilização Do Modelo De Simulação Computacional Para Análise E Modificação De Um Sistema De Produção De Pinturas Automotivas, Caxias do Sul, RS, 2013. Disponível em: https://repositorio.ucs.br/handle/11338/798. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
10. M. S. Maximo, Estudo De Soluções Energéticas Para Cabine De Pintura Automóvel, Faro, Portugal, 2012. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/61518981.pdf. Acesso em: 22 Dec. **2020**.
11. P. S. Neto, Implementação Da Queima De Biogás Em Caldeiras, Varginha, MG, 2011. PHELIPPE, Salomão; Disponível em: http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/229/1/TCC_PHELIPPE_OFICIAL_R_FINALr1_%281%29%5B1%5D.pdf. Acesso em: 22 Dec. **2020**.

12. M. Z. Arruda, Mateus Z. Análise De Combustíveis de Caldeiras, Passo Fundo, RS, 2009. Disponível em: http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2009-2/MATEUS%20ZART% 20DE%20 ARRUDA.pdf. Acesso em: 22 Dec. **2020**.

13. Petrobras, Petrobras.com.br, [Online]. Disponível em: https://petrobras.com.br/pt/. Acesso em: 11 Nov. **2020**.

14. A. M. Van Der Veen, P. R. Ziel e J. Li, Validation of ISO 6974 for the measurement of the composition of hydrogen-enriched natural gas, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, nº 46, pp. 15877-15884, 2015. Disponível em: http://www.citac.cc/CITACvote_Paper6.pdf. Acesso em: 22 Dec. **2020**.

## Gino B. Colherinhas & Thâmara F. R. Araújo*

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: thamarafrancielle@gmail.com

# Estudos da Implementação da Técnica de Gerenciamento OEE em uma Indústria Farmacêutica

Adriano R. Silva, Jaques J. L. Silva, Roberto C. B. Farias, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Sonimar R. M. Dias

Com a crescente concorrência no mercado consumidor, as empresas necessitam produzir mais, com menor custo e com melhor qualidade. Este artigo objetiva o estudo à implantação do OEE (Overall Equipment Effectiveness), sendo uma ferramenta de gestão, mensurando a eficiência do processo produtivo em uma indústria farmacêutica de Anápolis-GO. Para tanto, instalou-se um sistema de supervisório permitindo obter dados de produção disponíveis em tempo real, realizando cálculos de OEE, expondo em telas gráficas percentuais de disponibilidade, performance, qualidade, produtividade. Com a implantação do OEE, originou-se uma nova visão do acompanhamento de produção, possibilitando tomadas de decisões mais rápidas e eficientes.

**Palavras-chave***: indicadores; performace; eficiência.*

With increasing competition in the consumer market, companies need to produce more, at lower cost and with better quality. This paper aimed to study the implementation of OEE (Overall Equipment Effectiveness), being a management tool, measuring the efficiency of the production process in a pharmaceutical industry of Anápolis-GO. For that, a supervisory system was installed, allowing to obtain production data available in real time, performing OEE calculations, exposing in graphic displays percentage of availability, performance, quality and productivity. With the implementation of the OEE, a new vision of production follow-up was created, enabling faster and more efficient decision-making.

**Keywords:** *indicators; performance; efficiency.*

# Introdução

Com o aumento da livre concorrência do mercado consumidor, as empresas necessitam buscar focos em gestões inteligentes, eficientes e eficazes, logo essas empresas buscam otimizar o desempenho dos resultados de seus processos produtivos. Para melhor gerenciar seus processos, quanto mais informações e recursos gerenciais dispuser, mais altas serão as chances de alcançar os resultados e benefícios planejados[1-6].

Uma das finalidades mais recorrentes para implementação de qualquer sistema que aspira o controle do chão de fábrica é o acréscimo da produtividade, definida como a relação entre produção e recursos utilizados para produzir determinado produto, assim pode-se obter um conceito formado para o chão de fábrica, que é diminuição de perdas, aumento das velocidades de produção e melhoria da utilização da capacidade da máquina[2].

A metodologia do OEE - (Efetividade Global do Equipamento, do inglês – Overall Equipment Effectiveness) assim como a TPM - (Manutenção Produtiva Total, do inglês – Total Productive Maintenance) utiliza uma mesma base primordial para avaliar a performance de um equipamento, apresentando como uma das alternativas de gerenciamento aprimorado do chão de fábrica[3,5].

O que impulsionou o OEE a ser extensivamente utilizado é a necessidade de saber efetivamente o quanto determinado equipamento foi utilizado, ou quantos itens com qualidade ele produziu, relacionando-o a quantidade destes itens que o equipamento tem capacidade de produzir[4].

Assim a Eficiência Global do Equipamento não se limita às perdas de produção ou qualidade, abrange também onde estão as perdas, contribuindo para o trabalho dos colaboradores da produção e necessita definir ações para atingir as metas de produção[5].

O crescente avanço da internet e suas tecnologias digitais impulsiona os sistemas ciber-físicos (sistema composto por elementos computacionais colaborativos com o intuito de controlar entidades físicas) a se comunicar, cooperar com os humanos em espaço e tempo utilizando a computação em nuvem, ambos empregados pelos participantes dos elos que formam os processos econômicos dos serviços internos e intra-organizacionais. A partir do surgimento da Indústria 4.0 (4ª Revolução Industrial – a indústria do futuro) a utilização de fábricas inteligentes com os sistemas ciber-físicos e suas estruturas modulares monitoram os processos físicos, dando origem a uma cópia virtual do mundo real com tomada de decisões dissociadas[6].

Diante do exposto, este trabalho objetiva o estudo e a avaliação da utilização da ferramenta Overall Equipment Effectiveness – OEE, como indicador de melhoria da eficiência de produção do equipamento, em uma indústria farmacêutica instalada no maior polo farmoquímico da América Latina, na cidade de Anápolis-Goiás.

# Referencial Teórico

### A IMPORTÂNCIA DE CONTROLAR PROCESSOS E PRODUTOS

Atualmente, a fim de melhor controlar seus processos e produtos, as empresas realizam investimentos em treinamentos e capacitações, sobre as diferentes ferramentas da qualidade e em softwares que possam garantir confiabilidade das informações, como propostas de elaboração de softwares que gerenciam sistemas de Planejamentos de Recursos Empresariais – ERP. Esses softwares controlam toda a empresa, processando e manejando suas informações, processos que são contabilizados e armazenados como arquivo digitais, gerando diretrizes de negócio bem definidas e permitindo maior controle sobre alguns pontos vulneráveis do empreendimento, como a administração de custos, controle fiscal e estoques. Assim, a implantação desses sistemas finalizaem diversos sistemas que atuavam de forma isolada, com informações repetitivas e não confiáveis[7-21].

A base da sustentação dos negócios eletrônicos é o ERP, sendo comumente arquitetada em transações que interligam todas as funções de uma empresa, como processamento de pedido em vendas, controle de finanças e gestão de estoque. O ERP, originou-se com o Planejamento das Necessidade de Materiais – MRP (Material Requirement Planning),

que no presente momento vem a ser denominado MRP II (Manufacturing Resource Planning), que controla indicadores de finanças, compras, marketing e gerencia o planejamento dos materiais[9,10].

Os ERP atendem diversas necessidades da empresa, como produção, finanças e recursos humanos, facilitando a utilização de ferramentas de análise, ajuste fino do sistema e outras atividades de manutenção. Porém, estudiosos afirmam que os ERP tendem a ser difíceis de se integrar com sistemas antigos já instalados na empresa, assim falhas no processo de seleção e implementação de sistemas integrados de gestão, usualmente trazem grandes prejuízos às organizações[11,12].

A implantação do sistema OEE não substitui o sistema ERP, devido ao sistema ERP gerir toda a indústria, como sistemas SAP, Sink, Proteus, produtos como EPI, setores como estoque, almoxarifado e entre outros. Logo, o sistema OEE gerencia apenas a eficiência de máquina e realiza leituras dos processos do chão de fábrica, fornecendo informações para o ERP, que está superior na pirâmide de informações industrial. A estrutura de informações e gerenciamento da pirâmide de automação obtêm como base sensores e atuadores, acima estão os controladores de processos como os Controladores Lógicos Programáveis -CLPs, sobre eles estão os sistemas de supervisão de processo em que se encontra o OEE, lendo e armazenando dados de processos, disponibilizando informações para a camada superior de gerenciamento que é o ERP.

Para supervisionar uma indústria, atualmente, aplica-se o precursor chamado de OEE (Overall Equipment Effectiveness), que é apropriado pela metodologia TPM (Total Productive Maintenance). Assim, esse indicador OEE é capaz de identificar o quanto a empresa está utilizando os recursos disponíveis como mão-de-obra, máquinas e materiais na produção. Estudiosos sobre o assunto apontam que obter este indicador OEE online aumentará a produção no chão de fábrica de imediato[13].

Nos processos do OEE, a melhor fórmula de diminuir falhas na produção é evitar aocorrência dela, e mesmo que aconteça deve-se fazer com que seu tempo de duração seja mínimo. Portanto, ter respostas rápidas as falhas de processos são fundamentais, podendo ser ordenadas com a relação entre a velocidade real de operação do equipamento com a velocidade padrão de operação estipulada pelo fabricante. A perda de performance no processo é o período que o equipamento trabalhou abaixo do esperado, como causa potencial, cita-se a ineficácia na mão de obras, estado precário da ferramenta ou à ausência de manutenções[14].

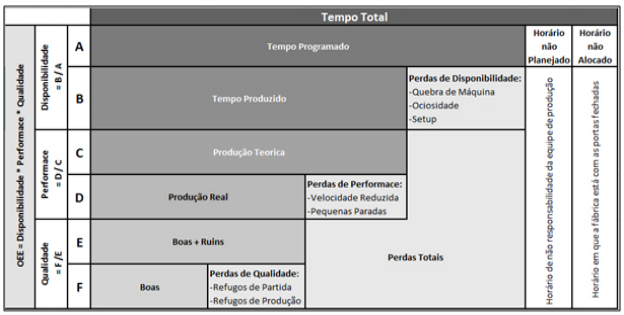



**Figura 1:** Fórmulas OEE[15].

A Figura 1 expõe um tempo de produção por responsabilidade da equipe associado à disponibilidade máquina, performance máquina, e qualidade de produção, que se entende apenas pelo tempo que é determinado por responsabilidade da equipe de produção.

Identificando as causas nas perdas de disponibilidade, perdas de performance e perdas de qualidade nos processos, ambas podem ser eliminadas e corrigidas pelos gestores, utilizando-se esta ferramenta OEE de gerenciamento que permiti garantir a qualidade e a redução do retrabalho, a empresa poderá obter vantagens com o retorno do valor investido no equipamento e redução do tempo das manutenções, evitando perdas inesperadas no final do processo[16].

Uma forma de planejamento para que uma empresa consiga chegar aos seus objetivos, com organização e direção é o controle de processos. Assim, obter o sucesso desejado na produção, depende das informações disponibilizadas aos gestores, que favorecerão as tomadas de decisões[17,18].

## CONTROLADOR DE PROCESSOS

Utiliza equipamentos de controles industriais que processam informações e executam ações pré-programadas por meio de algoritmos complexos, como o PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo), como exemplo: realiza o controle e estabilização automática da vazão, temperatura, níveis de tanques e pressão. No controle de temperatura, utiliza um medidor de temperatura que converte o sinal até a entrada analógica do CLP (Controlador Lógico Programável), logo realiza cálculos aritméticos e controla a temperatura do aquecedor do sistema por meio de saída analógica[19,27,28].

