

RA EM

**3ª
EDIÇÃO**

REVISTA ELETRÔNICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ENGENHARIA MECÂNICA



CARTA DO EDITOR



Esse periódico é uma iniciativa dos petianos do Programa de Educação Tutorial Mecânica&Energia dos cursos de graduação de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica, intitulada Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica (R4EM) e Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.

Esta terceira edição da R4EM chega em um momento em que nosso periódico começa a receber atenção de programas de pós-graduação como um meio de divulgar seus trabalhos. A quantidade de avaliadores externos à UFERSA cresceu, a divulgação entre IES externas à UFERSA aumentou, e espera-se o recebimento de artigos de outras IES. A partir da próxima edição a revista terá ISSN e os artigos terão o DOI, momento no qual as edições anteriores também receberão o ISSN e o DOI.

Inicialmente, o objetivo deste periódico era receber apenas trabalhos referentes aos cursos de graduação em Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica da UFERSA. Seriam artigos de graduação para divulgação de trabalhos de conclusão de curso, projetos de engenharia e iniciação científica, nas áreas de ensino, pesquisa e extensão. Porém, desde a primeira edição, o periódico também está recebendo trabalhos de estudantes de pós-graduação de forma muito tímida, pois este é um canal que divulga ciência e tecnologia das áreas de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica em todos os níveis. Espera-se que este periódico sirva como material de referência para trabalhos de graduação e de pós-graduação da UFERSA, mas também espera-se que outras IES possam usar estes trabalhos como referência e divulgar as pesquisas de seus alunos em todos os níveis.

Esta edição apresenta o artigo convidado, intitulado “O PAPEL DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFERSA NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E NO AVANÇO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICO NO SEMIÁRIDO”, de autoria do Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFERSA. Este artigo dá uma breve visão da pesquisa na área de Engenharia Elétrica na região do Semi-Árido brasileiro.

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior
Editor-Chefe da R4EM



ARTIGO CONVIDADO

O PAPEL DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFERSA NO
DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E NO AVANÇO DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NO SEMIÁRIDO

PROF. DR. HUMBERTO DIONÍSIO DE ANDRADE
COORDENADOR DO PPGEE – UFERSA



A ciência, a tecnologia e a inovação no cenário mundial moderno e contemporâneo, são os pilares e instrumentos fundamentais para o crescimento, o desenvolvimento econômico, e a democratização do conhecimento e da formação continuada. Aliados a essa tendência, a Universidade Federal do Semiárido, através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) apresenta-se com o nobre papel importante de formar profissionais altamente qualificados em nível de excelência, nas áreas de atuação da Engenharia Elétrica, fornecendo-os uma sólida formação, para que possa atuar no plano de interesse científico, tecnológico e social, além de contribuir para a evolução humana na ciência, tecnologia e cultura, contribuindo positivamente para o desenvolvimento do socioeconômico da região do Semiárido, principalmente no estado do Rio Grande do Norte, Região Nordeste e numa dimensão nacional quanto na internacional.

A região semiárida possui muitas empresas dos setores petrolífero, cerâmico, salineiro, agroindustrial, de mineração, e principalmente o setor de energias renováveis e ainda dentro desse contexto de desenvolvimento socioeconômico desta região, a pesquisa científica tem um papel essencial e dar sua grande contribuição. Diante desse cenário, a visibilidade do PPGEE é notória e favorecida através da própria inserção social e estratégica que a UFERSA apresenta dentro da região de todo semiárido, ou seja, o PPGEE entra como o programa que dar resposta para a formação de capital humano apontados para o desenvolvimento da região, sendo isso observado através da produção técnica dos professores, na organização eventos e ações de extensão, no apoio à todos os eventos da universidade que abordem temas de multidisciplinaridade e ser o único programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica no interior do Estado do RN, sendo isso um dos pontos forte capaz de polarizar dezenas de cidades.

Portanto, a nobre e essencial missão do PPGEE aliadas a todos as características agregadoras e que fortalecem os aspectos de desenvolvimento econômico e sustentável dessa região do Brasil, o semiárido, e nessa ótica, o programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica realiza sua missão de “*Per scientia aridam terram floret*”, ou seja, “Através da ciência a terra seca floresce”.



EDITORES-CHEFE

Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga
Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

EDITORES-ADJUNTOS

Alexsandro Pinheiro de Moura
Estefanie Rayane Silva de Oliveira
Josivan Lopes de Moraes Júnior

EDITORIAÇÃO

Giovanna Beatriz Almeida Pereira
Theo Martins de Alencar Paiva

CONSELHO EDITORIAL

Dr. Adelson Menezes Lima (UFERSA/Campus Pau dos Ferros)
Dra. Adiana Nascimento Silva (UFERSA/Campus Caraúbas)
MSc. Danilo de Souza (IFRN/Campus Mossoró)
Dra. Fabiana Karla de Oliveira M. Varella (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. Francisco Ilson da Silva Junior (UFC)
Dr. Glauco Fontgalland (UFCEG)
MSc. Herick Talles Queiroz Lemos (IFPE/Campus Pesqueira)
Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. José Hilton Ferreira da Silva (UFCEG)
Dr. Kleiber Lima de Bessa (UFRN)
Dr. Taciano Amaral Sorrentino (UFERSA/C&T Mossoró)
Dr. Zoroastro Torres Vilar (UFERSA/Campus Mossoró)

DESIGN EDITORIAL

Jessé Medeiros de Paiva Filho

APOIO

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva, Mossoró-RN.



Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica
ISSN 2763-5325



EDITORA

EDUFERSA

*Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva. Mossoró-RN, UFERSA Campus Leste,
Centro de Convivência. E-mail: edufersa@ufersa.edu.br*

AUTOR CORPORATIVO

PET MECÂNICA E ENERGIA

*Programa de Educação Tutorial dos Cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica
Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva. Mossoró-RN, UFERSA Campus Leste / Centro
de Engenharias / Departamento de Engenharia e Tecnologia.
E-mail: r4em@ufersa.edu.br*



SUMÁRIO

Transformações em Sistemas Elétricos de Potência: Análise das Transformadas de Clarke e Park .. 1 <i>Nathan B. Gurgel, Adriano Aron F. de Moura, Ailson P. de Moura, Ednardo P. da Rocha, Victor de Paula B. Aguiar, Olympio C. da Silva Filho.</i>	
Estudo sobre a reciclagem de fluidos de corte aplicados no processo de torneamento por um filtro confeccionado com materiais de fácil acesso.....13 <i>Samuel de L. Menezes, Ramsés Otto C. Lima.</i>	13
Análise da implementação de medidas de eficiência energética em uma indústria cerâmica de pequeno porte em Russas/CE.....25 <i>Luiz José de B. Neto, Francisco J. Sombra Jr, Fabiana Karla de O. M. V. Guerra.</i>	25
Estudo das propriedades mecânicas de polímeros aplicados em manufatura aditiva em comparação a polímero de aplicação industrial.....35 <i>Ramsés Otto C. Lima, Samuel de O. Martins, Kalyude D. de Sousa, Mayla A. Medeiros.</i>	35
O uso do sensor RGB TCS3200 em arduino, aplicado a esteira seletora por cor.....47 <i>Gabrielle Roveratti, Adriano de A. Feitosa, Jhonatan W. Galera.</i>	47
Determinação de Erros Máximos Contidos em Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão Estimados a Partir de Medidas de Tensão e Corrente.....59 <i>Nikolas I. F. de Oliveira, Cleydson A. de C. Nascimento, Iggor B. da Silva, Melinda C. S. da Cruz.</i>	59
Desempenho Entre os Algoritmos de Localização de Falhas Completo e Simplificado Para Linhas de Transmissão Com 3 Terminais e Parâmetros Elétricos Diferentes..... 69 <i>Cleydson A. de C. Nascimento, Nikolas I. F. de Oliveira, Iggor B. da Silva.</i>	69
Propulsão Hipersônica: limitações e alternativas 81 <i>Artur Cristiano Paulino Pereira, Paulo Gilberto de Paula Toro, George Santos Marinho.</i>	81
Dimensionamento e Estudo sobre uma Bobina de Tesla 95 <i>Iggor B. da Silva, Cleydson A. de C. Nascimento, Nikolas I. F. de Oliveira.</i>	95
Estudo de caso da tarifa branca considerando a implementação de técnicas de GLD e uso de aquecedor solar de água..... 103 <i>Isabel Cristina P. de Gois, Fabiana Karla de O. M. V. Guerra.</i>	103



Artigo

Transformações em Sistemas Elétricos de Potência: Análise das Transformadas de Clarke e Park

Nathan Bezerra Gurgel ^[1], Adriano Aron Freitas de Moura ^[2], Ailson Pereira de Moura ^[3], Ednardo Pereira da Rocha ^[4], Victor de Paula Brandão Aguiar ^[5], Olympio Cipriano da Silva Filho ^[6]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nathan.gurgel@ieee.org

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Ceará; ailson@ufc.br

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

^[5] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; victor@ufersa.edu.br

^[6] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; olympio.cipriano@ufersa.edu.br

Recebido: 29/10/2020;

Aceito: 24/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: As máquinas elétricas rotativas trifásicas são elementos essenciais para os sistemas elétricos de potência. Devido ao caráter dinâmico desses equipamentos, as análises de seus circuitos elétricos equivalentes se tornam um tanto complexas. Existem diversas formas para facilitar a resolução dos projetos e análises, sendo a transformação de domínio uma das mais comumente usadas e em específico, citamos a transformada de Park e Clarke que foram inicialmente desenvolvidas para simplificar os cálculos. O presente artigo traz uma revisão sistemática dessas transformadas, mostrando as deduções das matrizes de Amplitude Invariante e Potência Invariante, e a aparição da frequência dupla quando a velocidade angular do referencial está na velocidade síncrona, além de mostrar na prática as vantagens de se utilizar essas transformações.

Palavras-chave: Transformada de Clarke; Transformada de Park; Sistemas Elétricos de Potência

Abstract: The triphasic rotative electric machines are essential elements to the electric power systems. Due to the equipment's dynamic behavior, their equivalent electrical circuits become complex. Exist many ways to ease the projects and analysis resolutions, being the domain transformation one of the most used, and in specific, we cite the Park and Clarke transformation which was initially developed to simplify the calculations. The present article brings a systematic review of these transformations, showing the deductions of Invariant Amplitude and Power Invariant matrix, and the existence of the doubled frequency when the reference angular speed is equal to the synchronous speed, in addition to the visualization of the practical outcomes of the use of these transformations.

Key-words: Clarke Transformation, Park Transformation, Electric Power Systems.

1. INTRODUÇÃO

OS Geradores Rotativos (GRs) são elementos essenciais para os Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Em particular no Brasil, apesar dos avanços na integração de fontes de energia estáticas (sistemas fotovoltaicos e baterias) com a rede [1,2], usinas eólicas, térmicas, hidrelétricas e nucleares representam 96% da geração elétrica de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [3], onde o funcionamento dessas usinas dependem de turbinas conectadas à geradores síncronos ou de indução.

Visto sua importância, o projeto e análise de GRs é de suma importância para garantir a continuidade e confiabilidade de suas operações, mas devido ao seu comportamento dinâmico espacial e temporal, dando ênfase a máquinas polifásicas, suas análises se tornam mais complexas. Entre tantas formas para facilitar o trabalho, tem-se a transformada de coordenadas. A primeira apresentação de um método para simplificar a análise de máquinas polifásicas vem de Fortescue [4] o qual apresentou a transformada de eixos polifásicos em suas componentes simétricas. Clarke [5] apresentou uma modificação das Componentes Simétricas (CS) para

remover a necessidade dos números complexos inerentes das componentes simétricas. Park [6] modificou a análise de máquinas síncronas de tal maneira que as variáveis referentes aos enrolamentos do estator estivessem referidas a enrolamentos rotativos fictícios. Stanley [7] mostrou que as indutâncias mútuas de máquinas de indução devido ao movimento do rotor podiam ser eliminadas ao referir os enrolamentos deste a enrolamentos fictícios estáticos. Kron [8] apresentou a transformação das variáveis tanto do estator quanto do rotor para um referencial que girava em sincronia com a velocidade angular dos parâmetros do estator. No fim, os métodos propostos por [5-9] eram nada mais que casos particulares de um caso geral demonstrado por Krause [10], esse caso geral pode ser chamado de Referencial Arbitrário [11].

Apesar de inicialmente ser desenvolvido para análise de máquinas elétricas, o referencial arbitrário, ou sistema de coordenadas $dq0$, é utilizado em outras aplicações tais como filtros *shunt* de potência ativa [12], análise de sinais [13], controle de inversores [14], modelagem de componentes de sistemas elétricos [15,16] e análise de SEP [17].