Os controladores são definidos como a forma de execução dos trabalhos automaticamente, por meio de um composto de técnicas, softwares e equipamentos que podem ser implantadas em qualquer ramo de produção na empresa. Com elevado sincronismo e precisão possibilita o desenvolver ações recorrentes que eram executadas por pessoas[20].

| Supervisório WinCC Siemens | |
|---|---|
| Versão | ▪ TIA PORTAL V14 SP1 |
| Interface | ▪ Telas Gráficas |
| Interface Remota | ▪ Web-Navigator via Internet Explorer |
| Arquivamento | ▪ Registro de Banco de Dados MSSQL, MySQL e ORACLE |
| Comunicação | ▪ OPC: DA, AE, HDA (Client & Server)<br>▪ TCP/IP: SIMATIC S7 Plus, SIMATIC S7, Ethernet/IP, Modbus, SNMP Manager & Agent, BACnet, TLS Gateway<br>▪ OBDC |
| Programação | ▪ VBS e C |

**Quadro 1:** Arquitetura do Supervisório e Software[21].

No Quadro 1, a arquitetura do supervisório engloba máquinas automatizadas que possuem no seu aglomerado de equipamentos internos os sensores, atuadores e CLP, uma lógica de programação com critérios para definição da tomada de decisão das ações a serem executada.

A estrutura física desses controladores suporta condições acima do indicado para computadores convencionais aos quais são encontradas nas indústrias, como temperatura, pressão e umidade. Controladores que gerenciam variados modelos de máquinas através de entradas e saídas digitais ou analógicas[22,23,33].

| Controlador Lógico Programável Mitsubishi | |
|---|---|
| Modelo | ▪ FX5U 32MR Mitsubishi |
| Tempo Scan | ▪ 0.2 → 2000 ms |
| Comunicação | ▪ Ethernet (100/10 Mbps máx.), RS 485 (115.2 Kbps máx.) |
| Capacidade Programa | ▪ 64 mil passos |
| Programação Linguagem | ▪ FBD, Ladder Diagram, ST |
| Entradas Digitais | ▪ 16 Entradas sink ou source com detecção de 10 KHz |
| Saídas Digitais | ▪ 16 Saídas sendo relés ou transistorizadas |

**Quadro 2:** Arquitetura do Supervisório e Software[24].

O Quadro 2 demonstra o controle de diversos processos através de entradas e saídas digitais ou analógicas, que suporta elevadas condições comumente encontradas nas indústrias.

## OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS - OEE

Seu conceito foi criado por Seiichi Nakajima para análise e avaliação da eficiência de uma operação produtiva distinta. Primícias que surgiu no conceito TPM (Total Productive Maintenance) garantindo práticas produtivas melhores. O desempenho global de uma única peça, ou de toda fábrica, será controlado pelo impacto cumulativo de três fatores da medida de eficiência do equipamento, disponibilidade, desempenho e taxa de qualidade[25].

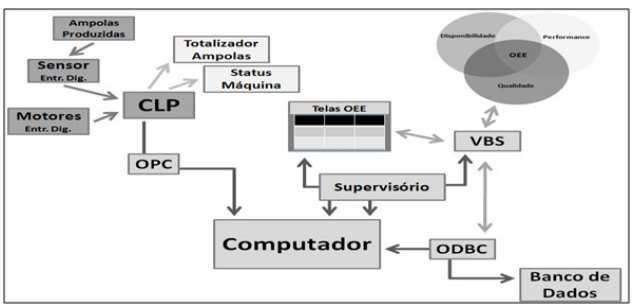



**Figura 2:** Fluxograma OEE.

Na Figura 2, o fluxograma demonstra a confiabilidade nos dados gerados pelo sistema OEE, sendo necessária uma leitura automática do controlador da máquina, limitando erros de informações vitais, sendo que todo o gerenciamento de totalizadores de produtos produzidos, sincronismo,

funcionalidades operacionais como velocidade e status ocorre no controlador lógico programável. Em computador de supervisionamento e armazenamento de dados OEE contém software SCADA instalado, o qual faz comunicação com o controlador por meio da ferramenta OPC. Estes dados são calculados por meio do VBS (Visual Basic Script) do próprio SCADA (Supervisory Controland Data Acquisition), armazenados no SQL (Structured Query Language) por meio da conexão ODBC e sendo possível obter dados históricos de eficiência de máquina em cada hora do dia produzido.

Normalmente, as paradas não planejadas mais usuais são a falta de mão de obra, falta de matéria-prima, falta de ordem de produção, manutenção corretiva; falta de Luz, e as planejadas que são produção e setup. Portanto, a disponibilidade mede a percentagem de tempo que o equipamento pode ser utilizado, geralmente horas totais de 24-7-365, dividido pelo tempo de funcionamento do equipamento chamado produção real.

Segundo a conceituada empresa Nomus, desenvolvedora de softwares completos, para indústrias obterem o sucesso de gestão:

1. Disponibilidade leva em consideração as paradas não planejadas no processo produtivo. O tempo em produção ou capacidade utilizada equivale ao tempo em que a máquina está produzindo ou realizando alguma atividade planejada. A capacidade disponível normalmente é equivalente 4/5 da carga horária praticada pela empresa, no índice de 1/5 entram as paradas planejadas.
2. Desempenho ou Performance leva em consideração à perda de velocidade no processo produtivo e pode ser calculado da seguinte forma, o tempo produto ideal é o tempo esperado para fabricação de determinado produto em circunstâncias ideais. Naturalmente para conseguir controlar o desempenho é preciso fazer um estudo para definição do tempo ideal de fabricação dos produtos em cada uma das etapas do processo produtivo.
3. Taxa de Qualidade equivale à relação entre o tempo produtivo total e o tempo investido em peças com defeito. Calculada por meio de uma fórmula que permite realizar uma análise, que pode gerar vários relatórios úteis para tomada de decisão no curto, médio e longo prazo. A fórmula do OEE pode ser usada para evitar que as empresas façam compras inadequadas e ajuda-las a se concentrar em melhorar o desempenho de máquinas e instalações e equipamentos que já possuem[26].

Os objetivos atingidos no OEE são propostos permitindo um comparativo entre as unidades de fabricação em indústrias diferentes. Contudo, a OEE não é uma medida definitiva absoluta, sendo mais utilizada identificando possibilidades de melhorar o desempenho do processo e formasde obter essas melhorias[27].

O atendimento de uma empresa no mercado, com elevado volume e variedade diminuída e outra empresa nomercado de elevada variedade e volume diminuído, ambas podem ser reduzidasse o tempo do ciclo no OEE for baixo. Assim trocas de setups irão reduzir o OEE na comparação entre elas, se o produto possui valor agregado, ocorrerá maior margem de lucro com baixo índice do OEE[28].

A definição de eficiência de máquina é determinada pela capacidade do gestor de alcançar uma otimização da produtividade e o desempenho utilizando a diminuição da quantidade de recursos possíveis, sem a necessidade de obter mais ferramentas devido a falhas e paradas[29].

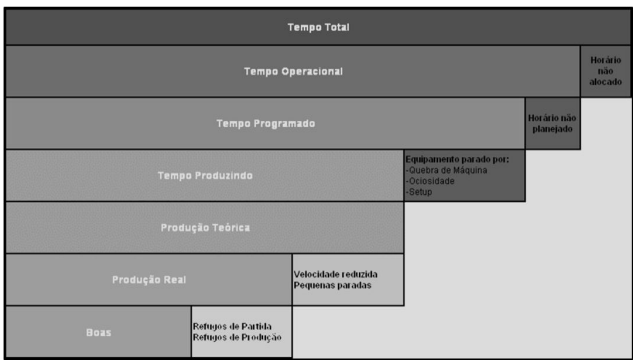



**Figura 3:** Tempo por equipamento com base no OEE[30].

Na Figura 3, ocorre um mapeamento da utilização de tempo no OEE, tempo subdividido em operacional, programado, produzido e relacionado com a produção teórica e produção real, demonstrando a importância do tempo nos cálculos OEE.

## EFICIÊNCIA DE MÁQUINA

Organizado de forma a separar os recursos para serem melhor empregados, aumentando a produção com menor custo justificado com o controle de processo, tornando essencial para uma indústria de variados ramos de produção. As empresas que aderem ao processo de análise de eficiência de máquinas são qualificadas a monitorar falhas e apontar problemas variados, elevando a possibilidade de combater as suas causas de forma recorrente, prover novas manutenções necessárias e obter baixo estoque de peças no almoxarifado. A eficiência é utilizada como ferramenta para achar as áreas de melhoria maiores, para que a empresa propicie o maior retorno sobre o ativo[31].

## DIMINUIÇÃO DE PARADA

As paradas contínuas são o principal fator de perda de produção no chão de fábrica. Quando máquinas estão com problemas ou há uma determinada indisponibilidade de ferramentas para o trabalho, o resultado temporal de produção é totalmente comprometido, afetando diretamente a lucratividade, a competitividade da empresa e a satisfação dos clientes. Normalmente, as empresas ao comprar uma máquina já consideram sua capacidade produtiva, valor que pode ser calculado em horas, dias ou processos, assim, é definida uma eficiência média para a empresa. Porém, quando não atingem o estipulado, ocorre perdas de produção, ocasionando a realização de horas extras[32].

## CONTROLE DE MÁQUINA

A utilização de aplicativos móveis favorece o controle de máquina, auxiliando os gestores a monitorar os equipamentos online, visualizando se estão sendo operados ou estocados, assim possibilitando justificar o motivo das paradas diversas. Esse gerenciamento constante permite acessar todos os equipamentos comparando, reduzindo paradas e alcançando as metas de produção pré-definidas pelo empregador[33].

## CÁLCULO DE EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA OEE

Um equipamento que possui um turno de 8 horas e durante este turno teve uma preparação que durou 40 minutos e ocorreu uma parada de reabastecimento de 10 minutos. No restante do tempo, produziu um item cujo tempo ciclo é de 8 segundos, e no final do período, contabilizou 3000 peças produzidas, sendo que 20 foram refugadas por apresentarem defeitos.

### Podem-se extrair as seguintes informações:

- Tempo Programado: 480 minutos
- Tempo de máquina parada para preparação: 40 minutos
- Tempo de máquina parada aguardando reabastecimento: 10 minutos
- Quantidade Prod. no período: 3000 peças
- Quantidade de peças refugadas: 20 peças
- Tempo ciclo padrão do item: 8 segundos

## EQUAÇÕES

Calculando a Disponibilidade:

$$\boldsymbol{Dispon.\,\%} = \left[\frac{(\boldsymbol{Tempo\ Produzido})}{(\boldsymbol{Tempo\ Programado})} * \boldsymbol{100}\right]$$

$$\boldsymbol{Dispon.\,\%} = \left[\frac{(\boldsymbol{480min - 40min - 10min})}{(\boldsymbol{480min})} * \boldsymbol{100}\right] \quad \text{(Eq. 01)}$$

$$\boldsymbol{Disponibilidade\ \%} = \boldsymbol{89,58\%}$$

Calculando a Performance:

$$\boldsymbol{Prod.Teórica} = \left[\frac{(\boldsymbol{Tempo\ Produzido})}{(\boldsymbol{Tempo\ de\ Ciclo\ Padrão})}\right]$$

$$\boldsymbol{Prod.Teórica} = \left[\frac{(\boldsymbol{430min} * \boldsymbol{60seg})}{(\boldsymbol{8seg/peça})}\right] \quad \text{(Eq. 02)}$$

$$\boldsymbol{Produção\ Teórica\ \%} = \boldsymbol{3.225\ unid}$$

$$Perfor.\% = [\frac{(Quant.Produção\ Real)}{(Quant.Produção\ Teórica)} * 100] \quad \text{(Eq. 03)}$$

$$Perfor.\% = [\frac{(3000\ peças)}{(3225\ peças)} * 100]$$

$$Performance\ \% = 93,02\%$$

Calculando a Qualidade:

$$Qual.\% = [\frac{(Quantidade\ de\ bons)}{(Quantidade\ Total)} * 100] \quad \text{(Eq. 04)}$$

$$Qual.\% = [\frac{(3000\ peças - 20\ peças)}{(3000\ peças)} * 100]$$

$$Qualidade\ \% = 99,33\%$$

Calculando o OEE:

$$OEE\ \% = [Dispon.\% * Perfor.\% * Qualid.\%] \quad \text{(Eq. 05)}$$

$$OEE\ \% = [89,58\% * 93,02\% * 99,33\%]$$

$$OEE\ \% = 82,78\%$$

# Metodologia

## ESTUDO DE CASO

Para elaboraçãoda metodologia adotou-se como base a pesquisa bibliográfica, a qual proporcionou compreensão a ferramenta OEE, suas concepções bem como, passos para execução. Logo após, foi implantado e implementado o OEE em uma indústria farmacêutica de Anápolis-GO. Para tanto, aplicou-se um supervisório que utiliza softwares associado a um controlador lógico programável, ambos a duas envasadoras de injetáveis em recipiente tipo ampolas de diferentes princípios ativos envasados.