Haja vista a importância desse sistema para a análise de SEP como um todo o presente artigo tem como objetivo uma revisão sistemática das transformadas de Park e Clarke, abordando de maneira clara as nuances das transformações além de trazer exemplos práticos de sua aplicação. O artigo está dividido da forma proposta. Na Seção 2 é apresentada a Transformada de Clarke (TC), mostrando como derivar ela a partir da forma proposta por Clarke [5], além das constantes que definem a invariância de potência e a invariância de amplitude. Na Seção 3 é apresentada a Transformada de Park (TP) de forma semelhante à Transformada de Clarke. Na Seção 4 é apresentada a generalização do Referencial Arbitrário além de suas aplicações. Na Seção 5 é discutido os resultados e propostas para futuros trabalhos.

2. TRANSFORMADA DE CLARKE

Em 1938, Edith Clarke apresentou uma modificação das componentes simétricas a fim de remover a parte imaginária presente nas componentes simétricas e facilitar os cálculos. Para apresentar o conceito, inicialmente vamos definir um sistema, convenientemente de 3 fases, dado pela seguinte equação:

$$\lambda_{abc} = \begin{bmatrix} M_a \cos(\omega t + \phi_a) \\ M_b \cos(\omega t + \phi_b) \\ M_c \cos(\omega t + \phi_c) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde: λ_{abc} é uma variável qualquer definida pelo sistema de coordenadas abc ; M_k é a amplitude máxima da coordenada k ; ω é a velocidade angular do sistema, dado em radianos/s; e ϕ_k é a defasagem da coordenada k em relação a origem, dado em radianos.

Quando é dito que um sistema trifásico é equilibrado significa que as amplitudes de todas as coordenadas do sistema são iguais e eles possuem uma defasagem de 120° ou $2\pi/3$ entre si. Matematicamente:

$$\lambda_{abc} = M \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi) \\ \cos(\omega t + \phi - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \phi + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

A TC inicialmente foi desenvolvida por uma modificação da transformada de Fortescue. A apresentação detalhada de Fortescue está além do escopo deste artigo, caso tenha interesse, recomenda-se olhar [4]. Denotando o sistema de CS como λ_{012} , é possível relacionar este com o sistema da Equação 1 pela Equação 3 onde $\alpha = e^{\frac{j2\pi}{3}} = \cos(2\pi/3) + j \sin(2\pi/3)$. Fazendo a inversão da Equação 3, obtém os valores do sistema de coordenadas das CS como mostra a Equação 4.

$$\lambda_{abc} = T_{abc-012} \lambda_{012} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\lambda_{012} = [T_{abc-012}]^{-1} \lambda_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Uma vez sabendo os valores das CS, encontramos a TC pela Equação 5. Podemos perceber pela Equação 5 que a coordenada α é a soma das componentes positiva e negativa, a coordenada β é a diferença das componentes positiva e negativa defasada 90 graus, e a componente zero permanece a mesma.

$$\lambda_{\alpha\beta 0} = T_{012-0\alpha\beta} \lambda_{\pm 0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Um caso importante para ilustrar é quando faz a transformação de um sistema trifásico equilibrado. Usando a Equação 2 com $\phi = 0$, obtém o resultado da Equação 6, para melhor compreensão do evento a Figura 1 mostra o paralelo entre um sistema abc e $0\alpha\beta$, ambos equilibrados em fase e amplitude. Na Figura 1a visualizamos o caso convencional do sistema trifásico equilibrado, na Figura 2a é possível visualizar duas fases defasadas de noventa graus entre si. Para simplificar futuros exemplos, denotamos a transformação dos eixos abc em $0\alpha\beta$ pela Equação 7. Caso deseje visualizar seu desenvolvimento, refira-se ao Apêndice A.

$$\lambda_{0\alpha\beta} = T_K \lambda_{abc} = V \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_K = T_{C-K} T_{abc-CS} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

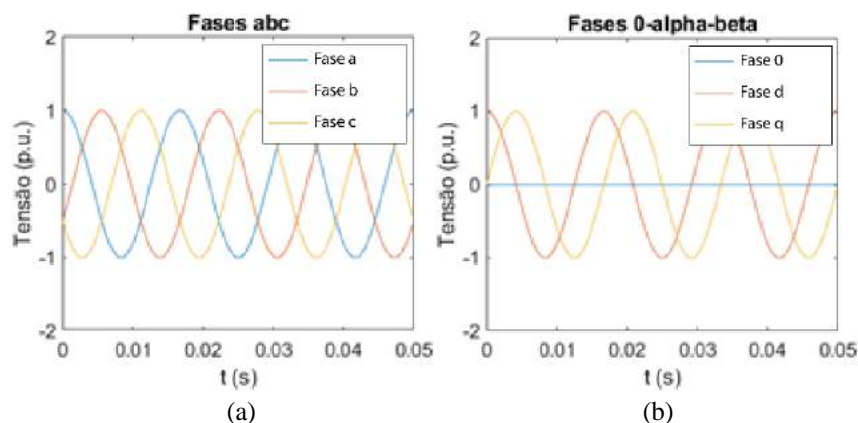


FIGURA 1. Sistema trifásico equilibrado em fase e amplitude apresentado no sistema (a) abc (b) $0\alpha\beta$.

Uma vez que estejamos utilizando a TC para sistemas elétricos, desejamos entender o que os eixos $0\alpha\beta$ estão nos informando em termos práticos, para tanto utiliza-se uma modificação da matriz de tal forma que o valor de um parâmetro que se deseja entender em um sistema equilibrado seja exatamente igual tanto nos eixos $\alpha\beta$ quando em abc (o 0 é desconsiderado, pois em um sistema equilibrado, o valor no eixo 0 é nulo para qualquer instante de tempo). As modificações usuais aplicadas a TC nos levam a duas formas conhecidas como Amplitude Invariante (AI) e Potência Invariante (PI), os quais são as Equações 8 e 9, respectivamente. Caso deseje ver a resolução, refira-se ao Apêndice B.

$$T_{K-AI} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_{K-PI} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. TRANSFORMADA DE PARK

Em 1929, Robert H. Park apresentou uma modificação da análise de máquinas elétricas na qual as tensões, correntes e fluxos magnéticos estão referidos a um sistema que está girando na mesma velocidade da máquina síncrona [6]. O autor denomina esse sistema de $dq0$, onde d é o eixo direto da máquina síncrona e q é o eixo em quadratura, a coordenada 0 é a mesma dos sistemas $\alpha\beta0$ e 012.

Matematicamente definindo a TP:

$$\lambda_{dq0} = \mathbf{T}_p \lambda_{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde θ é a posição instantânea dos eixos, além disso $d\theta = \omega dt$. λ_k é uma variável (geralmente tensão e , corrente i ou fluxo magnético ψ) relacionada à coordenada k .

Para futuras análises, definamos também a inversa da TP sendo:

$$\mathbf{T}_p^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Assim como a TC, a TP possui as matrizes de PI e AI, visualizadas pelas Equações 12 e 13, respectivamente. Por métodos quase iguais aos apresentados no Apêndice B é possível encontrar os valores das constantes e por isso suas deduções não serão apresentadas nesse artigo.

$$\mathbf{T}_p = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{T}_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Um detalhe interessante a se observar é a semelhança entre as TC e TP. Definindo o instante $\theta(0) = 0$ na Equação 10 e evidenciando a matriz de transformação obtemos a Equação 14, que é justamente a TC. A conclusão é que a TC é a TP estacionária para $\theta = 0$, ou inversamente, a TP é a TC girando a uma velocidade ω .

$$\mathbf{T}_p = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Utilizando a TP em sistemas elétricos trifásicos observamos dois eventos. Para o primeiro evento, consideremos um sistema trifásico equilibrado como apresentado na Equação 2, aplicando a Equação 2 na Equação 10, obtemos a Equação 15. Nisso vemos o principal benefício da TP, em um caso de sistema equilibrado necessitamos trabalhar somente com uma fase. Caso deseje visualizar a dedução, refira-se ao Apêndice C.

$$\lambda_{dq0} = \begin{bmatrix} M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Para o segundo caso, considere o sistema trifásico na Equação 1 com ϕ_a sendo a referência. Usando esse sistema na Equação 10 obtemos as Equações 16.1-16.3. Após algumas manipulações apresentadas no Apêndice C, é evidenciado que um sistema $dq0$ desequilibrado apresenta um comportamento senoidal em todas as suas

fases, e além disso, as fases d e q apresentam uma componente constante e a frequência em seus termos senoidais são o dobro da frequência do sistema abc como mostra a Figura 2.

$$\lambda_d = \frac{2}{3} \left[M_a \cos(\theta) \cos(\omega t) + M_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + M_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (16.1)$$

$$\lambda_q = \frac{2}{3} \left[M_a \sin(\theta) \cos(\omega t) + M_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + M_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (16.2)$$

$$\lambda_0 = \frac{M}{3} \left[M_a \cos(\omega t) + M_b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + M_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (16.3)$$

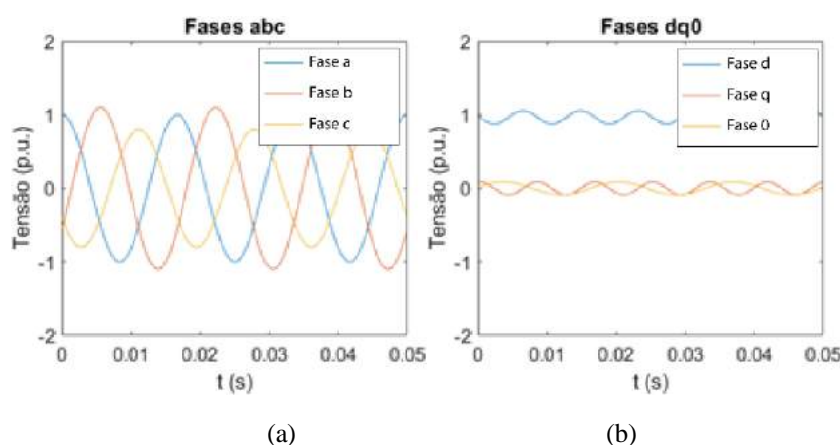


FIGURA 2. Visualização do sistema trifásico com amplitudes desequilibradas e fases equilibradas no sistema (a) abc (b) $dq0$.

4. GENERALIZAÇÃO E APLICAÇÕES

A TP e TC são casos particulares do chamado Transformada de Referencial Arbitrário (TRA) [11]. Ainda de acordo com Krause, os eixos girantes do sistema $dq0$ podem girar a qualquer velocidade, porém somente 3 casos são funcionais, estas estão descritas na Tabela 1. A partir de agora as transformações $dq0$ vão ser referidas apenas por T_{RA} , independente da velocidade do referencial.

TABELA 1. Principais referenciais de velocidade e sua descrição [11].

Velocidade	Interpretação
0	Sistema estacionário (Clarke)
ω_r	Variáveis referidas à velocidade fixada no rotor
ω_s	Variáveis referidas à velocidade síncrona da máquina (Park)

Assim como a TRA é aplicada para valores primordiais de máquinas elétricas, também é possível aplicar a mesma em elementos passivos como indutores, capacitores e resistências. As transformações de abc para $dq0$ são dadas pela Equação 17 onde Λ pode ser a matriz de indutância, capacitância ou resistência de um sistema trifásico. Dois casos particulares da TRA é quando a matriz Λ é: diagonal; simétrica. Os resultados dos dois casos são apresentados nas Equações 18 e 19. A Equação 19 ilustra a principal vantagem da TRA, um sistema que antes estava acoplado entre suas fases agora pode ser descrito de maneira separada, facilitando seus cálculos. Além disso, como a transformação de λ_{abc} para λ_{dq0} resulta na Equação 15 para casos equilibrados, um sistema que antes era matricial agora depende unicamente de uma equação.

$$\Lambda_{dq0} = T_{RA} \Lambda_{abc} (T_{RA})^{-1} \quad (17)$$

$$\Lambda_{dq0} = T_{RA} \begin{bmatrix} \Lambda & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda \end{bmatrix} (T_{RA})^{-1} = \Lambda_{abc} \quad (18)$$

$$\Lambda_{dq0} = T_{RA} \begin{bmatrix} \Lambda & k & k \\ k & \Lambda & k \\ k & k & \Lambda \end{bmatrix} (T_{RA})^{-1} = \begin{bmatrix} \Lambda - k & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda - k & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda + 2k \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para visualizar os efeitos da TRA, considere o sistema apresentado na Figura 3, com os parâmetros apresentados no Quadro 1, em regime permanente, visualmente o sistema se mostra estável nas Figuras 4a-4c, onde temos a tensão nos eixos abc e $dq0$ e a corrente nos eixos abc . Porém, é visível a presença de um transitório na Figura 4d. Há que se atentar que o valor do eixo 0 é estável, indicando que o transitório ocorre de maneira homogênea nas três fases.

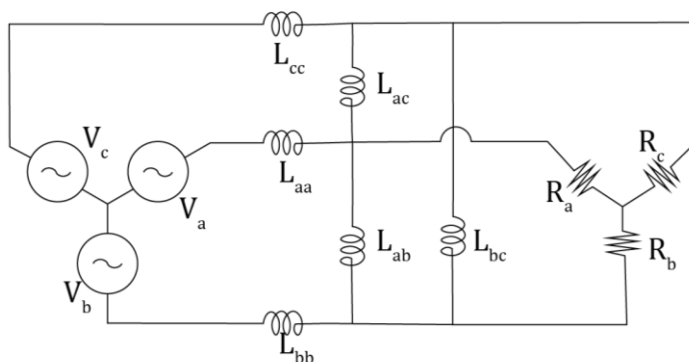


FIGURA 3. Exemplo de sistema elétrico trifásico.

QUADRO 1. Valores do sistema elétrica da Figura 3.

V_a	$220e^{j0}$	L_{aa}	2 mH
V_b	$220e^{-j120^\circ}$	L_{bb}	2 mH
V_c	$220e^{j120^\circ}$	L_{cc}	2 mH
R_a	1000Ω	L_{ab}	1 mH
R_b	1000Ω	L_{ac}	1 mH
R_c	1000Ω	L_{bc}	1 mH

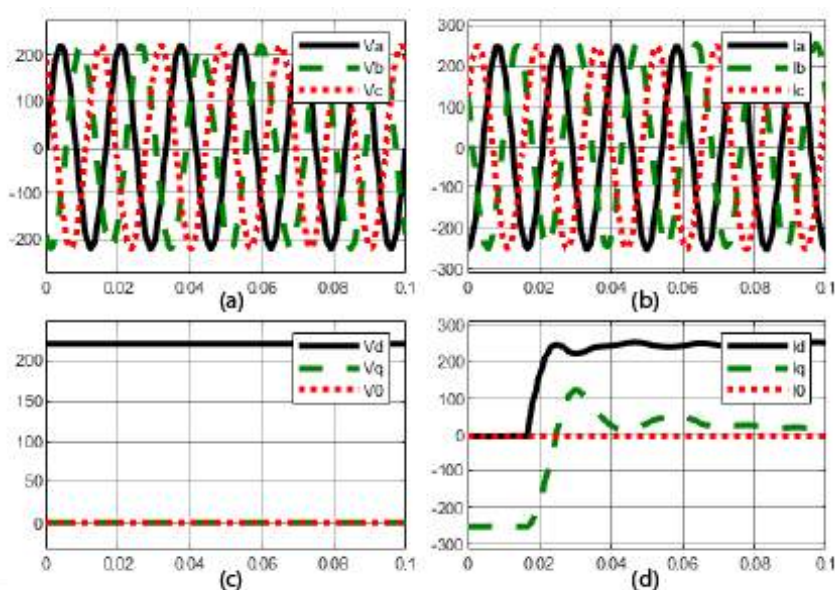


FIGURA 4. Resultado do sistema da Figura 3. (a) Tensão abc . (b) Corrente abc . (c) Tensão $dq0$. (d) Corrente $dq0$.

Para a visualização de uma falta, a TRA também se torna mais prática. Na Figura 5 há os resultados das correntes e tensões em abc e $dq0$ do sistema da Figura 3 quando ocorre uma falta bifásica entre as fases a e b em $t = 0.1s$. Na Figura 5b temos a modificação gradual da corrente para as fases abc enquanto na Figura 4d, a visualização do transitório da falta é mais visível alcançando um pico de $300A$ e estabilização próximo aos $250A$ no eixo d . Um ponto a salientar é a frequência dupla em $dq0$.

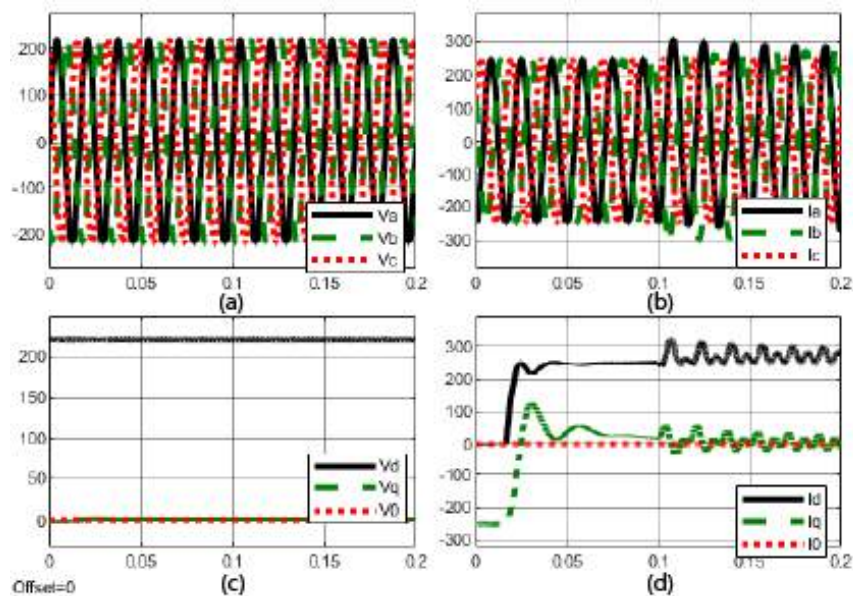


FIGURA 5. Resultado do sistema da Figura 3 para uma falta bifásica. (a) Tensão abc . (b) Corrente abc . (c) Tensão $dq0$. (d) Corrente $dq0$.

5. CONCLUSÃO

O artigo apresentou as transformadas de Clarke e Park, mostrando toda a fundamentação teórica e suas aplicações em sistemas elétricos. Foi visto o efeito de sistemas desequilibrados em fase e ângulo para os referidos sistemas, além da dedução para a Potência Invariante e Amplitude Invariante, além da visualização prática de toda a teoria em simulação.

Esse artigo serve para que estudantes visualizem de maneira clara as vantagens das TRAs, permitindo que aplique em diferentes casos práticos como os apresentados em [5-17]. Futuros trabalhos a serem feitos utilizando o resultados deste trabalho são: utilização das componentes CC apresentadas na dedução da Transformada de Clarke desequilibrada em fase e ângulo para identificação de faltas; Dedução dos efeitos de elementos em passivos no sistema geométrico $abc \leftrightarrow dq0$ apresentado por O'Rourke [18].

APÊNDICE A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CLARKE

Usando um sistema de tensões trifásico equilibrado na Transformada de Fortescue obtemos:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{012} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \cos(\omega t) \\ V \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \\ &= \frac{V}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\omega t) + j \operatorname{sen}(\omega t) \\ \cos(\omega t) - j \operatorname{sen}(\omega t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

Usando a Transformação da Equação 5, obtemos:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{0\alpha\beta} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -j & j \end{bmatrix} V \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\omega t) + j \operatorname{sen}(\omega t) \\ \cos(\omega t) - j \operatorname{sen}(\omega t) \end{bmatrix} \\ &= V \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\omega t) \\ \operatorname{sen}(\omega t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

Para facilitar, a TC é dada por:

$$\mathbf{T}_K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -j & j \end{bmatrix} \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & \alpha + \alpha^2 & \alpha^2 + \alpha \\ 0 & -j(\alpha - \alpha^2) & +j(\alpha^2 - \alpha) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

APÊNDICE B – DEDUÇÃO DA AMPLITUDE INVARIANTE E POTÊNCIA INVARIANTE DE CLARKE

Em cada instante de tempo, as tensões em $\alpha\beta$ possuem um valor definido por suas equações. O que desejamos é definir uma forma que essas tensões estejam referidas às tensões de V_{abc} . Pela Equação B1.1-1.3 vemos a relação entre $0\alpha\beta$ e abc .

$$v_0 = \frac{K}{3}(v_a + v_b + v_c) \quad (\text{B1.1})$$

$$v_\alpha = \frac{K}{3}(2v_a - v_b - v_c) \quad (\text{B1.2})$$

$$v_\beta = \frac{K}{3}(\sqrt{3}v_b - \sqrt{3}v_c) \quad (\text{B1.3})$$

O objetivo é então encontrar uma constante K que torne o valor máximo dos eixos α e β iguais ao valor máximo dos eixos abc . Supondo um sistema de tensão trifásico equilibrado, podemos escrever a Equação B2 como:

$$V_\alpha = v_a \cos(\omega t) = \frac{K}{3} \left[2V \cos(\omega t) + V \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + V \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{B2})$$

No instante $t = 0$, obtemos:

$$\begin{aligned} v_a &= \frac{VK}{3} \left[2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right] \\ v_a &= VK \end{aligned} \quad (\text{B3})$$

Assim vemos que para manter a magnitude da tensão constante, K deve ser igual a 1. Usualmente, é encontrado na literatura a matriz da TC igual à Equação B4, porém é somente uma manipulação desnecessária.

$$\mathbf{T}_{K-AI} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{B4})$$

Para definir a Potência Invariante, deve encontrar uma constante tal que mantenha o valor das potências em abc e $\alpha\beta 0$ iguais, em outras palavras:

$$\mathbf{P}_{abc} = \mathbf{P}_{0\alpha\beta} \quad (\text{B5})$$

Sabemos que a potência de um sistema trifásico é dada em sua forma matricial por:

$$\mathbf{P}_{abc} = [\mathbf{V}_{abc}]^T \mathbf{I}_{abc} = [v_a \quad v_b \quad v_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{B6})$$

Também sabemos que:

$$\lambda_{abc} = [\mathbf{T}_K]^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 \\ 2 & -1 & \sqrt{3} \\ 2 & -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{B7})$$

Usando a Equação B6 em B5 e usando a igualdade de B4, encontramos:

$$\begin{aligned} [v_a \quad v_b \quad v_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} &= \left([\mathbf{T}_K]^{-1} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \right)^T [\mathbf{T}_K]^{-1} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ &= \left(\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 \\ 2 & -1 & \sqrt{3} \\ 2 & -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \right)^T \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 \\ 2 & -1 & \sqrt{3} \\ 2 & -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2v_0 + 2v_\alpha \\ 2v_0 - v_\alpha + \sqrt{3}v_\beta \\ 2v_0 - v_\alpha - \sqrt{3}v_\beta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 2i_0 + 2i_\alpha \\ 2i_0 - i_\alpha + \sqrt{3}i_\beta \\ 2i_0 - i_\alpha - \sqrt{3}i_\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B8})$$

Depois de algumas manipulações algébricas em B8, encontramos:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{2}v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sqrt{2}i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}^T \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{B9})$$

O objetivo agora é encontrar uma TC tal que $\mathbf{V}_{abc} = [\mathbf{T}_k]^{-1} \mathbf{V}_{0\alpha\beta}$. Analisando a Equação B9 temos que: As componentes abc são $\sqrt{3}/\sqrt{2}$ maiores que as componentes $0\alpha\beta$; A coordenada zero está multiplicada por $\sqrt{2}$. Para integrar essa modificação, a TC deve ser:

$$\lambda_{0\alpha\beta} = \mathbf{T}_{K-PI} \lambda_{abc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \lambda_{abc} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{B9})$$

APÊNDICE C – RESULTADO DA APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE PARK EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Usando a Equação 10 em 2 obtemos as relações apresentadas nas Equações C1.1-1.3. Supondo que θ é igual à ωt para qualquer instante de tempo então podemos reescrever as Equações C1.1-1.3 em C2.1-2.3.

$$\lambda_d = \frac{2M}{3} \left[\cos(\theta) \cos(\omega t) + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{C1.1})$$

$$\lambda_q = \frac{2M}{3} \left[\sin(\theta) \cos(\omega t) + \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{C1.2})$$

$$\lambda_0 = \frac{M}{3} \left[\cos(\omega t) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{C1.3})$$

$$\lambda_d = \frac{2M}{3} \left[\cos^2(\omega t) + \cos^2\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos^2\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{C2.1})$$

$$\begin{aligned} \lambda_q &= \frac{2M}{3} \left[\sin(\omega t) \cos(\omega t) + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right. \\ &\quad \left. + \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (\text{C2.2})$$

$$\lambda_0 = \frac{M}{3} \left[\cos(\omega t) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (C2.3)$$

Lembrando das relações trigonométricas:

$$\cos^2(a) = \frac{1 + \cos(2a)}{2}$$

$$\text{sen}(a) \cos(a) = \frac{\text{sen}(2a)}{2}$$

$$\text{sen}^2(a) = \frac{1 - \cos(2a)}{2}$$

Assim, reescrevemos as Equações C2.1-2.2 em C3.1-3.2. Além disso, como o sistema é equilibrado o resultado de C2.3 é nulo para qualquer instante, assim:

$$\lambda_d = \frac{M}{3} \left[1 + \cos(2\omega t) + 1 + \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + 1 + \cos\left(2\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (C3.1)$$

$$\lambda_q = \frac{M}{3} \left[\text{sen}(2\omega t) + \text{sen}\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \text{sen}\left(2\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (C3.2)$$

$$\lambda_0 = 0 \quad (C3.3)$$

Como o sistema é equilibrado a soma dos senos e cossenos é nulo o que nos leva ao sistema descrito na Equação C4.

$$\lambda_{dq0} = \begin{bmatrix} M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C4)$$

Para o caso de sistemas trifásicos não equilibrados em fase e amplitude, utiliza a Equação 1 em 10 utilizando a fase a como referência. O resultado é o sistema de Equações apresentados em C5.1-5.3. Inicialmente é necessário isolar.