Como utilização de informações diretamente das máquinas de produção, propôs-se o aumento de informações em tempo real, sendo implantado supervisório com sistemas que utilizam software para monitorar as variáveis de outros dispositivos, como o SCADA (Supervisory Controland Data Acquisition), o qual requisita do controlador dados como status de máquina operando, somatória de frascos envasados e velocidade de produção. Sendo monitorado a todo instante, minimizado inexatidões de dados de produção.

Esse controlador lógico programável realiza a somatória dos frascos por meio de sensor óptico digital, ajustado para detecção dos frascos envazados, vinculado à entrada digital do controlador é contabilizado em totalizadores de frascos produzidos na saída da máquina. Assim o sensor lê cada frasco produzido e soma +1 no totalizador de frascos produzidos. O mesmo ocorre semelhante a status de máquina operando, recebendo status de inversor de frequência para motores assíncronos e status drives para motores síncronos[34,35].

Associado ao controlador lógico,software de supervisão SCADA utilizado é o WinCC da Siemens, o qual está hospedado em mesmo computador que o servidor OPC e o servidor SQL Server da Microsoft. Este supervisório possui serviço de disponibilização de telas operacionais independentes em web da internet Explorer da Microsoft, com segurança de usuário e senha.

Em plataforma do SCADA, está estipulado em elaborar diversos códigos em VBS, um deles é responsável pelo monitoramento e armazenamento de paradas operacionais. O princípio de funcionamento é a monitoração do status operacional, ocorrendo parada é realizada aquisição de data hora atual do sistema operacional e armazenado em variável interna ao SCADA, vinculando com o início da parada. Retornando o processo, é novamente requisitada a hora atualizada e determinada como fim da parada, em seguida contabiliza-se o total de parada operacional a partir da diferença entre o início e o fim, armazenando em banco de dados informações completas de data e hora de início, fim e total de cada interrupção operacional.

Um segundo código faz requisição no banco de dados SQL Server por filtro de data e hora, realizando a separação de tempos de paradas operacionais em cada hora de produção, fornecendo assim a variável de parada não programada, impactando em cálculo disponibilidade do equipamento.

Em seguida, ocorre a separação de frascos produzidos em cada hora de produção, executando cálculo de OEE, apresentando em tela gráficas percentuais de disponibilidade, performance e qualidade de cada hora do turno. Atualizando a cada minuto em banco de dados, valores de cada hora de produção para possíveis relatórios de eficiência.

Após obtêm-se o armazenamento e consultas de dados por data ou qualquer outra coluna configurada realizando conexão ODBC com servidor SQL Server, sendo assim possível através do VBS supervisório. Há tabelas de paradas operacionais com variáveis de hora de início, fim, total e justificativa, sendo este último campo disponível ao operador justificar parada via supervisório[36].

**Tabela 1:** Separação de hora por hora de produção.

| Hora | P.P. (min) | P.N.P (min) | T. T | D.M (%) | V.P (un/h) | P.R(unid) | Performance(%) | Rejeitos(unid) | Qualidade (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 0 | 10.4 | 49.5 | 82.5 | 7500 | 6000 | 96.96 | 100 | 98.33 |
| 7 | 10 | 20.3 | 29.7 | 59.4 | 7500 | 4000 | 89.78 | 30 | 99.25 |

Nota Tabela 1, 2 e 3: P.P: Parada programada com tempo em minutos; P.N.P: Parada não programada com tempo em minutos; T.T: Tempo de trabalho em minutos; D.M: Disponibilidade de máquina em porcentagem; V.P: Velocidade de produção de unidades por hora; Min: Minuto; Un/h: Unidade por Hora; Unid: Unidade.

Estas informações serão disponibilizadas em hora/hora e em total de turnos em respectivas máquinas, possibilitar ao gestor do setor:

- Visualizar pontos de ineficiência de produtividade,
- Identificar e melhorar a qualidade de ampolas geradas.
- Analisar tempos de paradas de máquina e justificativas apontadas, mensurando a confiabilidade nas preventivas de manutenção realizadas em máquina.
- Criar relatórios de eficiência (produtividade x qualidade), paradas de máquina em data hora diversas através de dados armazenados em bando de dados.

# Resultados e Discussão

Ao realizar a implantação da metodologia OEE na empresa estudo (produtora de medicamentos), constatou-se que houve uma melhoria significativa da forma como os processos são geridos dentro da empresa. Resultados esses que são impulsionados por indicadores em tempo real de: produção, produtividade, qualidade e dentre outros indicadores da produção.

Anteriormente, não havia informações precisas de adversidades decorridas em produção, sendo quase impossível a rastreabilidade da causa dos problemas, notando-se seus impactos desfavoráveis somente no final de produção. Sendo elas em disponibilidade por máquina parada, performance por falta de insumo ou qualidade por altos índices de rejeitos.

Assim a partir da tela gráfica final de OEE são apresentadas aos gestores informações de paradas não programadas, percentual de disponibilidade da máquina, velocidade de máquina, ampolas produzidas, performance da produção, rejeito de ampolas por não conformidades e qualidade do produzido em cada hora desmembradas do turno, como demonstra a Tabela 2.

**Tabela 2:** Separação de hora por hora de produção.

| Hora | P.P. (min) | P.N.P (min) | D.M. (%) | V.P. (un/h) | P.R. (unid) | Performance (%) | Rejeitos (unid) | Qualidade (%) | OEE (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 0.0 | 38.4 | 36.0 | 7500 | 2576 | 95,40 | 100 | 96.11 | 33,00 |
| 7 | 0.0 | 3.3 | 94,5 | 7500 | 7021 | 99,06 | 31 | 99.56 | 93,20 |
| **Total:** | 0.0 | 41.7 | 65.3 | 15000 | 9597 | 98,05 | 131 | 98.63 | 63,15 |

Dessa forma analisando a Tabela 2, em que são apresentados os dados de produção do dia 19 de março de 2018, pode ser observada a problemática real registrada em sistema OEE, a qual apontou parada de máquina superior a 38 minutos no intervalo de produção entre seis as sete horas da manhã, sendo justificada pelo operador por falta de insumos. Após investigação simples por parte de supervisão, mostrou-se falha de logística na troca de turno por abastecimento de ampolas vazias da produção, sendo tratada na raiz a causa da falha de parada identificada pelos responsáveis.

Após investigação simples por parte da supervisão, detectou-se falha de logística ao abastecer ampolas vazias na produção em troca de turno, sendo tratado afinco a causa da falha identificada pelos gestores. Parada ocorrida por simples falta de planejamento organizacional em abastecimento de insumos gerando prejuízo de quase cinco

mil unidades de ampolas não produzidas, que ao longo do tempo gera perdas milionárias de produção. Em próxima tabela será apresentada outra falha operacional por simples falta de atenção por parte da operação e supervisão.

**Tabela 3:** Separação de hora por hora de produção.

| Hora | P.P. (min) | P.N.P (min) | D.M. (%) | V.P. (un/h) | P.R. (unid) | Performance (%) | Rejeitos (unid) | Qualidade (%) | OEE (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 7500 | 7237 | 96.49 | 65 | 99.10 | 95,62 |
| 19 | 35.0 | 5.8 | 76.8 | 5700 | 1897 | 104.00 | 304 | 83.97 | 67,06 |
| 20 | 0.0 | 4.3 | 92.8 | 5700 | 5250 | 99.22 | 43 | 99.18 | 91,32 |
| **Total:** | 35.0 | 10.1 | 93.03 | 18900 | 14384 | 92,35 | 412 | 97.14 | 83,46 |

Na Tabela 3, há dados extraídos no dia 21 de março de 2018, indicam grande quantidade de rejeitos de produtos acabados em horário de produção entre 19 e 20 horas. Em apuração por parte da supervisão, constatou-se que neste intervalo de produção, iniciou-se produto novo e os operadores não modificaram a velocidade de máquina adequadamente, velocidade que é pré-determinada pelo produto respectivo ao produto envazado por algum período de produção e assessorado pela engenharia, assim causando não conformidades em ampolas por falha em solda de junção e contaminação microbiológica no interior da ampola.

Com a implantação da ferramenta OEE, originou-se nova visão do acompanhamento de produção na empresa estudo farmacêutica, uma vez que em todo momento está sendo monitorado o processo produtivo, registrando paradas de produção, performance e qualidade de ampolas produzidas. Dados de processos coletados são subdivididos em cada hora do dia produzido, sendo assim possível a análise de eficiência pontual no processo produtivo, tais como parada de produção individual e sua respectiva justificativa por parte da operação, desempenho da produtividade pela velocidade de máquina empregada e qualidade de produção horária.

Com o sistema de supervisão implantado, propiciou o acompanhamento remoto por partes gerenciais em acesso remoto, possibilitando múltiplos acessos em telas gráficas independentes, sendo totalmente intuitiva a navegação no supervisório e compreensão de tela OEE.

# Conclusão

Por meio da utilização do conceito de garantir práticas produtivas do TPM revisados e aplicados, resultados muito relevantes foram alcançados na implantação e implementação do OEE em uma indústria farmacêutica de Anápolis-Go. A decisão de implementar esses conceitos nos demais processos da fábrica, provavelmente, não será uma restrição as dificuldades de compreendê-los, estará concentrada no empenho despendido da sua real aplicação na empresa.

# Referências Bibliográficas


1. Bornia, Antônio Cezar *et al*. Mensuração das perdas dos processos produtivos: uma abordagem metodológica de controle interno. **1995**.
2. Favaretto, Fabio. Uma contribuição ao processo de gestão da produção pelo uso da coleta automática de dados de chão de fábrica. **2001**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
3. Da Silva, José Pedro. OEE – A forma de medir a eficácia dos equipamentos. **2009**.PDF.
4. OEE Brasil. Avanço Tecnológico no mercado Brasileiro. Disponível em: <http://www.oee.com.br>. Acesso em 24 de fevereiro de **2018**.
5. Hansen, Robert C. Eficiência global dos equipamentos: uma poderosa ferramenta de produção/manutenção para o aumento dos lucros. Tradução de Altair Flamarionklippel. Porto alegre: bookman, **2006**.
6. Borlido, David José Araújo. Indústria 4.0: Aplicação a Sistemas de Manutenção. **2017**.PDF.
7. Clarice Fainblat Pádua e Micheline Souto Mendes. A busca da qualidade no desenvolvimento de software. Disponível em: <http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/detalhe_artigo/650>. Acesso em 25 de março de **2018**.
8. Mendes, Juliana Veiga; ESCRIVÃO FILHO, Edmundo. Sistemas integrados de gestão ERP em pequenas empresas: um confronto entre o referencial teórico e a prática empresarial. Revista Gestão & Produção, v. 9, n. 3, p. 277-296, **2002**.
9. O'Brien, James A **(2007)**. Administração de Sistemas de Informação: Uma Introdução 13 ed. São Paulo: Mc Graw Hill.
10. Souza, Cesar Alexandre de. Sistemas integrados de gestão empresarial: estudos de casos de implementação de sistemas ERP. **2000**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.PDF.
11. Colangelo Filho, Lúcio. Implantação de sistemas ERP: um enfoque de longo prazo. São Paulo: Atlas, **2001**.