$$\lambda_d = \frac{2}{3} \left[\cos(\omega t) M_a \cos(\omega t) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) M_b \cos(\omega t + \phi_b) + \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) M_c \cos(\omega t + \phi_c) \right] \quad (C5.1)$$

$$\lambda_q = \frac{2}{3} \left[\text{sen}(\omega t) M_a \cos(\omega t) + \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) M_b \cos(\omega t + \phi_b) + \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) M_c \cos(\omega t + \phi_c) \right] \quad (C5.2)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{3} [M_a \cos(\omega t) + M_b \cos(\omega t + \phi_b) + M_c \cos(\omega t + \phi_c)] \quad (C5.3)$$

Analisando inicialmente λ_d , podemos dividi-lo em três termos da seguinte maneira:

$$\lambda_d = \frac{2}{3} [t_{d1} + t_{d2} + t_{d3}]$$

Onde:

$$t_{d1} = M_a \cos^2(\omega t)$$

$$\begin{aligned} t_{d2} &= M_b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\omega t + \phi_b) \\ &= M_b \left[-\frac{1}{2} \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{sen}(\omega t) \right] [K_{bc} \cos(\omega t) - K_{bs} \text{sen}(\omega t)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{d3} &= M_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\omega t + \phi_c) \\
&= M_c \left[-\frac{1}{2} \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t) \right] [K_{cc} \cos(\omega t) - K_{cs} \sin(\omega t)]
\end{aligned}$$

Onde K_{bc} , K_{bs} , K_{cc} , K_{cs} são constantes referentes aos cossenos e senos dos ângulos ϕ_b e ϕ_c , respectivamente. Após uma manipulação em t_{d1} , t_{d2} e t_{d3} , encontra:

$$\begin{aligned}
t_{d1} &= \frac{M_a}{2} [1 + \cos(2\omega t)] \\
t_{d2} &= \frac{M_b}{4} [-K_{bc} - \sqrt{3}K_{bs} + \cos(2\omega t)(\sqrt{3}K_{bs} - K_{bc}) - \sin(2\omega t)(K_{bs} + \sqrt{3}K_{bc})] \\
t_{d3} &= \frac{M_c}{4} [-K_{cc} + \sqrt{3}K_{cs} - \cos(2\omega t)(K_{cc} + \sqrt{3}K_{cs}) + \sin(2\omega t)(K_{cs} - \sqrt{3}K_{cc})]
\end{aligned}$$

A mesma análise é feita para λ_q resultando em:

$$\begin{aligned}
t_{q1} &= \frac{M_a}{2} \sin(2\omega t) \\
t_{q2} &= \frac{M_b}{4} [K_{bs} - \sqrt{3}K_{bc} - \cos(2\omega t)(K_{bs} + \sqrt{3}K_{bc}) + \sin(2\omega t)(\sqrt{3}K_{bs} - K_{bc})] \\
t_{q3} &= \frac{M_c}{4} [K_{cs} + \sqrt{3}K_{cc} + \cos(2\omega t)(\sqrt{3}K_{cc} - K_{cs}) - \sin(2\omega t)(\sqrt{3}K_{cs} + K_{cc})]
\end{aligned}$$

Com os termos $t_{dx}, t_{qx} | x = \{1,2,3\}$ definidos, agora vejamos o que ocorre em casos de equilíbrio de fase, ou seja $\phi_b = -2\pi/3$ e $\phi_c = 2\pi/3$, o que nos leva a:

$$K_{bc} = K_{cc} = -\frac{1}{2}; -K_{bs} = K_{cs} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Usando esses valores, os termos $t_{dx}, t_{qx} | x = \{1,2,3\}$ se tornam:

$$\begin{aligned}
t_{d1} &= \frac{M_a}{2} [1 + \cos(2\omega t)] \\
t_{d2} &= \frac{M_b}{4} [2 - \cos(2\omega t) - \sqrt{3} \sin(2\omega t)] \\
t_{d3} &= \frac{M_c}{4} [2 - \cos(2\omega t) + \sqrt{3} \sin(2\omega t)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{q1} &= \frac{M_a}{2} \sin(2\omega t) \\
t_{q2} &= \frac{M_b}{4} [\sqrt{3} \cos(2\omega t) - \sin(2\omega t)] \\
t_{q3} &= \frac{M_c}{4} [-\sqrt{3} \cos(2\omega t) - \sin(2\omega t)]
\end{aligned}$$

Assim um sistema $dq0$ desequilibrado somente em amplitude é dado pela Equação C6. Para verificar a veracidade do resultado, basta fazer $M_a = M_b = M_c$, o que leva à Equação C4.

$$\lambda_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{M_a + M_b + M_c}{2} + \cos(2\omega t) \left(\frac{2M_a - M_b - M_c}{4} \right) + \sin(2\omega t) \left(\frac{\sqrt{3}M_c - \sqrt{3}M_b}{4} \right) \\ \sin(2\omega t) \left(\frac{2M_a - M_b - M_c}{4} \right) + \cos(2\omega t) \left(\frac{\sqrt{3}M_b - \sqrt{3}M_c}{4} \right) \\ \frac{M_a}{2} \cos(\omega t) + \frac{M_b}{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{M_c}{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (C6)$$

REFERÊNCIAS

- [1] ABSolar. Infográfico Absolar. Disponível online: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>. Acesso em: 10/10/2020
- [2] EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. Disponível online: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2020_sp.pdf. Acesso em: 10/10/2020
- [3] ONS. Capacidade instalada no SIN – 2020/2024. Disponível online: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 10/10/2020
- [4] Fortescue, C.L. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. *AIEE Trans.* 1918. Vol. 37, p. 1027-1140.
- [5] Clarke, E. Determination of voltages and currents during unbalanced faults. *General Electric Review* 1937, Vol. 40, p. 511-513.
- [6] Park, R.H. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines – Generalized Method of Analysis Part I. *AIEE Trans.* 1929. Vol. 48, p. 716-727.
- [7] Stanley, H.C. An Analysis of the Induction Motor. *AIEE Trans.*, 1938, Vol. 57, p. 751-755.
- [8] Kron, G. The Transformation of Reference Frames. Em *Equivalent Circuits of Electric Machinery*. John Wiley & Sons, Nova York, 1951.
- [9] Breerton, D.S. Lewis, D.G. Young, C.G. Representation of Induction Motor Loads During Power System Stability Studies. *AIEE Trans.* 1957. Vol. 76, p. 451-461.
- [10] Krause, P.C. Thomas, C.H. Simulation of Symmetrical Induction Machinery. *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* 1965. Vol. 84, p. 1038-1053.
- [11] Krause, P. Wasynczuk, O. Sudhoff, S. Pekarek, S. Reference-Frame Theory. Em *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. 3ª ed.; Anderson, J. IEEE Press, Nova Jersey, 2013.
- [12] Pigazo, A. Moreno, V. Estebáñez, E. A Recursive Park Transformation to Improve the Performance of Synchronous Reference Frame Controllers in Shunt Active Power Filters. *IEEE Trans. Power Electronics* 2009. Vol. 24, p. 2065-2075.
- [13] Zhan, L. Liu, Y. Liu, Y. A Clarke Transformation-based DFT Phasor and Frequency Algorithm for Wide Frequency Range. *IEEE Trans. on Smart Grid* 2018. Vol. 9, p. 67-77.
- [14] Riyadi, S. Inverse Clarke Transformation based Control Method of a Three-Phase Inverter for PV-Grid Systems. Em 2014 1st International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering, Semarang, Indonésia, 8 nov. 2014.
- [15] Tavares, M.C. Pissolato, J. Portela, C.M. New Mode-Domain Representation of Transmission Line – Clarke Transformation Analysis. Em 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Montrey, California, EUA, 31 mai. – 3 jun. 1998.
- [16] Prado, A.J. Pissolato Filho, J. Kurokawa, S. Bovolato, L.F. Corrected Transformation Matrices from Clarke's Matrix – Assymetrical Three-phase Lines Applications. Em 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Quebec, Canadá, 18-22 jun. 2006.
- [17] Spanias, C. Lestas, I. A System Reference Frame Approach for Stability Analysis and Control of Power Grids. *IEEE Trans. on Power Systems* 2019. Vol. 34, p. 1105-1115.
- [18] O'rourke, C.J. Qasim, M.M, Overlin, M.R., Kirtley, J.L. A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park. *IEEE Trans. on Energy Conversion* 2019. Vol. 34, p. 2070-2083.



Artigo

Estudo sobre a reciclagem de fluidos de corte aplicados no processo de torneamento por um filtro confeccionado com materiais de fácil acesso

Samuel de Lima Menezes ^[1] e Ramsés Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Ufersa; samuel_menezes2008@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Ufersa; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Recebido: 31/10/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: Durante as operações de usinagem, o atrito entre a ferramenta e a peça gera calor, levando ao desgaste ou perda de propriedades da ferramenta de corte, além de distorções na peça usinada. Para resfriar e lubrificar as operações de usinagem, são aplicados fluidos de corte, os quais, quando descartados de maneira inadequada, podem gerar danos ao meio ambiente. Esta pesquisa tem como objetivo estudar a possibilidade de reciclagem, por filtração a partir de aparato simples, de dois tipos de fluidos de corte aplicados em processos de torneamento. Além disso, avaliar se estes fluidos filtrados mantêm suas propriedades de maneira a permanecerem aptos a serem novamente aplicados, minimizando a necessidade de descarte dos mesmos. Para tanto, os fluidos de corte utilizados foram coletados por um recipiente acoplado ao torno, filtrados por um aparelho confeccionado com materiais de fácil acesso e submetidos a análises físico-químicas. Análises da rugosidade das peças usinadas com fluidos de corte novos e reciclados também foram realizadas. Os resultados relativos aos fluidos novo e utilizados, após a filtração, foram comparados. Verificou-se que os fluidos reciclados tiveram um bom desempenho, podendo ser reciclados sem gerar perdas ao processo, mas levando em consideração algumas condições, como o tempo de reaproveitamento.

Palavras-chave: fluido de corte; reciclagem; filtração; análises físico-químicas; rugosidade.

Abstract: During machining operations, friction between the tool and the workpiece generates heat, leading to wear or loss of cutting tool properties, as well as distortions in the machined workpiece. To cool and lubricate machining operations, cutting fluids are applied, which, when improperly disposed of, can generate damage to the environment. This research aims to study the possibility of recycling, by filtration from simple apparatus, two types of cutting fluids applied in turning processes. In addition, to evaluate whether these filtered fluids maintain their properties so that they remain able to be applied again, minimizing the need to dispose of them. For this purpose, the cutting fluids used were collected by a container attached to the lathe, filtered by a device made with easily accessible materials and subjected to physical-chemical analysis. Analyzes of the roughness of the parts machined with new and recycled cutting fluids were also carried out. The results for new and used fluids, after filtration, were compared. It was found that the recycled fluids performed well, being able to be recycled without generating losses to the process, but taking into account some conditions, such as the time of reuse.

Key-words: cutting fluid; recycling; filtration; physicochemical analysis; roughness.

1. INTRODUÇÃO

Durante o processo de usinagem, uma quantidade considerável da energia da máquina é transformada em calor através da deformação plástica da superfície da peça, do atrito do cavaco na face da ferramenta e do atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho [1]. A literatura clássica [2] sugere que 99% do trabalho feito na usinagem

é convertido em calor. Isso aumenta as temperaturas da ferramenta e da peça. Além disso, foi demonstrado que a integridade da superfície usinada e a precisão dimensional atingida são diretamente afetadas pela temperatura de corte [1].

Nos processos de formação de cavacos, as duas funções principais dos fluidos de corte são resfriamento e lubrificação. Uma vez que as temperaturas na zona de corte têm uma grande influência na dureza da ferramenta e na difusão da fase sólida, o resfriamento da ferramenta pode produzir melhorias significativas na vida útil da ferramenta [3]. Um segundo ponto em que o resfriamento auxilia o processo é em manter as tolerâncias dentro de limites adequados, reduzindo a dilatação térmica da ferramenta, da peça e de partes da máquina. O resfriamento também produz uma mudança na formação de aresta postiça de corte (APC) para velocidades mais altas, o que melhora o acabamento da superfície, conforme já apontado em diversas literaturas [2,4,5]. A lubrificação no corte ocorre na superfície de saída, por meio da formação de um filme na interface cavaco-ferramenta, o que reduz a superfície de contato e o coeficiente de atrito aparente. Como resultado, a lubrificação da superfície de saída promove uma diminuição da compressão dos cavacos, formação da APC, bem como rugosidade da superfície, forças de corte e consumo de energia [2,4]. Além disso, os fluidos de corte também têm algumas funções secundárias, tais como transporte de cavacos e resíduos sólidos da zona de corte, protegendo a peça de trabalho contra corrosão e limpando a ferramenta e a peça de trabalho.