12. Breternitz, Vivaldo José. A seleção de sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) para pequenas e médias empresas. Revista das Faculdades de Tecnologia e de Ciências Econômicas, Contábeis e de Administração de Empresas Padre Anchieta, São Paulo, v. 5, n. 10, p. 57-71, **2004**.

13. Chiaradia, Áureo José Pillmann. Utilização do indicador de eficiência global de equipamentos na gestão e melhoria contínua dos equipamentos: um estudo de caso na indústria automobilística. **2004**.PDF.

14. Zattar, Izabel Cristina; Rudek, Samuel; Turquino, Geizy Siélly. O uso do indicador OEE como ferramenta na tomada de decisões em uma indústria gráfica–um caso prático.IberoamericanJournalof Industrial Engineering, v. 2, n. 4, p. 113-132, **2011**.

15. OEE. Formulas do OEE. Disponível em: <http://oee.com.br/wp-content/uploads/2013/08/OEE_Definicao5_1038x558.png>. Acesso em 17 de janeiro de **2018**.

16. Ribeiro, G.; Paes, R.; Kliemann, F. Aplicação da Metodologia OEE para Análise da Produtividade do Processo de Descobertura de Carvão Mineral em uma Mina a Céu Aberto. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), v. 30, p. 39-52, **2010**. PDF.

17. Bento, Alexandre Rodizio *et al*. Utilização da Tecnologia OEE Como Ferramenta Para Monitorar Centros de Usinagem no Setor Automotivo. In: IX Congresso Virtual Brasileiro de Administração–CONVIBRA, São Paulo. **2012**.

18. Produção e Operação, Administração da Produção e Operações 2ª edição revista e ampliada. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=gest%C3%A3o+de+produ%C3%A7%C3%A3o+e+opera%C3%A7ao&btnG>. Acesso em 11 de março de **2018**.

19. Busso, Christianne Matias; Miyake, Dario Ikuo. Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall EquipmentEffectiveness (OEE) na gestão do desempenho global de uma fábrica. Production, v. 23, n. 2, p. 205-225, **2013**.

20. Valente, Filipe Daniel Silva. Melhoria da disponibilidade dos equipamentos para o aumento do OEE. **2012**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.PDF.

21. SIEMENS. Visualization Software. Disponível em: <https://w3.siemens.com/mcms/human-machine-interface/en/visualization-software/simatic-wincc-open-architecture/wincc-oa-basic-sw/tabcards/pages/functions.aspx>. Acesso em 04 de abril de **2018**.

22. AMAZONA. Redes Industriais e o desenvolvimento da Automação. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/43839581/Redes_Industriais_e_Automacao.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1520791214&Signature=OAhPkdhs4JjAMW6WOi6r0ovT3CA%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DUm_breve_historico_conceitual_da_Automac.pdf>. Acesso em 11 de março de **2018**.

23. Rosario, João Mauricio. Automação industrial- Controladores Programáveis Industriais. Editora Baraúna, Edição - **2009**.

24. MITSUBISHI. Controlador Mitsubishi. Disponível em: <http://cl.rsdelivers.com/product/mitsubishi/fx5u-32mr-es/fx5u-cpu-module-16i-16o-relay-100-240v/8755672>. Acesso em 04 de abril de **2018**.

25. GELATTI, Isaías Costa Beber. OEE-eficiência global dos equipamentos: utilização do método para análise da real produtividade de equipamentos. **2012**.PDF.

26. Nomus. Como calcular e aumentar a eficiência do chão de fábrica com OEE na prática. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/NomusSoftwareIndustr/papo-de-produo-4-oee-na-prtica>. Acesso em 24 de março de **2018**.

27. Chrisostimo, Wemberson Bitencourt; Dias, Caue Placa; da Silva, Gisleno Brandão. Implementação do Indicador de Desempenho OEE (Overall Equipment Effectiveness) Em Equipamentos de Beneficiamento de Aços. In: Simpósio. **2018**.

28. Ferreira, Simone Gonçalves. Implantação de um processo de melhoria de produtividade por meio da metodologia OEE. **2017**.PDF.

29. Moellmann, Artur Henrique *et al*. Aplicação da teoria das restrições e do indicador de eficiência global do equipamento para melhoria de produtividade em uma linha de fabricação. Revista gestão industrial, v. 2, n. 1, **2006**.PDF.

30. OEE. Tempo por equipamento por base no OEE. Disponível em: <http://oee.com.br/wp-content/uploads/2013/04/UsoTempo.png>. Acesso em 17 de janeiro de **2018**.

31. Araujo, Luís César G. de. Organização, sistemas e métodos e as tecnologias de gestão organizacional: arquitetura organizacional, benchmarking, empowerment, gestão pela qualidade total, reengenharia. 5. ed. rev. e atual. São Paulo: Atlas. **2011**. 328 p.

32. Ribas, Daniel Fagundes; Brambilla, Flávio Régio; FernandeS Jr, Francisco Carlos. Sistema de Programação Avançada da Produção com Capacidade Finita: O Caso da TRAFO Transformadores de Força do RS. INGEPRO-Inovação, Gestão e Produção, v. 2, n. 5, p. 080-095, **2010**.

33. Automação e Controle. Sistemas de Automação e Controle de máquina Industrial. Disponível em: <http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/166/arquivos/Automacao%20e%20Controle%202011_1/Aula%2005%20-%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20ao%20CLP.pdf>. Acesso em 03 de março de **2018**.

34. VBS significados. Linguagem Visual Basic Script. Disponível em: <https://www.significados.com.br/script>. Acesso em 04 de março de **2018**.

35. DCA. Definição de Sensores e seus locais de atuação. Disponível em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/gudwin/publications/CBComp2002_2.pdf>. Acesso em 12 de março de **2018**.

36. Lapsi. Atuadores elétricos ou pneumáticos que permitem motorização. Disponível em: <http://www.lapsi.eletro.ufrgs.br/~luizfg/index_arquivos/cba_41084.pdf>. Acesso em 12 de março de **2018**.

## Adriano R. Silva*, Jaques J. L. Silva, Roberto C. B. Farias, Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Sonimar R. M. Dias

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: adrianosilvarodrigues@hotmail.com

# Estruturação do Planejamento e Controle da Manutenção de uma Indústria Farmacêutica

Gustavo G. F. Camps, Humbertt C. Souza, Pedro A. A. Lima, Romário R. Amorim & Sérgio M. Brandão

O setor farmacêutico possui grande impacto na economia nacional. Este trabalho foi realizado com o objetivo de demonstrar e avaliar o processo de estruturação do setor de PCM em uma indústria farmacêutica. Foi avaliado o processo de estruturação durante um período definido com o acompanhamento da evolução dos indicadores. Foi demonstrado a melhora nos indicadores de alguns equipamentos da indústria analisada, em que a média da eficiência global (OEE) aumentou de 42% para 76%, podendo assim concluir que o processo de estruturação do PCM realizado de forma estruturada produz resultados significativos.

**Palavras-chave***: PCM; eficiência global de equipamentos; indicadores de performance; matriz de criticidade.*

The pharmaceutical sector has a major impact on the national economy. This work was carried out with the objective of demonstrating and evaluating the structuring process of the PCM sector in a pharmaceutical industry. The structuring process was evaluated during a defined period with the monitoring of the evolution of the indicators. The improvement in the indicators of some equipment of the analyzed industry was demonstrated, where the average of the global efficiency (OEE) of the same ones increased from 42% to 76%, being able to conclude that the process of structuring the PCM carried out in a structured way produces significant results.

**Keywords:** *PCM; global equipment efficiency; performance indicators; criticality matrix.*

# Introdução

O mercado farmacêutico move grande parte da economia nacional, "é um dos mais competitivos, complexos, rentáveis e inovadores da atualidade"[1]. As indústrias deste segmento são sempre motivadas a buscar uma melhor visão estratégica, onde há uma constante necessidade de satisfazer o cliente, ofertando cada vez mais produtos com maior qualidade, desempenho, flexibilidade e com menores custos de produção. Logo, ao investir em infraestrutura, novos maquinários e consequentemente em novos processos, assegurar que a expectativa de produção será correspondida pelos equipamentos se tornou uma prática executada nas médias e grandes organizações, para isso, as indústrias farmacêuticas realizam investimentos milionários na expansão dos setores internos. Com o setor de manutenção, em sua maioria, não é diferente, o setor recebe grandes investimentos para assegurar a disponibilidade dos equipamentos para produção, tornando a perspectiva de faturamento cada vez maior.

Os resultados dos indicadores do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), servem como base para tomadas de decisão. O alto índice de manutenções corretivas, a ocorrência de falhas frequentes e o custo excessivo da manutenção, são evidências de resultados negativos, indicando que o processo não está consistente. Assim como uma máquina, que no decorrer do tempo necessita de revisões para continuar atingindo o desempenho esperado, com os processos também acontece o mesmo, eles deixam de desempenhar da maneira esperada e também necessitam de revisões e atualizações. Sendo assim, uma nova estruturação do setor de PCM é uma ação considerável para solução das falhas.

Além de todo aspecto positivo e ascensão dos indicadores que a gestão da manutenção de sucesso pode alavancar, ela também garante que, no mínimo, se cumpram as exigências da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), a qual é responsável por fiscalizar e regulamentar as indústrias farmacêuticas nacionais, onde se definem as diretrizes gerais das boas práticas de fabricação, ou seja, a certificação para produção. Assim, de acordo com o art. 65, 102 e 103 da resolução da diretoria colegiada RDC nº. 301, emitida pela ANVISA e Ministério da Saúde em 21 de agosto de 2019, as indústrias de medicamentos devem utilizar as instalações e equipamentos de forma adequada à produção, não devem apresentar quaisquer riscos para a qualidade do produto[2].

O objetivo deste trabalho é demonstrar o processo de estruturação do setor de PCM em uma indústria farmacêutica, acompanhando sua organização e avaliando os resultados alcançados durante o período de 12 meses.

# Metodologia

O método de pesquisa deste trabalho consiste na leitura de materiais didáticos por meio de artigos científicos, livros e sites com fontes confiáveis, e também na coleta, registro e análise dos dados de campo, realizadas durante as etapas da estruturação do setor de PCM em uma indústria farmacêutica, instalada no Distrito Agroindustrial de Anápolis – GO (DAIA), durante o período de agosto/2019 a julho/2020.

As etapas para estruturação do setor de PCM serão seguidas conforme o fluxograma demonstrado na Figura 1 a seguir:

**Figura 1:** Fluxograma das Etapas para Estruturação do PCM. **Fonte:** Dos autores

Para dar início ao processo de estruturação, primeiramente, foi necessário reformular toda política de manutenção, visando estabelecer os critérios e diretrizes para uma Gestão de Manutenção e as orientações a todos os colaboradores, especialmente aos diretores, gerentes e liderança sobre o resultado com a aplicação dessa Política. A principal finalidade é assegurar que a metodologia utilizada para a manutenção, em todos os processos estejam em conformidade com as legislações pertinentes, requisitos técnicos e procedimentos internos da empresa.

O cadastro dos ativos vem logo em seguida, ou seja, fazer o inventariado de todos os ativos presentes na empresa para saber identificá-los e qual a sua importância no processo. Este cadastro também nos permite definir a criticidade dos equipamentos, podendo ser: A, B e C, respectivamente identificados nas cores vermelho, alaranjado e verde. Sendo os equipamentos de criticidade "A" mais críticos para o processo.

A classificação da criticidade altera a frequência das manutenções e se tem uma certeza de qual ativo priorizar em uma programação, uma vez que a priorização por um equipamento menos crítico frente a outro equipamento crítico é um grande erro em termos de estratégia de manutenção. Instrumentos devem ser identificados com etiqueta cor amarela. A Tabela 1 exemplifica essa situação na prática:

**Tabela 1:** Exemplo de alteração de frequência das manutenções conforme classificação de criticidade. **Fonte:** Dos autores

| Equipamento | Criticidade | Descrição da Atividade Preventiva | Periodicidade |
|---|---|---|---|
| Encartuchadora Automática | A | Realizar substituição das correias de transmissão principal | 52 semanas ou 365 dias |
| Encartuchadora Manual | C | Realizar substituição das correias de transmissão principal | 104 semanas ou 730 dias |

Nota-se que a descrição das atividades de manutenção a serem realizadas são as mesmas, os equipamentos desempenham funções equivalentes, porém uma Encartuchadora é automática e a outra manual, o que altera a sua criticidade no processo e periodicidade das manutenções que serão realizadas. A criticidade deve ser definida seguindo os critérios conforme a Tabela 2.

**Tabela 2:** Critérios para definição de criticidade. **Fonte:** Dos autores

| Pontos | Qualidade | Segurança | Meio Ambiente | Produção |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Equipamento não possui contato direto com produto. | Sem risco significativo para operador e produto. Acidente patrimonial inferior a R$ 5.000,00 | Sem emissão de aspecto ambientais para a atmosfera | Não impacta no processo produtivo da empresa. Equipamentos possui reservas e/ou equipamentos similares que desenvolvem a mesma função. |
| 3 | Equipamento possui contato com produto, porém não altera suas características, não possui impacto na segurança e eficácia do produto. Equipamento analítico, porém, resultado não impacta na liberação do produto. | Risco de acidente leve, sem afastamento do trabalho ou com afastamento < 15 dias. Acidente patrimonial com valor entre R$ 5.000,01 até R$ 10.000,00 | Com emissão de aspecto ambiental na parte interna da empresa e o impacto ambiental é reversível. | Equipamentos auxiliares, com impacto moderado no resultado do setor. Na falta desse equipamento é possível criar alternativa produtiva. |
| 5 | Equipamento possui contato direto com produto, operação/manipulação pode ter impacto na segurança e eficácia do produto. Equipamento analítico o resultado impacta na liberação do produto. | Risco grave de acidente com afastamento do trabalho > 15 dias Acidente patrimonial superior a R$ 10.000,01 | Com emissão de aspecto ambiental para atmosfera e o impacto ambiental é irreversível. | Equipamentos principais, com impacto grave no resultado produtivo da empresa, podendo comprometer atingimento de metas. A falta desse equipamento não oferece alternativa de produção. |

O cálculo é feito pela multiplicação dos critérios de Qualidade, Segurança, Meio Ambiente e Produção. Na Tabela 3 estão detalhados os critérios de pontuação da criticidade, quanto maior o número, mais crítico o equipamento.

**Tabela 3:** Critério de pontuação. **Fonte:** Dos autores

| Pontos | Criticidade | Cor do TAG |
|---|---|---|
| > 81 | A | Vermelho |
| > 27 e ≤ 81 | B | Laranja |
| ≤ 27 | C | Verde |

Após definição da matriz de criticidade, todos os equipamentos, utensílios, sistemas, utilidades e instrumentos calibráveis tiveram suas identificações criadas considerando os critérios da Figura 2:

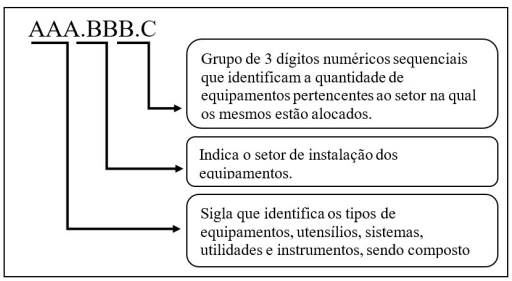



**Figura 2:** Critérios para o Tagueamento. **Fonte:** Dos autores

Como exemplo, definindo a matriz de criticidade das máquinas do setor de embalagem final Emblistadoras e Encartuchadoras, obtém-se o seguinte resultado: Qualidade 3 pontos, Segurança, Meio Ambiente e Produção 1 ponto cada. Multiplicando os fatores de criticidade o resultado é 3, o que significa que serão de criticidade C e terão a cor da etiqueta de identificação verde. A Tabela 4 apresenta o resultado final da identificação de dois equipamentos:

**Tabela 4:** Resultado da identificação dos equipamentos. **Fonte:** Dos autores

| Descrição | Equipamento | |
|---|---|---|
| Equipamento: | Emblistadora | Encartuchadora |
| Abreviação: | EBL | NTC |
| Setor de Instalação: | Embalagem Secundária | Embalagem Secundária |
| Abreviação: | EBS | EBS |
| Sequência Numérica: | 001 | 001 |
| Criticidade: | C | C |
| Tag de Identificação: | EBL.EBS.001 | NTC.EBS.001 |
| Cor da Etiqueta: | Verde | Verde |

Feito o cadastro dos ativos, definida a matriz de criticidade e tagueamento, todas as etiquetas adesivas foram impressas seguindo os critérios e cores e foram fixadas em seus respectivos ativos, em local visível e de fácil acesso.

O próximo passo foi a elaboração dos novos planos de manutenção, antes feitos genericamente, em que apenas um plano atendia de forma geral e ineficiente, na qual a manutenção corretiva era a mais atuante. Todo equipamento envolvido direto e indiretamente no processo de transformação da matéria-prima em medicamento, terá um plano de manutenção preventiva, além da inserção das inspeções técnicas, respeitando o critério de criticidade no processo para cálculo de periodicidade. Foi implementada e inclusa nos planos a manutenção preditiva, mais conhecida como análise de vibração e análise termográfica, para que haja um acompanhamento dos componentes mecânicos e elétricos predizendo a vida útil e as condições de determinar previamente alguma falha.

Os planos de manutenção foram baseados nas instruções por meio dos manuais dos fabricantes, históricos de manutenções corretivas e conhecimentos da equipe técnica, estando descrito cada item a ser inspecionado/substituído e a periodicidade. Feita toda a hierarquização dos ativos e os planos de manutenção definidos, isso passará para o sistema de gestão integrado ERP Protheus, onde serão cadastradas. As ordens de carácter preventivo serão planejadas com todos os materiais e recursos necessários para a execução.

Dá-se início então a programação da manutenção com a criação do cronograma de 52 semanas, definindo o que poderá ser feito ao longo do ano. As datas não serão concretas e, poderão ser modificadas, visto que seja impossível acertar as datas de todas as atividades neste período. Com três meses de antecedência destas datas, é feita uma programação macro (trimestral), quando começa a definir de fato quando será feito, além de verificar o estoque de insumos e a mão de obra disponível. Depois, com um mês de antecedência, é feita a programação micro (mensal), a partir daí, já se tem as ordens de manutenção (OMs), que vão ser priorizadas dentre a situação do mês, em que será feita uma priorização semanal. Estas datas são definidas de modo alinhado e estratégico juntamente com os departamentos de PCP (Planejamento e Controle da Produção), a Produção e com demais supervisores do departamento de manutenção industrial, utilidades e predial.

As ordens impressas são entregues juntamente aos materiais e recursos necessários aos respectivos supervisores para distribuição aos técnicos executantes. Após execução das ordens, estas, voltarão para o PCM para fechamento e reprogramação daquelas que não houve possibilidade de execução. As ordens fechadas fornecerão os dados para o controle da manutenção, esses são os indicadores que alimentarão a última etapa do processo, a melhoria contínua do setor.

Os indicadores de MTBF, MTTR e OEE serão impressos semanalmente e fixados nos murais para discussão dos resultados e impactos da manutenção, essa discussão é feita através de reuniões semanais com membros envolvidos e responsáveis. Após todas as etapas estruturadas e implantadas, essas serão mantidas e aperfeiçoadas ao longo do tempo. Os planos de manutenção serão revisados após um ano, onde serão acrescentadas as oportunidades de melhoria enxergadas ao longo do período, tornando

assim os processos cada vez melhores e adequados para garantir sempre a disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Os dados coletados ao longo da estruturação do PCM são utilizados para demonstrar a evolução do setor e como essa estruturação pode contribuir para a melhoria dos resultados da empresa.

# Referencial Teórico

## PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO (PCM)

O PCM engloba todo o conjunto de ações necessárias para manter o equipamento em funcionamento pelo maior tempo possível, isso inclui organizar, executar e controlar os serviços de manutenção, de forma a manter um parâmetro ideal de funcionamento e adotar medidas de correção caso necessário, podendo ser utilizadas diversas ferramentas disponíveis[3].

O planejamento e controle da manutenção é reconhecido como ferramenta essencial, é o núcleo estratégico do setor de manutenção. Os seus objetivos se resumem a promover, participar e garantir a confiabilidade e disponibilidade dos ativos, otimizando todos os recursos da manutenção[4].

## TIPOS DE MANUTENÇÃO

### Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva tem como objetivo reparar um equipamento que tenha sofrido uma falha ou pane, de modo que ele possa executar novamente as funções que foram definidas no seu projeto. Há dois tipos de manutenção corretiva: a programada e a emergencial[5].

A manutenção corretiva programada ou planejada ocorre quando o equipamento está com desempenho comprometido, em que há uma falha ainda em estágio inicial, mas não impede totalmente o funcionamento da máquina. Necessita de uma decisão alinhada entre os setores gerenciais, baseados nos parâmetros de condição, para que essa manutenção seja realizada no momento mais adequado[6].

A manutenção corretiva emergencial ou não programada é realizada após o equipamento entrar em uma falha que afeta completamente seu funcionamento ou diminua seu desempenho, de modo que ele não exerça a sua função no processo. "Devido às perdas de produção e qualidade, essa é a manutenção mais cara, perigosa e demorada para a empresa"[7].

### Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é realizada com intervalos predeterminados entre uma manutenção e outra, podem ser baseados em tempo (dias), horas de funcionamento, produtividade ou o que vier a acontecer primeiro. É uma manutenção realizada a fim de reduzir a probabilidade de falhas ou a queda no desempenho de um equipamento, proporcionando uma maior confiabilidade[5].

Ao contrário da manutenção corretiva, a preventiva visa evitar a ocorrência de falhas, prevenindo que haja problemas mais sérios. Em determinados setores como o de caldeiras, é de suma importância que não venham a ocorrer falhas por conta do seu elevado fator de segurança, sendo obrigatório manter um bom planejamento e controle da manutenção.

### Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva tem como objetivo acompanhar a máquina ou peça continuamente, seja por monitoramento (termográfico, vibração, análise de óleo e ultrassom) ou por controle estatístico, em que os dados obtidos são utilizados para fazer com que os componentes exerçam o seu funcionamento até o máximo da sua vida útil, aumentando o tempo de trabalho sem que haja maiores riscos de falhas[8].

Esse tipo de manutenção requer um bom investimento inicial devido ao alto custo dos equipamentos de sensoriamento, mas que traz retornos positivos em produtividade e confiabilidade dos equipamentos, além de reduzir significativamente o número de manutenções corretivas e preventivas.

## INDICADORES

### Mean Time Between Failures - MTBF

O tempo médio entre falhas (Mean Time Between Failures) é um indicador para controle de desempenho

da manutenção, observando o valor, obtido ao longo de anotações durante o funcionamento do equipamento, é possível determinar se o número de manutenções foi elevado, o que seria algo negativo, ou se o número de intervenções na máquina vem diminuindo, consequentemente, aumentando o número total de horas disponíveis para operação[8]. O MTBF pode ser encontrado por meio da Equação 1:

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Somatório das horas disponíveis do equipamento}}{\text{Número de intervenções corretivas}} \quad \text{(Eq. 01)}$$

Trata-se da divisão do total de horas disponíveis do equipamento para a operação, pelo número de intervenções corretivas no período. "É um dos indicadores mais importantes para o setor de manutenção, pois por meio dele, pode-se enxergar globalmente como a manutenção está sendo administrada de um modo geral[7]".