Os fluidos de corte têm sido, cada vez mais, apontados [6,7] como um acessório nos processos de usinagem para aumentar a produtividade. Em termos de desempenho, aumenta efetivamente a vida útil da ferramenta, produzindo um melhor controle dimensional e boa qualidade superficial. Um bom acabamento é desejado não apenas pelo apelo estético de um produto, mas também para melhorar as propriedades tribológicas, resistência à fadiga e resistência à corrosão. Assim, a qualidade da superfície é extremamente importante na avaliação da produtividade de máquinas-ferramenta e peças mecânicas [8]. Estudos das últimas décadas [7,9], mostram que a quantidade de lubrificantes usados na usinagem foi reportada em cerca de 38 Mt com um aumento estimado de 1,2% nas décadas futuras. Aproximadamente 85% dos fluidos de corte usados em todo o mundo são fluidos de corte de base mineral, sendo a maior demanda entre os outros. No entanto, os impactos dos fluidos de corte na saúde e no meio ambiente têm sido questionados. Devido ao amplo uso de fluidos de corte de base mineral, eles causam poluição ambiental significativa ao longo de seu ciclo de vida.

É amplamente reconhecido que o efeito dos fluidos de corte no meio ambiente, particularmente no que diz respeito à sua degradação e descarte final, é um grande problema. Devido ao efeito tóxico dos fluidos de corte, os fatores ambientais associados à usinagem tornam-se um aspecto problemático emergente nas últimas décadas [9]. Foi relatado [10] que cerca de 80% de todas as infecções ocupacionais dos operadores foram devido ao contato da pele com fluidos de corte. Isso porque a complexidade na composição dos fluidos de corte pode ser irritante ou alergênica, mesmo que as matérias-primas sejam seguras. Devido a essas substâncias perigosas, os fluidos de corte tóxicos e de menor biodegradabilidade causam muitos problemas tecno-ambientais e graves problemas de saúde como câncer de pulmão, doenças respiratórias, doenças dermatológicas e genéticas [11].

Para evitar ameaças, tanto à saúde do operador quanto às agressões ao meio ambiente, uma vez atingido o limite de degradação do desempenho, o fluido de corte pode ser reciclado ou descartado. Os processos de reciclagem envolvem a separação de contaminantes sólidos e líquidos do fluido de corte e a remistura do fluido reciclado com o novo. O sistema de reciclagem a ser usado depende de vários fatores, como o tamanho da oficina mecânica, o número de máquinas-ferramentas, a variedade de diferentes processos, etc. De acordo com a literatura [3], existem três tipos diferentes de sistemas de remoção de contaminantes: reciclagem centralizada de fluidos, sistemas auto-contidos e unidades de fornecimento individuais. Em um sistema centralizado, as ferramentas da máquina são conectadas através de um circuito de fluido comum a um reservatório central. Os sistemas independentes localizam o reservatório e a unidade de reciclagem em cada máquina-ferramenta individual. As unidades de abastecimento individuais são um híbrido dos dois primeiros métodos, com reservatórios separados para a máquina-ferramenta, uma unidade portátil de remoção e reabastecimento de fluido e uma unidade central de reciclagem.

A reciclagem de fluidos de corte pode resolver problemas de eliminação de resíduos, reduzir custos e aliviar problemas de poluição. Um sistema de circuito fechado para a reciclagem do fluido de corte terá algumas perdas, mas uma recuperação de 90% pode ser alcançada [12]. A literatura [7,13,14] destaca várias formas de realizar o processo de reciclagem do fluido de corte, esses processos podem ser separados em físicos; químico; biológico; separação magnética; separação centrífuga e separação por membrana. Dentre estes, um dos mais comumente aplicados é o processo de separação por membrana devido à sua maior simplicidade de aplicação, cuja filtração é

um exemplo clássico [13]. Em estudo sobre a separação da fase sólida e da fase líquida do carboneto de silício e do silício [15], alguns métodos aplicados para esse fim foram o processo de centrifugação, separação por transferência de fase e extração líquido-líquido seguida da regeneração do polietilenoglicol pelo processo de destilação. Foi verificado experimentalmente que o micropó de silício e carboneto de silício pode ser efetivamente separado por separação por transferência de fase, centrifugação, limpeza química, filtração e destilação. Algumas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de promover o reaproveitamento do fluido de corte utilizado nas operações de usinagem para reduzir a quantidade de material descartado e, dessa forma, a agressão ao meio ambiente.

De acordo com outro estudo [16], a principal diferença entre a filtração convencional e a filtração por membrana é que os filtros convencionais operam capturando partículas dentro de uma matriz de filtro, e os filtros não podem ser regenerados após o uso. Portanto, ao invés de entupimento do filtro com contaminantes, a principal limitação para altas taxas de filtração na microfiltração e ultra filtração é a interação físico-química dos ingredientes dos fluidos de usinagem com a superfície da membrana [17]. Em estudo aplicando a separação por membranas [18], objetivou caracterizar a filtração de emulsões que possuem um teor relativamente alto de fase dispersa (30% O/W), utilizando membranas tubulares de cerâmica hidrofílica ou hidrofóbica com diferentes tamanhos médios de poro, e também estudou o efeito de diferentes parâmetros na emulsão filtração. Foi observado que o tamanho médio da gota e a viscosidade da emulsão a ser filtrada podem mudar drasticamente com a pressão e as forças de cisalhamento durante um período de transição.

Os processos de filtração por membrana, embora desafiadores, provaram ser capazes de restaurar os fluidos de corte à condição de "bons como novos" e reduzir os impactos ambientais do ciclo de vida. Por exemplo, a pesquisa demonstrou a viabilidade técnica do uso de membranas de microfiltração de cerâmica para complementar ou substituir biocidas e outras tecnologias de tratamento como um meio de controlar a contaminação e criar fluidos de usinagem reciclados indistinguíveis de novos [19]. Em outra pesquisa [20], realizou-se uma comparação entre os módulos de membrana cerâmica e polimérica para soluções modelo (soluções de fluido hidráulico em meios ácidos e alcalinos). Como uma descoberta geral, o fluxo diminui com o teor de óleo. O valor do pH parece desempenhar um papel na permeabilidade. Na solução a 1%, a maior permeabilidade foi obtida em pH 5, enquanto o maior fluxo em 4% foi obtido em pH 9. Esses resultados são confirmados por estudo posterior [21], que mostrou que quanto menor o ajuste de pH, mais lama de partículas precipitadas do fluido de corte residual, resultando simultaneamente em maior aderência nos cristais de gelo. A permeabilidade foi ligeiramente inferior à da membrana cerâmica. Além disso, pode-se observar que os tamanhos de partícula foram maiores no meio alcalino porque reduz a densidade de carga negativa na superfície de uma gota de óleo, devido à alta força iônica, diminui o módulo de elasticidade interfacial óleo-água e a viscosidade, promovendo a coalescência da gota de óleo.

Porém, por mais que avancem as pesquisas no sentido de se obter a melhor forma de realizar o processo de reciclagem de fluidos de corte, às vezes estes não podem ser aplicados em pequenas empresas e oficinas, seja no custo de implantação, seja pela complexidade de manutenção ou mesmo pela falta de conhecimento dos gestores e operadores destes estabelecimentos. Portanto, esta pesquisa tem como objetivo estudar a viabilidade de se realizar o reaproveitamento de fluidos aplicados em usinagens por meio de um processo de filtração simples, utilizando materiais de fácil acesso e baixo custo, que podem ser reproduzidos em oficinas menores para reduzir seus custos e preservar o meio ambiente, reduzindo a frequência de descarte. Para tanto, foram selecionados dois tipos de fluidos de corte normalmente utilizados, estes foram aplicados no processo de torneamento e coletados para proceder a sua filtração e, posteriormente, análises químicas e físicas. Os fluidos filtrados também foram testados mantendo os mesmos parâmetros para verificar a influência na qualidade da peça usinada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico tem como objetivo descrever os materiais utilizados ao longo da fase experimental desta pesquisa, bem como os procedimentos utilizados, as técnicas, os parâmetros definidos e todo o planejamento para a sua execução.

2.1. Materiais aplicados

Os materiais utilizados como corpo de prova foram dois tarugos de aço trefilados SAE 1020 com dimensões de 30 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento cada.

Foram utilizados dois tipos de fluido de corte, um classificado como óleo mineral e outro classificado como óleo de emulsão aquosa. Para o primeiro caso, o óleo utilizado foi UNIMAX SAE 10W, produzido pela INGRAX. É um óleo lubrificante recomendado para motores a diesel de alta velocidade para serviços pesados. Este fluido tem como principal aplicação em sistemas hidráulicos e caixa de engrenagens, porém, também é comumente utilizado como óleo lubrificante para operações de usinagem em muitas pequenas oficinas. Para o segundo caso, foi utilizado óleo de emulsão de água LUBRAX UTILE PE. É um óleo de emulsão de base naftênica para corte, usinagem e acabamento de metais. Sua mistura com água, na proporção de 1:20, ou seja, 5% de óleo do total da emulsão, forma emulsões leitosas, homogêneas e estáveis de cor branca. Possui baixa tendência à formação de espuma e seu aditivo evita a corrosão das peças metálicas usinadas.

A usinagem foi realizada em um torno universal Nardini, modelo Nodus 220 Gold. As ferramentas de corte utilizadas para realizar o processo de usinagem foram as pastilhas de metal duro ISCAR, modelo TNMG 160408 - TF IC 908. Estas foram fixadas na máquina-ferramenta usando um porta-ferramentas MT JNR 2020 K16. Para a fabricação do filtro de baixo custo, foram utilizados materiais de fácil acesso, como garrafa PET de 2 litros, algodão e seixo (pedra bruta para aquário).

2.2. Procedimento experimental

Os ensaios de usinagem ocorreram com operações de desbaste longitudinal externo, para tanto, os parâmetros de corte foram aplicados dentro da faixa recomendada pelo fabricante, ou seja: $V_c = 140$ m/min; $f = 0,042$ mm/rev; e $a_p = 1,50$ mm. É importante ressaltar que os parâmetros de corte adotados foram os mesmos para usinagem com dois tipos de fluidos testados, bem como a quantidade de passes de desbaste aplicados em cada peça.

O método de aplicação dos fluidos de corte durante os ensaios de usinagem foi realizado por jato de baixa pressão, com vazão de 125 ml/min. No primeiro momento, foram utilizados 1000 ml de óleo mineral UNIMAX SAE 10W. Em uma segunda etapa, foram utilizados 1000 ml da emulsão, ou seja, 50 ml do óleo de emulsão LUBRAX UTILE PE e 950 ml de água.

A captação do fluido de corte aplicado ocorreu com o auxílio de um recipiente plástico (polipropileno) acoplado ao torno, localizado abaixo da placa castanha que segura a peça, conforme mostrado na Figura 1. Assim, por gravidade, o fluido aplicado no corte zona tendia a cair no recipiente de plástico.



FIGURA 1. Posicionamento do recipiente de plástico acoplado à estrutura do torno em relação à peça de trabalho e à ferramenta de corte.

O fluido coletado passou por um processo de filtração para separar os resíduos sólidos nele contidos. Para ambos os fluidos, o processo de filtração foi o mesmo, porém, para o óleo mineral, antes da filtração foi aplicada a etapa de decantação, na qual o fluido permaneceu em repouso por três dias. Este procedimento adicional foi realizado de modo que as partículas metálicas fossem depositadas no fundo do recipiente por gravidade, para diminuir suas impurezas antes de serem filtradas. Para a fabricação do filtro, a garrafa PET foi cortada ao meio, o gargalo serviu de funil, no qual foi adicionada uma camada de algodão e, acima delas, as pedras, conforme indicado no diagrama esquemático apresentado na Figura 2. O fundo da garrafa serviu de recipiente para a coleta do fluido do corte filtrado.

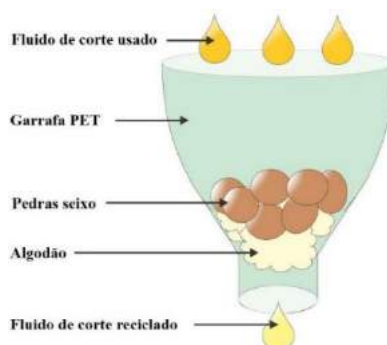


FIGURA 2. Diagrama esquemático do mesmo, identificando os materiais utilizados, bem como a trajetória do fluido utilizado, coletado durante o processo de filtração.

Após a filtração, os fluidos de corte foram armazenados em diferentes recipientes. Parte dessas foi conduzida para análises químicas e físicas em laboratório e a outra parte foi reservada para uso em testes de usinagem com fluido de corte reciclado. A Tabela 1 apresenta um resumo das condições das amostras de fluido de corte.

TABELA 1. Condições de amostras de fluido de corte.

<i>Condição da amostra</i>	<i>Descrição do fluido de corte</i>
MN	Óleo mineral novo
MR	Óleo mineral reciclado
EN	Óleo emulsionável novo
ER	Óleo emulsionável reciclado

2.3. Análises físico-químicas

O pH foi medido com o auxílio de um pHmetro de bancada, PHMETER JK-PHM-005, calibrado com soluções padrão de pH 4 e pH 7.