**Mean Time To Repair - MTTR**

O tempo médio de reparo (Mean Time To Repair) é bastante conhecido no setor de manutenção, é calculado a partir do valor do somatório total dos tempos de manutenções corretivas, dividido pelo número total de manutenções corretivas durante um determinado período de tempo, conforme a Equação 2:

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Somatório dos tempos de manuntenções corretivas}}{\text{Número total de intervenções corretivas}} \quad \text{(Eq. 02)}$$

Esse indicador diz muito sobre o impacto que as paradas para manutenções corretivas provocam na disponibilidade do equipamento, tendo como base que quanto menor o valor do MTTR melhor [8].

**Overall Equipment Effectiveness - OEE**

A efetividade global do equipamento (Overall Equipment Effectiveness) é um indicador capaz de medir e representar a verdadeira realidade da eficiência operacional no chão de fábrica. Na prática, o cálculo estruturado do OEE utiliza a medição do tempo em que a máquina está produzindo ou parada e seus motivos de parada. O seu uso ajuda os gestores a monitorar, avaliar e melhorar o uso da capacidade instalada, pois indica não apenas o quanto foi efetivo na utilização do tempo disponível, mas as principais fontes consumidoras de tempo sem valor agregado[7]. O OEE é calculado de forma estruturada e abrange três sub índices relacionados ao desempenho dos processos industriais, sendo eles:

Disponibilidade: é a quantidade de tempo em operação (quando se está produzindo produtos) comparado com o tempo disponível para operação. A diferença ocorre em função de tempos de paradas, conforme a seguinte Equação 3:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo em produção}}{\text{Tempo em produção} + \text{Paradas não planejadas}} \quad \text{(Eq. 03)}$$

Desempenho: é o tempo operacional líquido, ou seja, é a relação entre a velocidade de produção real e a velocidade que o equipamento foi projetado para produzir. As variações do índice ocorrem em função de realizar a operação abaixo da velocidade ideal, devido a pequenas paradas não registradas ou velocidades reduzidas na operação. O desempenho é calculado de acordo com a Equação 4:

$$\text{Desempenho} = \frac{\text{Tempo produtivo real}}{\text{Tempo produto ideal}} \quad \text{(Eq. 04)}$$

Qualidade: é a quantidade de produtos produzidos, subtraído dos produtos avariados e retrabalhados, dividido pela quantidade total produzida. Esse índice representa a quantidade de produtos aproveitados e é calculado por meio da Equação 5.

Portanto, o indicador OEE é o resultado da multiplicação da percentagem dos três índices citados acima. Dessa forma, é quase impossível atingir 100% desse indicador, pois como visto, existem muitas variáveis e nem sempre os processos ocorrem da maneira ideal.

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Qtde produzida} - \text{Qtde refugada} - \text{Qtde retrabalhada}}{\text{Quantidade produzida}} \quad \text{(Eq. 05)}$$

# Planejamento, Organização e Estrutura do PCM

## ESTRUTURA DO PCM

A estrutura hierárquica do setor de manutenção dentro de uma indústria está ligada diretamente com a sua realidade, normalmente é definida com base na demanda e com os padrões internos de cada empresa. A Figura 3 ilustra um padrão comumente praticado dentre as empresas[4]:

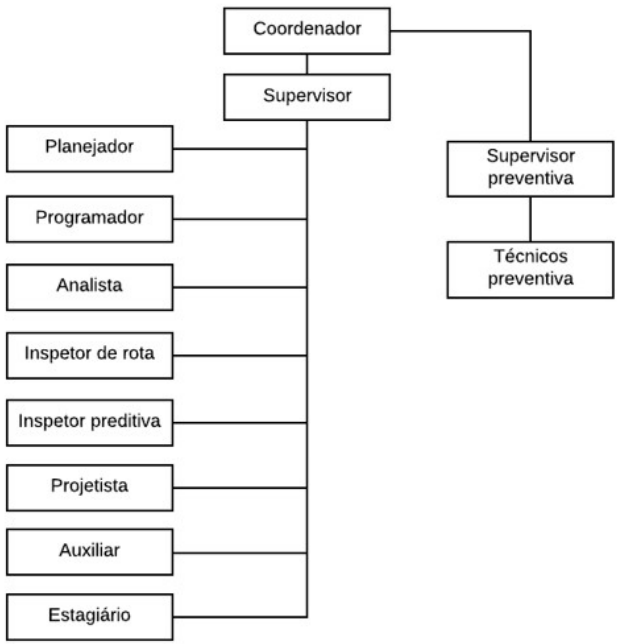



**Figura 3:** Estrutura hierárquica do PCM comumente praticado nas empresas. **Fonte:** Adaptado de TELES[7].

O fato é que, uma indústria de grande porte, com número elevado de colaboradores e ativos, necessita de um padrão mais estruturado do que de empresas de médio ou pequeno porte.

## RESPONSABILIDADES DO PCM

A Tabela 5 expõe as principais atribuições e responsabilidades do PCM[4]:

**Tabela 5:** Responsabilidades definidas para o PCM. **Fonte:** Adaptado de TELES[7].

| | RESPONSABILIDADES |
|---|---|
| **PCM** | - Definir metas e controlar indicadores de desempenho das atividades de manutenção;<br>- Criar Padrões e Procedimentos de Trabalho para a manutenção;<br>- Detalhar planos de ação para atingimento das metas;<br>- Elaborar e Gerenciar os planos de Inspeção, Manutenção Preventiva, Preditiva e Lubrificação;<br>- Incorporar novas tecnologias de Inspeção e Manutenção Preditiva;<br>- Representar a Manutenção na interface com a Engenharia de Novos Projetos;<br>- Gerenciar o programa sistemático de capacitação do pessoal da Manutenção;<br>- Controlar a documentação Técnica da Manutenção;<br>- Coordenar o programa de Análise de Falhas;<br>- Controlar os Padrões e Procedimentos de Trabalho da Manutenção;<br>- Responsabilizar-se pelos projetos de manutenibilidade da manutenção;<br>- Controlar a contratação de serviços de Terceiros;<br>- Controlar e gerenciar os custos da manutenção. |

Para facilitar a execução das atividades sob responsabilidade do PCM é ideal que as empresas possuam um Sistema de Gestão Integrado (ERP- Enterprise Resource

Planning). Essas responsabilidades e atribuições são divididas entre os cargos definidos na estrutura hierárquica do PCM na Figura 1.

**Matriz de Criticidade**

A matriz de criticidade é definida de acordo com a realidade de cada empresa, essa atividade, por ser complexa, demanda tempo e envolve diversas variáveis do setor. Existem vários métodos já estruturados para dar suporte a atividade, porém, como já dito, os métodos podem variar de acordo com a necessidade e realidade da empresa. Um método comumente utilizado é denominado ABC, esse método faz o uso de um sistema de classificação de máquinas em termos de gravidade da ocorrência, os critérios segurança, qualidade do produto, impacto na produção, custo de manutenção, confiabilidade da máquina (MTBF) e tempo de reparo (MTTR), são levados em conta[9].

**Tagueamento**

O tagueamento é utilizado para realizar identificação única dos ativos, permitindo assim que os equipamentos sejam facilmente localizados, e com essa identificação é possível criar um histórico completo das atividades de manutenção realizadas e facilitar a comunicação interna. Para a definição de um sistema de tagueamento não é obrigatório seguir a norma NBR-8190, que foi descontinuada em 2019, mas há uma necessidade de definir algum padrão para se trabalhar, seja interno ou externo. Após criação das identificações dos equipamentos, devem ser fabricadas as etiquetas, que precisam ser de material resistente aos possíveis agentes degradantes do ambiente, deve se definir uma cor adequada para cada equipamento baseado na definição da matriz de criticidade, sendo vermelho o mais crítico, laranja para intermediário e verde para menos crítico[4].

"O tagueamento é a base da organização da manutenção pois ele será o mapeamento da unidade fabril, orientando a localização de processos e também de equipamentos para receber manutenção[8]".

# Resultados e Discussão

A estrutura hierárquica do PCM utilizada na indústria estudada foi definida com base em sua realidade, é uma estrutura básica, porém funcional, pois as responsabilidades e atividades foram bem distribuídas. A Figura 4 ilustra a estrutura utilizada:

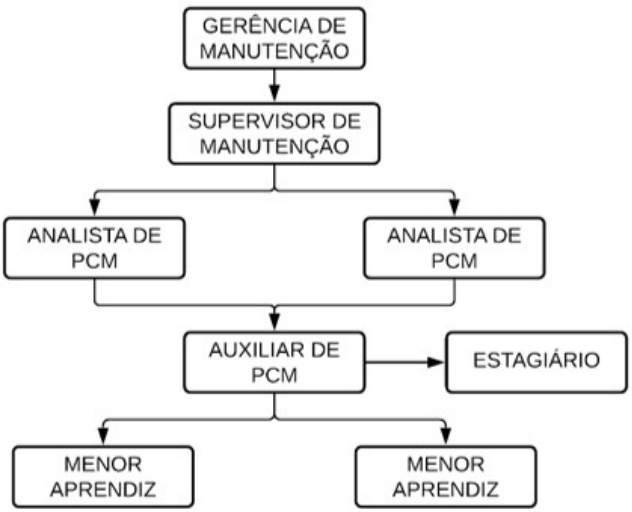



**Figura 4:** Estrutura hierárquica do PCM na indústria estudada. **Fonte:** Dos autores

Para avaliação dos resultados encontrados após a estruturação do PCM em uma indústria farmacêutica, optou-se por analisar os dados de MTBF, MTTR e OEE, que são os principais indicadores de performance utilizados atualmente nas indústrias farmacêuticas para realizarem as avaliações de efetividade da manutenção e produção. Foram analisados os dados de três Encartuchadoras Figura 5, que possuem a função acomodar os blisters de medicamentos dentro dos cartuchos (embalagens finais), são equipamentos de criticidade A, representam em torno de 20% do total dos ativos, em que as técnicas empregadas, o monitoramento e periodicidade dos planos de manutenção nestes equipamentos prioritários (A) são diferentes dos de criticidade B e C, pois causam maiores impactos na entrega dos produtos e nos resultados da empresa.

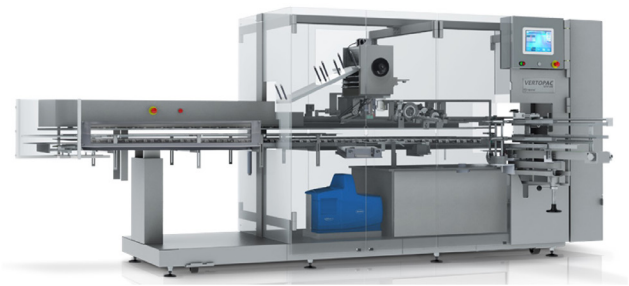
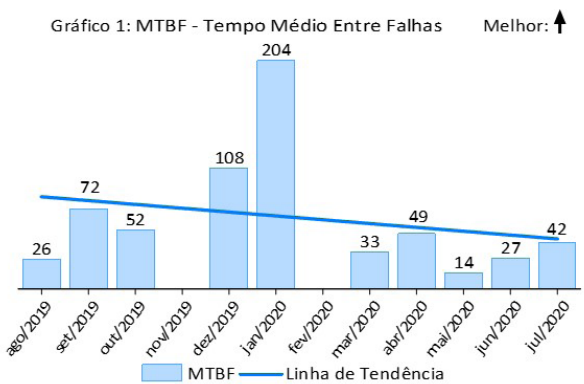
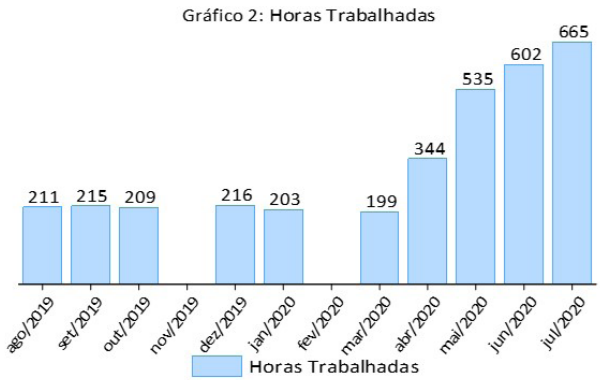
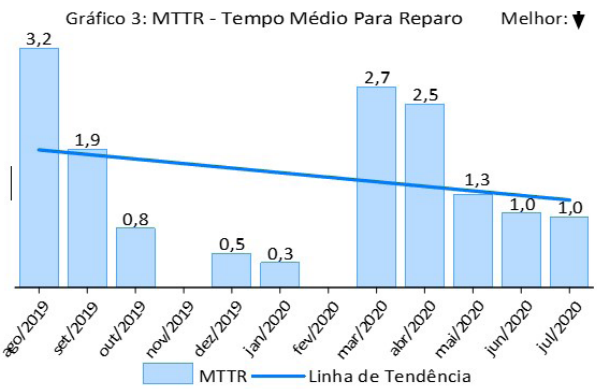


**Figura 5:** Encartuchadora vertical VP-120. **Fonte:** Fabrima

Ambas as Encartuchadoras que tiveram os dados analisados são do modelo VP8-120, fabricadas pela empresa brasileira Fabrima, referência nacional na fabricação de equipamentos de embalagem para diversos seguimentos industriais, sendo a única diferença entre elas o ano de fabricação, as Encartuchadora 01, 02 e 03 foram fabricadas em 2003, 2014 e 2015, respectivamente. Os dados foram coletados durante o período de agosto/2019 a julho/2020, e visam demonstrar o desenvolvimento do setor durante esse período. Segue a Figura 6, destacando os resultados da Encartuchadora 01.



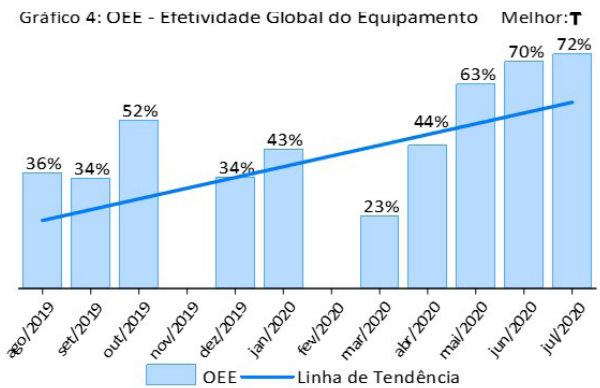



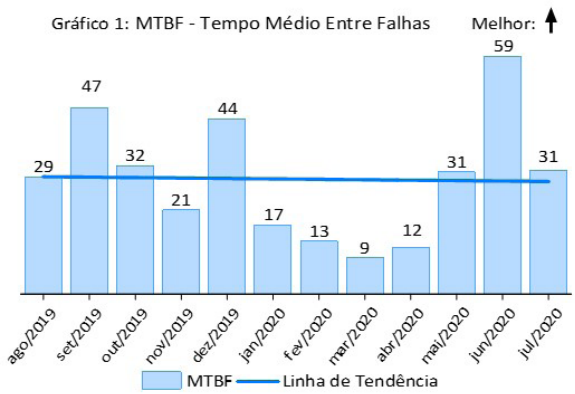

**Figura 6:** Resultado dos indicadores da Encartuchadora 1. **Fonte:** Dos autores

O Gráfico 1 da Figura 6 demonstra o resultado do MTBF, o qual indica a quantidade de horas entre falhas do equipamento ao longo do período de agosto/2019 a julho/2020. O resultado ideal seria que esse gráfico possuísse uma linha de tendência crescente, o que significa que a manutenção está sendo efetiva e que os equipamentos vêm apresentando um menor número de falhas, porém no caso dessa Encartuchadora acontece o inverso, a linha de tendência está decrescente, o que pode significar um mal resultado do setor de manutenção. Esse resultado decrescente é oriundo do aumento de horas trabalhadas deste equipamento durante o período analisado, como pode-se observar no Gráfico 2 da Figura 6, o número de horas trabalhadas aumentou de 199 horas em março/2020 para 665 horas em julho/2020, representando aumento de 332%.

O Gráfico 3 apresentado na Figura 6 é o MTTR, indicador que representa a média de tempo gasto para reparar a falha de um componente num determinado período de tempo. Esse indicador é de extrema importância para a indústria pois quando o mesmo possui uma linha de tendência negativa, indica que o equipamento está apresentando um menor número de falhas e que elas são geralmente leves, e rapidamente são corrigidas. Na Encartuchadora 01, pode-se observar que foi exatamente o que ocorreu durante o período de agosto/2019 a julho/2020, pois a linha de tendência está decrescendo, indicando assim redução do MTTR nesse período mesmo com o aumento significativo das horas trabalhadas, o que indica progresso da manutenção e do PCM.

O próximo dado apresentado é o OEE, indicador de efetividade global do equipamento, Gráfico 4 da Figura 6, que é o principal indicador utilizado para medir a eficiência em uma indústria farmacêutica. A meta das indústrias é sempre aumentar o seu OEE, fazendo com que ele esteja o mais próximo possível dos 100%, o que significa em poucas palavras que o equipamento teve uma produção real, igual a sua capacidade de produção teórica. Cada indústria possui uma maneira especifica de analisar o seu OEE, podendo ser uma análise global ou individual. Na indústria farmacêutica estudada, o OEE era analisado de forma global, tendo uma meta estabelecida de 44% para toda a indústria, porém, depois de uma mudança na diretoria optou-se por analisar o OEE, individualmente, estabelecendo-se uma meta inicial de 61% para a embalagem secundária. Quando o OEE possui uma linha de tendência crescente, que é o que ocorre na Encartuchadora 01, ele está indicando que houve melhora global dos resultados da empresa, porém essa linha de tendência tende-se a estabilizar em um determinado valor toda vez que ela se aproxima de 100%, valor que é praticamente impossível de se alcançar, pois quanto mais próximo desse valor, mais difícil de se conseguir melhoras nos processos, nas manutenções e reduzir as perdas.

Na Figura 7, são demonstrados os resultados de MTBF, MTTR e OEE da Encartuchadora 02, a qual possui gráficos com linhas de tendência semelhantes a Encartuchadora 01, mesmo a média do número de horas trabalhadas mensalmente sendo significativamente maior. Cabe lembrar que à Encartuchadora 02 é um equipamento semelhante a Encartuchadora 01, porém de fabricação mais recente e por isso consegue atingir resultados semelhantes, mesmo com número de horas trabalhadas superiores.



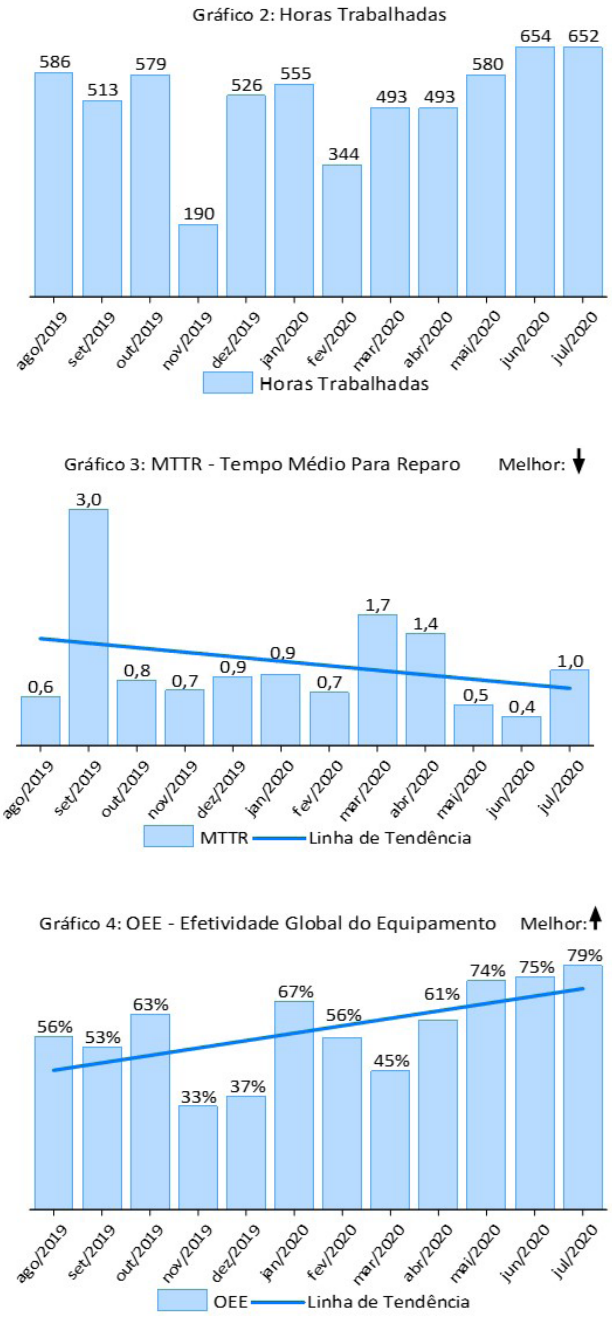



**Figura 7:** Resultado dos indicadores da Encartuchadora 2. **Fonte:** Dos autores

Já a Encartuchadora 03, em que os resultados são apresentados na Figura 8, demonstra a linha de tendência do MTBF (Gráfico 1 da Figura 8) crescente, resultado contrário ao das Encartuchadoras 01 e 02, demonstrando assim um aspecto muito positivo, conforme a Figura 8:

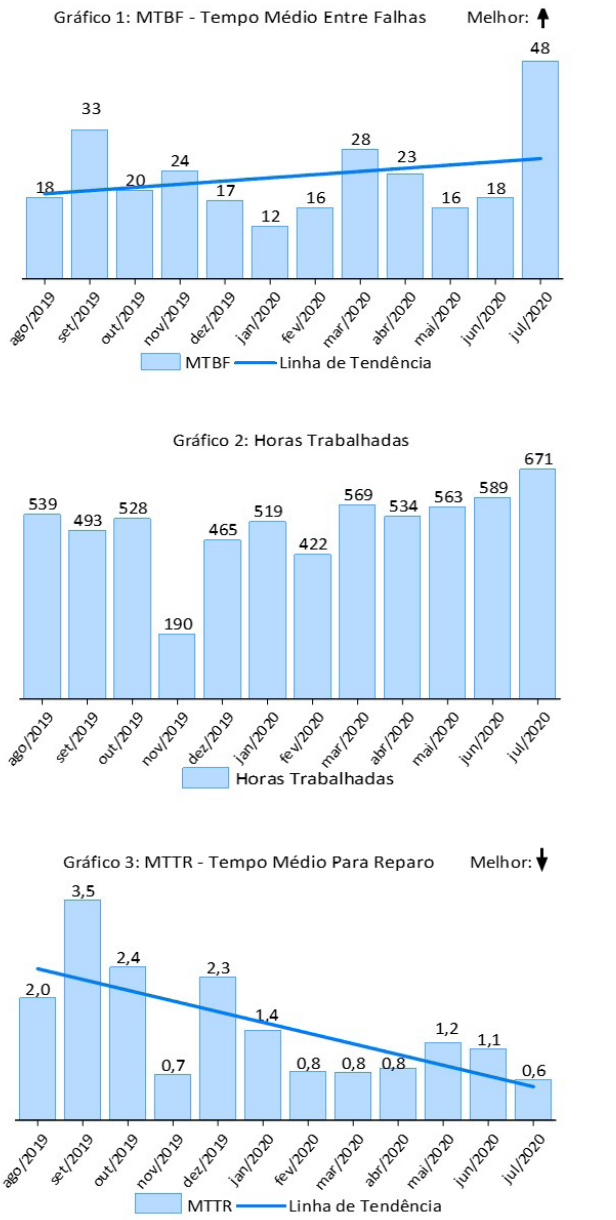


**Figura 8:** Resultado dos indicadores da Encartuchadora 3. **Fonte**: Dos autores

Após analisar os dados das três Encartuchadoras, observou-se que a linha de tendência do OEE, o principal indicador de efetividade utilizado nas indústrias farmacêuticas, possui linhas de tendências positivas em ambos os casos, ultrapassando a meta estipulada pela empresa (61%) nos últimos três meses analisados, indicando assim uma melhora após a estruturação do PCM.