Para a verificação da massa específica, foi utilizada a técnica de picnometria, que consiste na medição do peso de um recipiente, com volume conhecido, no qual esse volume é calibrado de acordo com o peso da água pura no mesmo recipiente. Picnômetros têm baixo coeficiente de expansão, geralmente 50 ml de volume e boa precisão.

Para a determinação de água e sedimento, utilizou-se 10 ml da amostra em tubo de escala graduada de até 0,1 ml, que é centrifugado em tubo microprocessado centrífugo a 700 RPM, por 10 min, verificando assim o volume de água e sedimento precipitado.

A verificação da qualidade superficial da peça usinada na utilização de fluidos novos e reciclados também foi realizada por meio da medição da rugosidade média (R_a). Para isso, foi utilizado um rugosímetro SJ-201 Mitutoyo. Este possui uma faixa de medição máxima de 360 μm (-200 μm a + 160 μm) e curso de medição de 4 mm a uma velocidade de 0,5 mm/s. O parâmetro de rugosidade média R_a foi escolhido entre os demais, por ser o parâmetro mais utilizado na indústria e bem representar o perfil de rugosidade média de superfícies usinadas que possuem ranhuras de usinagem bem orientadas como no torneamento. Além disso, seu valor médio funciona como um parâmetro contínuo e menos sujeito a interferências de efeitos ocasionais. Seis medidas de rugosidade foram feitas na superfície de cada peça. Destes, o maior valor de rugosidade foi descartado e os outros cinco foram utilizados para avaliação dos resultados.

3. RESULTADOS

Neste tópico, os resultados das análises físico-químicas dos fluidos testados serão apresentados, comparados e discutidos. Além disso, os valores médios de rugosidade das peças usinadas serão comparados com os fluidos novos e reciclados e discutir a influência da condição do fluido de corte no acabamento destas.

3.1. Coleta e reciclagem dos fluidos de corte

O volume do fluido de corte coletado pelo recipiente foi de 350 ml, cerca de um terço, do volume total aplicado na operação de usinagem. O restante do volume total foi desperdiçado devido a alguns fatores, tais como: com o movimento de rotação da peça, o fluido mudou sua trajetória e foi liberado tangencialmente, essa porção do fluido não foi capturada; devido ao comprimento da peça, as primeiras porções do fluido aplicado no início do processo, ao escoar, caem no coletor.

Devido à ocorrência desses fatores de influência, o volume de fluido coletado para filtração não foi tão alto quanto o esperado, o que influenciou na quantidade de fluido reciclado. Porém, por mais que seja praticamente impossível obter um reaproveitamento de 100%, o sistema de captação pode ser aprimorado com um aparelho que possa coletar um volume maior de fluido levando em consideração as limitações geométricas do torno, mesmo para peças com comprimentos maiores.

3.2. Análise visual dos fluidos filtrados

A Figura 3, apresenta a fotografia do filtro aplicado nos ensaios, após o a conclusão de sua fabricação.



FIGURA 3. Fotografia do filtro confeccionado a partir de materiais de fácil acesso.

Após a filtragem dos fluidos coletados, constatou-se que várias partículas metálicas permaneceram depositadas no fundo do recipiente (Figura 4), o que comprova que a decantação prévia, embora seja uma técnica simples, foi eficaz na separação desses fragmentos. O período de repouso do líquido foi de três dias. Não foi necessário submeter a emulsão à decantação antes da filtração, pois sua viscosidade era muito inferior à do óleo mineral. Assim, para este caso, a filtração foi suficiente.



FIGURA 4. Fotografia do recipiente utilizado no processo de filtração, contendo deposição das partículas metálicas ao fundo como resultado do processo de decantação.

No caso da filtração do óleo mineral, devido à sua viscosidade, a filtração não era instantânea, devendo permanecer em repouso por 12 horas para que todo o fluido fosse completamente filtrado. Ainda assim, embora não tenha sido filtrado por várias camadas de materiais, o resultado final foi satisfatório, não apresentando visualmente nenhum tipo de impureza no interior do óleo. Nesse sistema de filtragem, o principal componente é o algodão, pois é responsável por evitar que partículas sólidas passem junto com o fluido. A avaliação das

condições do algodão ao final do processo é a prova de que a filtração foi realmente eficaz, conforme mostrado na Figura 5.

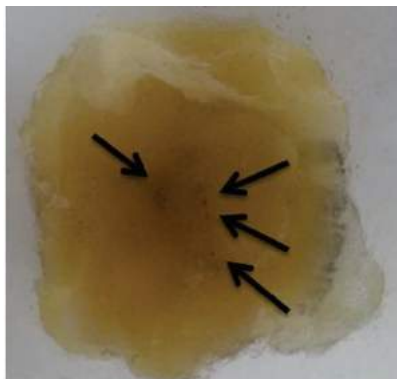


FIGURA 5. Fotografia do algodão após o processo de filtração do óleo mineral. As setas indicam as partículas sólidas, provenientes da operação de usinagem, retidas durante o processo.

Vários pontos escuros são observados em toda a área do algodão, que são as impurezas filtradas. A filtração da emulsão foi instantânea porque sua viscosidade, por ser próxima à da água, permite que esse fluido escoe facilmente pelo algodão. Da mesma forma, foi possível analisar o algodão (Figura 6) e afirmar que a filtração foi eficiente devido à quantidade de partículas retidas nele. Esses resultados estão de acordo com o que foi observado em pesquisas anteriores [3,7].



FIGURA 6. Fotografia do algodão após o processo de filtração do óleo de emulsão. As setas indicam as partículas sólidas, provenientes da operação de usinagem, retidas durante o processo.

Para obter evidências com maior grau de confiabilidade quanto à eficiência do filtro, foi realizada uma análise de água e sedimentos, cujos resultados serão apresentados no tópico 3.3.3.

3.3. Análises físico-químicas

3.3.1. Análise de pH

Os valores de pH obtidos para os fluidos analisados, novos e após filtração, são mostrados na Tabela 2.

TABELA 2. Resultados para análise de pH dos fluidos novos e após filtração.

<i>Condição do fluido / pH</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
MN	5.46	5.39	5.35	5.40	0.056
MR	6.05	5.97	5.99	6.00	0.042
EN	7.75	7.74	7.71	7.73	0.021
ER	7.25	7.22	7.18	7.22	0.035

Conforme demonstrado na Tabela 2, observa-se que os fluidos, mesmo após o primeiro uso e, posteriormente, a reciclagem, do processo de filtração, permaneceram dentro de suas características. Os óleos minerais mantiveram características ligeiramente ácidas (pH logo abaixo de 7), enquanto as emulsões mantiveram suas características levemente alcalinas (pH logo acima de 7). Esse comportamento está de acordo com o observado em pesquisas anteriores [15,20,21]. Houve pouca variação entre os valores de pH de fluidos de corte novos e usados, o que ocorreu, em parte, devido ao ataque de microbactérias, principalmente no período em que os fluidos estavam em repouso. Isso compreendeu desde o dia da coleta, filtragem, até a realização das análises, totalizando sete dias. Além disso, devido a esse período de descanso, observou-se uma mudança na cor da emulsão (água + óleo), de esbranquiçada para amarelada, conforme mostrado na Figura 7. Porém, mesmo assim, a dispersão encontrada foi bastante baixa, o que confirma o comportamento homogêneo das amostras estudadas.

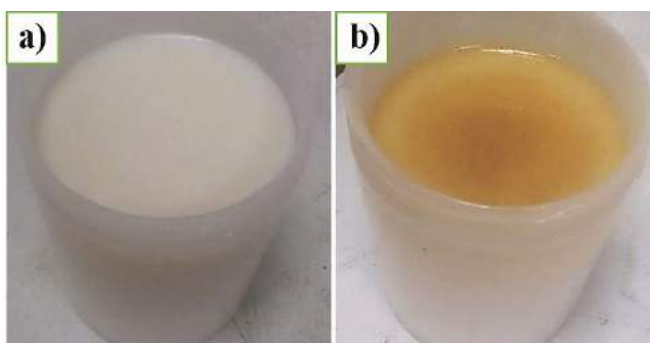


FIGURA 7. Fotografia com registro de amostras de fluido de corte emulsionável a) recém filtradas e b) sete dias após a filtração.

O tamanho das gotículas de óleo suspensas na fase contínua governa o aparecimento da emulsão, gotículas de óleo menores na emulsão tendem a ter maior bioestabilidade; entretanto, as emulsões com gotas maiores de óleo (como emulsões de cor branca leitosa) são mais fáceis de tratar e tendem a formar menos espuma, de acordo com a literatura [3]. Isso explica o fato de que pequenas partículas de óleo se separam da água, ou seja, uma mistura deixa de ser 100% homogênea, passando a apresentar mais de uma fase.

De acordo com outra literatura consultada [22], os valores de pH de soluções recém-preparadas tendem a diminuir nas primeiras horas de uso, devido à absorção de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. A redução típica é de 0,5 no valor do pH. Portanto, é possível afirmar que, ao longo do tempo, a emulsão apresentará novas características e, conseqüentemente, variará, mesmo que pouco, algumas de suas propriedades. Outra pesquisa [4] aponta que o pH ideal para uma solução está entre 8,5 e 9,3. Apesar de novo, o fluido de corte em emulsão água não possui valor nesta faixa, porém apresentou um desempenho muito satisfatório na usinagem. Portanto, apesar das variações, no que diz respeito ao pH, este não influenciará negativamente no desempenho dos fluidos, porém, é importante atentar para o fator tempo, pois quanto mais tempo este fluido permanecer em repouso, sem ser reciclado, maior será o ataque de bactérias e conseqüentemente sua degradação.

3.3.2. Análise de densidade

Os valores de densidade obtidos para os fluidos analisados, novos e após filtração, são mostrados na Tabela 3.

TABELA 3. Resultados para análise de densidade (g/ml) dos fluidos novos e após filtração.

<i>Condição do fluido/Densidade (g/ml)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
MN	-	-	-	0.8790	-
MR	0.8700	0.8760	0.8700	0.8720	0.003
EN	-	-	-	0.9227	-
ER	0.9934	0.9941	0.9941	0.9939	0.000

Os valores de densidade para os novos fluidos de corte foram fornecidos pelos respectivos fabricantes, portanto, seus valores para as medidas 1, 2 e 3 não estão incluídos, apenas o valor final. As densidades dos fluidos de corte utilizados e filtrados foram coletadas três vezes e foi calculada uma média simples entre eles, bem como sua dispersão. Pode-se observar na Tabela 3 que houve uma pequena variação nas densidades. Os valores médios mostraram-se ligeiramente abaixo dos observados em estudo anterior [15], porém, embora este investigue fluidos semelhantes, seus elementos básicos e proporções variam. As emulsões apresentaram valores de densidade ligeiramente superiores aos dos óleos minerais. Isso é compreensível e, de certa forma, já esperado, pelo fato de as emulsões serem preparadas com uma pequena fração do óleo e a maior parte da água. Como a água tem uma densidade mais alta que o óleo, esses fluidos têm uma densidade mais alta que o óleo mineral.

3.3.3. Análise de água e sedimentos

Os valores de análise de água e sedimento obtidos para os fluidos analisados, novos e após filtração, são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Resultados para análise de água e sedimentos nos fluidos novos e após filtração.

<i>Condição do fluido / Água e sedimentos</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>
MN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ER	Menor que 0.1 ml	Menor que 0.1 ml	Menor que 0.1 ml	0.00	0.00

A partir dos dados apresentados na Tabela 4, pode-se perceber que a filtração de ambos os fluidos de corte foi eficiente, atendendo às expectativas. Apenas o fluido de corte água-emulsão que apresentou certo teor de sedimentos, porém muito baixo, que pode ser considerado como, aproximadamente, zero. Essa avaliação permite que esse fluido seja reciclado sem prejudicar o processo. Esse resultado corrobora a hipótese de que mesmo um filtro simples, feito com materiais de fácil acesso, pode proporcionar uma reciclagem satisfatória do fluido de corte utilizado nos processos de usinagem. Além disso, esse processo se mostrou mais eficaz (e provavelmente mais barato) que os tanques de sedimentação conhecidos, que permitem a sedimentação de partículas pesadas e a flutuação de óleos (e sólidos leves), conforme destacado em literatura [3].

3.3.4. Análise de rugosidade média (Ra)

A Figura 8 representa um gráfico de colunas, que relaciona os valores de rugosidade Ra (μm), obtidos nas superfícies usinadas com a aplicação de fluidos novos e reciclados.

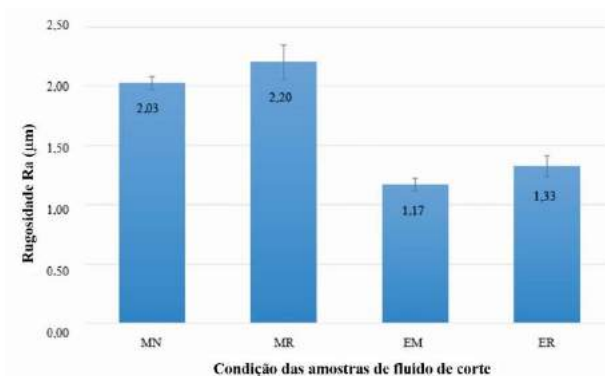


Figura 8. Valores médios de rugosidade Ra medidos nas superfícies usinadas com a aplicação de fluidos novos e reciclados.