Os resultados analisados ao longo do período estudado representam uma melhora do setor de PCM, porém podem-se atingir resultados ainda melhores, visto que o PCM é um setor que exige sempre a melhoria contínua das suas ações, desenvolvendo sempre novas rotinas de manutenção que se adéquem à necessidade e às metas exigidas pela empresa. É importante ressaltar que após a estruturação do PCM tem-se um período de dois a quatro anos para se conseguir um resultado totalmente satisfatório de acordo com as experiências e conhecimentos do gestor de PCM da empresa em questão, pois o processo de melhoria da manutenção é longo e que exige adaptações constantes.

# Conclusões

Conclui-se que a estruturação do setor de PCM proporciona melhor organização das atividades da manutenção, desde a identificação dos equipamentos e classificação por criticidade, de acordo com a sistemática de criação de TAGs, até o organograma da manutenção e o planejamento das atividades, sendo esse processo facilitado pela presença de um sistema de manutenção integrado ERP.

Dessa forma, partir da estruturação do PCM na indústria, pode-se perceber melhoria nos indicadores de MTBF, MTTR e OEE, sendo que, o OEE superou a meta estipulada pela indústria na maioria dos meses analisados, mesmo a Encartuchadora 01 apresentando sua linha de tendência do MTBF bastante negativa, por conta do aumento do número de horas trabalhadas em praticamente 300%, o que justifica a melhora no OEE desse equipamento. A Encartuchadora 02 apresentou melhores resultados no OEE, alcançando a meta nos últimos quatro meses consecutivos analisados.

Após um ano do início da estruturação, a empresa já atingiu bons resultados, elevando o OEE de 42% (media entre os equipamentos analisados) em agosto de 2019 para 76% em julho de 2020, o que significa uma melhora de 34% na produção desses equipamentos.

O PCM pode ser considerado como uma excelente ferramenta de gestão de processos industriais, pois promovem além da diminuição dos custos da manutenção, melhor confiabilidade das máquinas e equipamentos.

# Referências


1. Casonato, Poatã. Como a Industria Farmacêutica Cresce com a Pandemia. ICTQ, **2020**.
2. ANVISA. AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução da diretoria colegiada- RDC nº 301, de 21 de agosto de **2019**. Disponível em: <www.portal.anvisa.gov.br> Acessado em: 11 mai. **2020**.
3. Filho, Gil Branco. A Organização, o planejamento e o controle da manutenção. Ciência Moderna, **2008**.
4. Teles, Jhonata. PCM Descomplicado – Planejamento e Controle de Manutenção. Brasília-DF: ENGETELES – Engenharia de Manutenção Consultoria e Treinamentos, **2017**.
5. ABNT.ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462, Confiabilidade e Mantenabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, **1993**.
6. Kardec, Allan; Nascif, Júlio. Manutenção: função estratégica. 4. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Qualitymark, **2013**.
7. Teles, Jhonata. Guia prático para implantação indicadores de manutenção. Brasília-DF: ENGETELES – Engenharia de Manutenção Consultoria e Treinamentos. 9 p. **2017**.

8. Viana, Herbert Garcia. PCM, Planejamento e Controle da Manutenção. Rio de janeiro: Qualitymark ed, **2002**.

9. Scholles, Clara Rejane. Criticidade de equipamentos na indústria: Como definir prioridades na manutenção. Industria 4.0 Manufatura Avançada, julho de **2018**.

10. Carvalho, Elaine Aparecida. A Importância do Planejamento e Controle da Manutenção para a Manutenção. Pirassununga, **2017**.

11. Cyrino, Luis. Procedimentos de Manutenção. Manutenção em Foco, 17 de novembro de **2016**.

12. Silva, Julio Cesar. A importância da Implantação do PCM (Planejamento e Controle de Manutenção) Durante a Realização de Manutenções. Varginha, **2018**.

13. Santos, Luís Márcio Alves. *Et al*. A Importância da manutenção industrial e seus indicadores. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 11, Vol.01, pp. 108-128. Novembro de **2019**. ISSN: 2448-0959.

## Gustavo G. F. Camps, Humbertt C. Souza, Pedro A. A. Lima*, Romário R. Amorim & Sérgio M. Brandão

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: pedroeng.mec@hotmail.com

# Instruções para Envio de Artigos para a Revista Processos Químicos

**Prezado(a) autor(a),**

Para que seu artigo possa entrar em nosso processo de avaliação, visando à possível publicação na revista Processos Químicos, o texto deverá satisfazer às seguintes condições:

- ► Utilizar somente o editor Microsoft Word, numerando todas as páginas;
- ► Conter, no máximo, 40 laudas, incluindo Figuras, Tabelas, Esquemas etc.;
- ► Conter Resumo e *Abstract*, ambos com até 100 palavras;
- ► Conter Palavras-chave e *Keywords*, ambos com até 3 palavras;
- ► Título com, no máximo, 20 palavras;
- ► Titulação do autor (créditos). Dados pessoais do autor: endereço, telefone, e-mail;

► As figuras, tabelas, esquemas etc. devem ser colocados após as referências e devidamente identificados. Se escaneados, devem ser em alta resolução (800 dpi/ bitmap para traços) com extensão TIF ou JPEG. As fotos ou desenhos com cor (300 dpi/grayscale) devem ser enviados com extensão tif/jpg, para não termos problemas ao aplicá-las no padrão da Revista. Outras extensões possíveis: CDR, EPS ou CDX. No caso particular de esquemas contendo estruturas químicas, estas deverão ter sempre a mesma dimensão, para que possam ser reduzidas uniformemente. Considerar que as figuras deverão ter largura máxima de uma coluna (8,5 cm) ou, excepcionalmente, de 2 colunas (17,5 cm).

► As figuras (gráficos, esquemas, etc.) deverão ter qualidade gráfica adequada (usar somente fundo branco).

► A primeira página deverá conter o título do trabalho, nome e endereço dos autores (para a revista, a menor unidade é o departamento). Havendo autores com diferentes endereços, estes deverão se seguir imediatamente ao nome de cada autor. Os autores devem ser agrupados por endereço. Indicar com asterisco(*) o autor para correspondência, colocando seu e-mail no rodapé desta página (um só e-mail). A segunda página deverá conter o título, o resumo e o *abstract* do trabalho;

► As referências bibliográficas deverão ser numeradas e todas citadas ao final do artigo. Será utilizada a abreviatura da revista como definida no *Chemical Abstracts Service Source Index* (ver *http://www.cas.org/sent.html*). Caso a abreviatura autorizada de uma determinada revista não possa ser localizada e não for óbvio como o título deve ser abreviado, deve-se citar o título completo. Exemplos de citações:

1. Varma, R. S.; Singh, A. P.; J. Indian Chem. Soc. **1990**, 67, 518.
2. Provstyanoi, M. V.; Logachev, E. V.; Kochergin, P. M.; Beilis, Y. I.; Izv. Vyssh. Uchebn. Zadev.; Khim. Khim. Tekhnol. **1976**, 19, 708.
3. Lemos, T. L. G.; Andrade, C. H. S.; Guimarães, A. M.; Wolter-Filho, W.; Braz-Filho, R.; J. Braz. Chem. Soc. **1996**, 7, 123;
4. Ângelo, A. C. D.; de Souza, A.; Morgon, N. H.; Sambrano, J. R.; Quim. Nova **2001**, 24, 473.
5. Regitz, M. Em Multiple Bonds and Low Coordination in Phosphorus Chemistry; Regitz, M.; Scherer, O. J., eds.; Georg Thieme Verlag: Stuttgart, **1990**, cap. 2.
6. Cotton, F.A.: Wilkinson, G.; Advanced Inorganic Chemistry, 5th ed., Wiley: New York, **1988**.

► Espaço duplo entre linhas;

► Fonte: *Times New Roman* 12;

► A linguagem empregada deve ser atual. Isso implica a não utilização de termos, tais como: destarte, outrossim, descrever-se-á.

► O texto deve apresentar discurso impessoal, ou seja, expressões, tais como: constatamos, verificamos, utilizamos devem ser substituídas por constatou-se, foi verificado, utilizou-se.

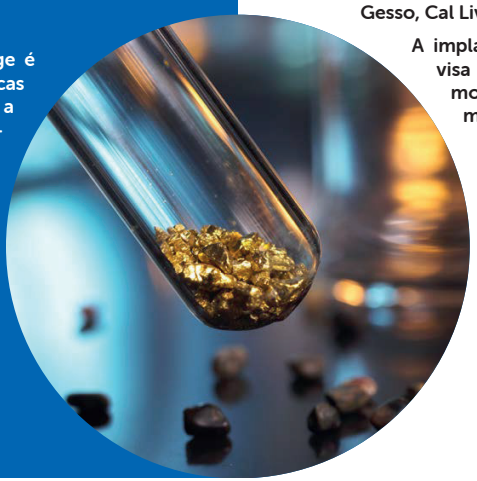
► Enviar uma cópia do artigo, acompanhada de carta de encaminhamento à Editoria da Revista Processos Químicos, por meio do site **www.rpqsenai.org.br.** Maiores informações podem ser obtidas mediante endereço eletrônico: *revistapq.senai@sistemafieg.org.br*.

# LABORATÓRIO DE POLIMORFISMO MOLECULAR

## QUEM SOMOS?

A Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange é uma das mais importantes instituições tecnológicas de Anápolis, com histórico compromisso com a difusão de conhecimento aplicado ao desenvolvimento industrial. Ao longo dos anos, tem apoiado as indústrias por meio da formação de recursos humanos e da prestação de serviços de Tecnologia e Inovação (assistência ao setor produtivo, serviços de laboratório, pesquisa aplicada e informação tecnológica, entre outros).

A implantação do Controle de Polimorfismo Molecular visa atender a demanda de controle estrutural (polimorfismo) de amostras sólidas dos setores produtivos, em que se destacam as indústrias do setor Mineroquímico.



## COMO PODEMOS TE AJUDAR?

Materiais Sólidos podem apresentar diferentes arranjos arquitetônicos de suas estruturas cristalinas (polimorfismo molecular). Este fenômeno, conhecido como polimorfismo, pode impactar a Identificação e Quantificação de Fases e Pureza do Material de Partida.

Algumas técnicas de caracterização no estado sólido são frequentemente empregadas para identificação e elucidação estrutural em sólidos farmacêuticos, entre elas se destaca a Difratometria dos raios X, com ampla aplicação nos seguintes controles: Cimento, Calcário, Gesso, Cal Livre, Minerais, entre outros.

A implantação do Controle de Polimorfismo Molecular visa atender à demanda de controle estrutural (polimorfismo) de amostras sólidas do setor produtivo de mineração (entre outros).

## NOSSOS SERVIÇOS

- Realizar análises de difração dos raios-X de materiais sólidos do setor produtivo de mineração
- Desenvolvimento tecnológico no controle estrutural junto ao setor produtivo

**Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange**
polimorfismo.senai@sistemafieg.org.br
(62) 3902-6227 | (62) 9 9866-1638

SENAI PELO FUTURO DO TRABALHO
FIEG PELO FUTURO DA INDÚSTRIA