Tomando como base os valores médios, pode-se observar na Figura 8 um aumento de 8,4% na rugosidade da superfície usinada, utilizando o novo fluido de corte mineral referente ao fluido reciclado. Além disso, há um aumento de 13,1% na rugosidade da superfície usinada com o novo fluido de corte por emulsão em relação ao reciclado. Percebe-se também que o fluido de corte em emulsão teve uma variação maior nos valores médios de rugosidade medidos, quando comparado ao fluido de corte mineral.

A Tabela 5 mostra os resultados da rugosidade média Ra (μm) medida nas superfícies usinadas com fluidos novos e reciclados, com seus respectivos desvios-padrão, além do coeficiente de variação desses resultados.

Tabela 5. Resultados da rugosidade Ra (μm) medidos nas superfícies usinadas com fluidos novos e reciclados.

<i>Condição do fluido / Ra (μm)</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Coefficiente de variação (%)</i>
MN	2.06	2.00	1.97	2.10	2.03	2.03	0.05	2.71
MR	2.20	2.01	2.41	2.23	2.17	2.20	0.14	6.58
EN	1.19	1.15	1.12	1.25	1.16	1.17	0.05	4.70
ER	1.29	1.47	1.24	1.33	1.31	1.33	0.09	6.63

Os valores médios são consistentes com os medidos em estudo anterior [9], aplicando emulsão. Pode-se afirmar que o baixo desvio padrão (dispersão) obtido indica que os valores medidos tendem a se aproximar da média, como esperado, caracterizando um comportamento homogêneo entre as amostras. Para determinar se um desvio padrão é considerado baixo, é necessário calcular o coeficiente de variação, que é interpretado como a variabilidade dos dados em relação à média. Nesse caso, todos os coeficientes de variação calculados podem ser considerados baixos, uma vez que esses valores estão bem abaixo da margem de 25%. Os fluidos reciclados foram os que apresentaram maior dispersão nos resultados, embora sejam valores baixos.

4. CONCLUSÃO

Um processo simples de reciclagem de fluidos de corte à base de óleos minerais e de emulsão, aplicado em operações de usinagem, foi investigado neste estudo. A fabricação de um filtro de baixo custo, utilizando materiais de fácil acesso, foi proposta para separar fragmentos sólidos e outras impurezas dos fluidos utilizados, tornando-os adequados para reutilização. As seguintes conclusões podem ser tiradas com base nas descobertas deste estudo:

- A eficiência de coleta do fluido de corte utilizado pode ser aumentada com a utilização de um reservatório de maior área, que se adapta às limitações geométricas do torno, reduzindo o desperdício devido ao movimento de rotação da peça causando dispersão do fluido.
- A filtração, embora utilizando um aparelho muito simples, proporcionou bons resultados, com um custo muito baixo, utilizando material de fácil acesso.
- As análises físico-químicas foram bastante satisfatórias, uma vez que os fluidos de corte puderam ser reciclados sem grandes variações em suas propriedades, bem como diminuição no desempenho de usinagem.
- Através da análise de rugosidade média (Ra) observa-se que, apesar de uma pequena dispersão dos resultados, considerando os volumes normalmente aplicados em ambiente industrial, são variações aceitáveis em função do tipo de processo. A dispersão dos resultados, também baixa, sugere que esses fluidos podem ser reciclados sem causar danos ao processo.
- Quanto à influência do tipo de fluido de corte na rugosidade das peças usinadas, para os fluidos selecionados, o óleo água-emulsão mostrou-se mais vantajoso, proporcionando melhor acabamento à superfície usinada, tanto para fluido novo quanto para fluido reciclado.
- Os fluidos de corte utilizados nos processos de torneamento podem ser reaproveitados, quando coletados e filtrados corretamente, sem contaminação, e desde que seu reaproveitamento seja em curto espaço de tempo.

5. AGRADECIMENTOS

Aos Laboratórios de Química da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, Campus Caraúbas, pelo apoio na realização das análises de caracterização de fluidos de corte.

REFERÊNCIAS

- [1] Longbottom, J.M.; Lanham, J.D.. Cutting temperature measurement while machining – a review. *Aircraft Engineering And Aerospace Technology*. (2005) [s.l.], v. 77, n. 2, p.122-130. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/00022660510585956>.
- [2] Trent, E.M. and Wright, P.K. *Metal Cutting*, 4th ed., Butterworth-Heineman, Boston, MA. (2000), p. 464.
- [3] Sheng, P. S.; Oberwalleney, S.. Life-Cycle Planning of Cutting Fluids—A Review. *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*. (1997) [s.l.], v. 119, n. 4, p. 791-800, 1. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2836826>.
- [4] Baradie, M.A. El. Cutting fluids: part I. characterisation.: Part I. Characterisation. *Journal Of Materials Processing Technology*. (1996a) [s.l.], v. 56, n. 1-4, p. 786-797. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01892-1](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(95)01892-1).
- [5] Lawal, S.A.; Choudhury, I.A.; Nukman, Y.. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—A review. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*. (2012) [s.l.], v. 52, n. 1, p. 1-12. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmachtools.2011.09.003>.
- [6] Vieira, J.M.; Machado, A.R.; Ezugwu, E.O.. Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal Of Materials Processing Technology*. (2001) [s.l.], v. 116, n. 2-3, p. 244-251. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)01010-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(01)01010-x).
- [7] Feng, W.; Yin, Y.; Mendoza, M. L.; Wang, L.; Chen, P.; Liu, Y.; Cai, L.; Zhang, L. Oil recovery from waste cutting fluid via the combination of suspension crystallization and freeze-thaw processes. *Journal Of Cleaner Production*. (2018) [s.l.], v. 172, p. 481-487. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.281>.
- [8] Davim, J. P.; Gaitonde, V.N.; Karnik, S.R.. Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models. *Journal Of Materials Processing Technology*. (2008) [s.l.], v. 205, n. 1-3, p. 16-23. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.082>.
- [9] Debnath, S.; Reddy, M. M.; Yi, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal Of Cleaner Production*. (2014) [s.l.], v. 83, p.33-47. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071>.
- [10] Shashidhara, Y.M.; Jayaram, S.R.. Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution. *Tribology International*. (2010) [s.l.], v. 43, n. 5-6, p. 1073-1081. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.065>.
- [11] Ozelcik, B.; Kuram, E.; Cetin, M. H.; Demirbas, E. Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. *Tribology International*. (2011) [s.l.], v. 44, n. 12, p. 1864-1871. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2011.07.012>.
- [12] Baradie, M.A. El. Cutting fluids: part ii. recycling and clean machining. : Part II. Recycling and clean machining. *Journal Of Materials Processing Technology*. (1996b) [s.l.], v. 56, n. 1-4, p. 798-806. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01893-x](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(95)01893-x).
- [13] Cheryan, M; Rajagopalan, N. Membrane processing of oily streams. Wastewater treatment and waste reduction. *Journal Of Membrane Science*. (1998) [s.l.], v. 151, n. 1, p.13-28. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0376-7388\(98\)00190-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0376-7388(98)00190-2).
- [14] Lee, C.; Choi, Y.; Ha, J.; Woo, W. Eco-friendly technology for recycling of cutting fluids and metal chips: a review. : A review. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-green Technology*. (2017) [s.l.], v. 4, n. 4, p. 457-468. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40684-017-0051-9>.
- [15] Hecini, M.; Drouiche, N.; Bouchelaghem, O.. Recovery of cutting fluids used in polycrystalline silicon ingot slicing. *Journal Of Crystal Growth*. (2016) [s.l.], v. 453, p. 143-150. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.08.035>.
- [16] Skerlos, S. J.; Hayes, K. F.; Clarens, A. F.; Zhao, F. Current advances in sustainable Metalworking Fluids research. *International Journal Of Sustainable Manufacturing*. (2008) [s.l.], v. 1, n. 1/2, p.180-202. Inderscience Publishers. <http://dx.doi.org/10.1504/ijsm.2008.019233>.
- [17] Skerlos, S. J.; Rajagopalan, N.; Devor, R. E.; Kapoor, Shiv G.; Angspatt, V. D. Ingredient-Wise Study of Flux Characteristics in the Ceramic Membrane Filtration of Uncontaminated Synthetic Metalworking Fluids, Part 1: experimental investigation of flux decline. : Experimental Investigation of Flux Decline. *Journal Of*

- Manufacturing Science And Engineering*. (1999) [s.l.], v. 122, n. 4, p. 739-745. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1286132>.
- [18] Bøllon, J.; Cárdenas, A.; Sánchez, J.. Emulsion Filtration Through Surface Modified Ceramic Membranes. *Journal Of Dispersion Science And Technology*. (2002) [s.l.], v. 23, n. 1-3, p.269-277. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01932690208984203>.
- [19] Rajagopalan, N.K.; Rusk, T.; Dianovsky, M. Purification of semi-synthetic metalworking fluids by microfiltration. *Tribology and Lubrication Technology*. (2004) Vol. 60, No. 8. pp.38–44.
- [20] Murić, A.; Petrinić, I.; Christensen, M. L. Comparison of ceramic and polymeric ultrafiltration membranes for treating wastewater from metalworking industry. *Chemical Engineering Journal*. (2014) [s.l.], v. 255, p.403-410. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.009>.
- [21] Feng, W.; Yin, Y.; Mendoza, M. L.; Wang, L.; Chen, X.; Liu, Y.; Cai, L.; Zhang, L.. Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions. *Journal Of Cleaner Production*. (2017) [s.l.], v. 148, p. 84-89. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.156>.
- [22] Runge, P. RF; Duarte, G. N. *Lubrificantes nas indústrias–produção, manutenção e controle*. Ed. Triboconcept, Cotia. (1990), p.323.



Artigo

Análise da implementação de medidas de eficiência energética em uma indústria cerâmica de pequeno porte em Russas/CE

Luiz José de Bessa Neto ^[1], Francisco José Sombra Jr ^[2] e Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-árido; luizjbessa@outlook.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-árido; fjsombrajunior@yahoo.com.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-árido; fkv@ufersa.edu.br

Recebido: 21/11/2020;

Aceito: 24/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: O segmento da indústria cerâmica no Brasil está vinculado ao setor da construção civil, com uma participação estimada do PIB nacional em 1%. No Ceará, por exemplo, o segmento da indústria cerâmica encontra-se em um processo de reestruturação. Nesse viés, o presente trabalho apresenta um estudo de caso de eficiência energética em uma indústria cerâmica de pequeno porte localizada na cidade de Russas-CE. O objetivo é estudar a viabilidade da implementação de algumas medidas de eficiência energética no âmbito da presente indústria, tais como: a substituição dos motores elétricos atuais por motores mais eficientes e de menor potência; e analisar a possibilidade da mudança do grupo tarifário B3 para o grupo A4. Os resultados denotaram que simples ações concernentes à eficiência energética, como possíveis substituições dos motores elétricos da indústria cerâmica, podem proporcionar melhorias significativas em todo processo produtivo, expressando uma economia de R\$ 8.000,00 e uma redução no consumo mensal de energia elétrica de aproximadamente 3.200 kWh. Ademais, conclui-se que a mudança do grupo tarifário B3 para o grupo A4, inserido na modalidade tarifária Horó Sazonal Verde, é vantajosa para a indústria, tendo em vista que a mesma estaria economizando cerca de R\$ 16.000,00 em três meses de consumo.

Palavras-chave: Indústria cerâmica; Eficiência energética; Conservação de energia; Grupos tarifários

Abstract: The ceramic industry segment in Brazil is linked to the civil construction sector, with an estimated share of the national GDP at 1%. In Ceará, for example, the ceramic industry segment is in a process of restructuring. In this vein, the present work presents a case study of energy efficiency in a small ceramic industry located in the city of Russas-CE. The objective is to study the feasibility of implementing some energy efficiency measures within the scope of this industry, such as: the replacement of incandescent lamps with LED lamps; the replacement of old electric motors for more efficient ones; and analyze the possibility of switching from tariff group B3 to group A4. The results showed that simple actions regarding energy efficiency, such as possible replacements for electric motors in the ceramic industry, can provide significant improvements in the entire production process, expressing savings of R\$ 8,000.00 and a reduction in monthly electricity consumption of approximately 3,200 kWh. Furthermore, it is concluded that the change from the tariff group B3 to the A4 group, inserted in the Horó Sazonal Verde tariff modality, is advantageous for the industry, considering that it would be saving approximately R\$ 16,000.00 in three months of consumption.

Key-words: Ceramic industry; Energy efficiency; Energy conservation; Tariff groups

1. INTRODUÇÃO

O setor da indústria de cerâmica vermelha tem sido um importante objeto de estudos nos últimos anos. Nessa conjuntura, esse segmento vem buscado uma contínua melhoria dos seus processos para que

resultados satisfatórios em relação ao meio ambiente, eficiência energética, aumento da produtividade e aperfeiçoamento na qualidade de seus produtos sejam alcançados [1].

A relevância da indústria de cerâmica vermelha no Brasil está ligada à sua forte ligação junto ao setor da construção civil. Nesse sentido, este ramo industrial estar distribuído em todo o território nacional, com forte representatividade econômica, trata-se de um setor diversificado, variando entre empresas de médio e grande porte e de pequenos empreendimentos familiares artesanais. Estima-se que a sua participação no PIB nacional é de 1% [1-2].

De acordo com o Plano de desenvolvimento do Arranjo Produtivo Local (APL) de cerâmica vermelha de Russas/CE, o que descreve a indústria ceramista no Nordeste é o fato da mesma ser originária da região, apresentando uma estrutura essencialmente familiar. No Ceará o setor encontra-se em um processo de reestruturação, tornando-se necessário um esforço intensivo no desenvolvimento de inovações tecnológicas para a melhoria da eficiência energética de tais indústrias [3].

Nesse contexto, o conceito de eficiência energética na indústria de cerâmica vermelha está relacionado a filosofia de uso otimizado dos recursos energéticos sem alterar a sua produção, buscando, em síntese, explorar as possibilidades de redução do consumo de energia, bem como suas vantagens econômicas e ambientais, tanto na parte térmica como elétrica.

Ante o exposto, o presente trabalho apresenta um estudo de caso de eficiência energética em uma indústria cerâmica de pequeno porte localizada na cidade de Russas-CE. O objetivo é estudar a viabilidade da implementação de algumas medidas de eficiência energética no âmbito da presente indústria, tais como: a substituição dos motores elétricos atuais por motores mais eficientes e de menor potência; e analisar a possibilidade da mudança do grupo tarifário B3 para o grupo A4.

2. A INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA NO BRASIL

O setor da cerâmica vermelha no contexto nacional, constitui um dos maiores conglomerados industriais do gênero no mundo, denotando, portanto, grande importância econômica para o Brasil. Entretanto, a competitividade neste setor tem suscitado uma exigência contínua por produtos de qualidade, configurando-se como um requisito essencial para a permanência de empresas no mercado [4].

Nesse sentido, o segmento percebe a necessidade de enquadrar seus produtos às exigências das normas técnicas, o que minimizaria a diversidade de produtos existentes, proporcionando, dessa forma, redução de custos de produção e melhor atendimento à construção civil. Os desperdícios que hoje ocorrem na indústria da cerâmica vermelha, de um modo geral, são da ordem de 30% [5].

Aliado a isso, a indústria de cerâmica vermelha brasileira envolve a produção de elementos estruturais, de vedação e de acabamento para a construção civil (telhas, blocos estruturais, lajotas e pisos) e responde por um faturamento de R\$ 18,0 bilhões/ano, segundo dados da Anicer - Associação Nacional da Indústria Cerâmica, com uma participação de 7.000 empresas. A maior parte destas micro e pequenas empresas de origem familiar, ofertando 293 mil empregos diretos (média de 42,4 empregados por empresa) e 1,25 milhões de empregos indiretos, constituindo, dessa maneira, um dos maiores parques de produção de cerâmica vermelha no mundo [6].

Por outro lado, no tocante ao perfil dos produtos produzidos (85% de blocos e 15% de telhas), ainda que predominem os produtos de baixo valor agregado, vem ocorrendo gradativa tendência de crescimento da participação de produtos mais sofisticados, como blocos estruturais, telhas esmaltadas, lajotas e pisos, produtos que permitem maiores níveis de lucratividade, assim como espaço de comercialização em mercados mais distantes [7].

O processo de produção da cerâmica vermelha geralmente se inicia com a extração da argila (matéria-prima), seguida pela estocagem, alimentação, desintegração, homogeneização ou mistura da argila, laminação, extrusão, corte (para blocos de vedação e lajotas), prensagem (para telhas), secagem, queima e estocagem de produtos para expedição ou venda. Tal processo tem utilizado como principais insumos, além da argila, água, lenha, energia térmica e energia elétrica, dentre outros, que podem estar provocando impactos negativos sobre o meio ambiente [8].

Exemplo disso, pode ser evidenciado pelo estudo de caso desenvolvido junto a empresa Villar Produtos Cerâmicos, situada no município de Tangará no estado do Rio Grande do Norte que, embora tenha elevado a produtividade industrial de cerâmicos, adotando inovações tecnológicas, vem mantendo desperdícios e gerando resíduos, sobretudo, nos processos extrusão, corte, secagem e queima.

A priori, tem-se um processo produtivo no qual se ressenete da presença de técnicas que evitem e minimizem os impactos ambientais, e propicie eficiência produtiva, ganhos socioeconômicos e melhor ambiente de trabalho. Essas técnicas podem ser viabilizadas por meio da implementação de etapas da Produção mais Limpa (P+L), entendida como sendo a aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva e integrada, aplicada a processos, produtos e serviços, visando aumentar eficiência e reduzir os riscos aos seres humanos e ao meio ambiente [8].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de desenvolver uma análise consistente relacionada à eficiência energética de uma indústria cerâmica de pequeno porte localizada no município de Russas-CE, com aproximadamente 33 anos de funcionamento, procurou-se, a priori, entender o perfil de consumo e os hábitos dos usuários no ambiente de trabalho, bem como as características das atividades exercidas durante o processo produtivo.

Nesse sentido, a cerâmica em questão trata-se de uma empresa que beneficia a argila in natura, transformando-a em telhas e tijolos através dos processos de extração e preparação da matéria prima, extrusão, secagem e queima das peças.

É oportuno salientar, que todos esses processos supracitados, apresentam interferência direta na conservação e uso racional da energia elétrica, visto que por se tratar de uma linha de produção, cada etapa sofre influências das precedentes e, se as mesmas não tiverem sido bem executadas, ocasionarão defeitos nas peças finais, fazendo-se necessário efetuar o seu descarte, suscitando, dessa maneira, prejuízos de um modo em geral.

Ademias, almejando facilitar o entendimento do vigente estudo, simplificou-se as etapas do processo produtivo, indicando apenas como foco os acionamentos das cargas existente na indústria. A Figura 1 denota a planta baixa da unidade consumidora com suas respectivas cargas.

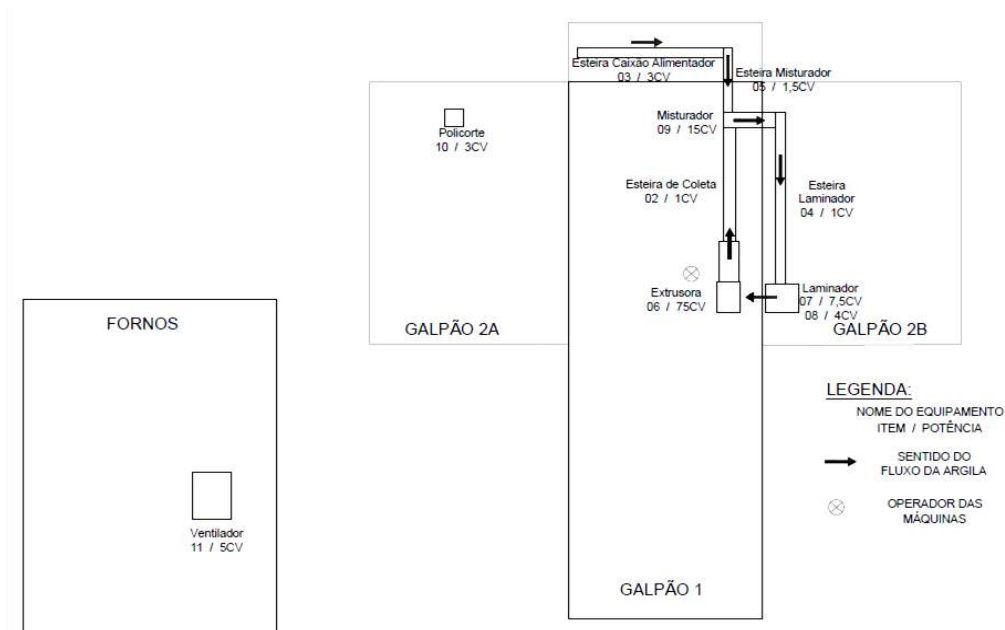


FIGURA 1. Planta baixa da unidade consumidora contendo as cargas dos motores. Autoria própria, 2020.

Para realizar a análise e entender a dinâmica do funcionamento da cerâmica, tornou-se necessário observar a mesma em operação por algumas horas e realizar diversas perguntas a funcionários que trabalham diretamente com o setor de operação e manutenção.

Nesse contexto, constatou-se que um funcionário responsável pela operação faz o acionamento de todos os motores, de modo que os mesmos são ligados e desligados constantemente afim de se obter e manter um fluxo contínuo no fornecimento de argila na extrusora.

É válido ressaltar, que todos os motores da instalação são trifásicos 380 V e são acionados por meio de partidas diretas, exceto o motor da extrusora, que é de 75 cv acionado por uma chave compensadora. A Tabela 1 evidencia a quantidade e as potências nominais dos motores elétricos da indústria.

TABELA 1. Quantitativo e potências nominais dos motores elétricos.

Ítems	Quantidade	Equipamentos	Potência [cv]
01	01	Bomba de vácuo	10
02	01	Esteira de coleta	1
03	01	Esteira do caixão alimentador	3
04	01	Esteira do laminador	1
05	01	Esteira do misturador	1,5
06	01	Extrusora	75
07	01	Laminador 01	7,5
08	01	Laminador 02	4
09	01	Misturador	15
10	01	Policorte	3
11	01	Ventilador	5

Autoria própria, 2020.

Por outro lado, dos motores mencionados na Tabela 1, os referentes aos itens 03, 04, 05 e 09 são acionados frequentemente no mesmo instante de tempo, uma vez que essas máquinas controlam o fluxo de argila que alimenta a extrusora, estimando-se aproximadamente de 140 a 170 partidas por dia de trabalho, enquanto que os demais são ligados em média 3 vezes ao dia, ou quando há alguma parada de emergência.

Dessa forma, esse fato é de grande importância na presente análise, haja vista que de acordo com [9], referência internacional na produção de motores elétricos, a corrente de pico no instante da partida aumenta na ordem de 6 a 8 vezes da corrente nominal, representando um ponto de estudo aprofundado, visto que devido a esses aumentos repentinos na corrente e de forma incessante, contribui para o maior consumo de energia elétrica e paradas para manutenção.

Aliado a isso, outro fator analisado que diverge das boas práticas do consumo de energia elétrica é a desconformidade e possíveis arranjos duvidosos no que concerne a eficiência nas instalações elétricas, visto que foram encontrados cabos expostos, poeira nos equipamentos e motores sem proteção na caixa de ligação. A Figura 2 evidencia em (a) o quadro de comando dos motores elétricos; em (b), o motor da esteira totalmente empoeirado.



(a)



(b)

FIGURA 2. (a) Quadro de comando dos motores elétricos; (b) Motor elétrico da esteira de coleta empoeirado. Autoria própria, 2020.

Nessa conjuntura, outro fator analisado no âmbito da presente indústria cerâmica, que é de suma importância para o conforto funcional dos trabalhadores, foi a iluminância dos ambientes laborais. Destarte, utilizando um aplicativo de smartphone, o Luxímetro, efetuou-se as devidas leituras de iluminância dos ambientes de trabalho.

Por conseguinte, em virtude da análise dos dados obtidos, diagnosticou-se que apenas dois setores de trabalhos apresentaram uma iluminação deficitária, em torno de 160 lux, enquanto que o mínimo recomendado pela NBR 8995-1:2013 - Iluminação de ambientes de trabalho, é de 500 lux. Dessarte, faz-se imprescindível otimizar o fluxo luminoso desses ambientes, seja de maneira natural ou artificial.

Desse modo, o galpão 1, onde localizam-se as máquinas elétricas, apresenta um pé direito de 2 m de altura, piso de concreto apenas no setor de produção, algumas telhas translúcidas para forçar a iluminação natural e com parte de suas laterais fechadas com alvenaria. Em contrapartida, o galpão 2 tem pé direito de 3m e as mesmas características do anterior, exceto o piso de concreto.

Em um determinado setor da produção, localizado no galpão 1 ao lado da esteira de coleta, trabalham fixos seis colaboradores, sendo três destes em permanência intermitente durante a jornada de trabalho. Contudo, neste ambiente encontram-se apenas duas lâmpadas fluorescentes de 40W e uma lâmpada LED de 9W, sem nenhuma telha translúcida, uma vez que de acordo com relatos dos funcionários, as mesmas iluminam bem o ambiente, todavia deixa-o mais quente, provocando um desconforto térmico.

Nesse sentido, ao se utilizar o software Luxímetro, verificou-se que a iluminância nessa área específica do galpão (próxima a esteira de coleta) foi de 122 lux, não satisfazendo o nível mínimo recomendado pela NBR 8995-1:2013, que é de 500 lux.

Por outro lado, já nos demais ambientes dos galpões 1 e 2 os níveis foram satisfatórios de acordo com a norma, visto que os valores medidos oscilavam entre 140 a 210 lux, sendo estes valores considerados convincentes, tendo em vista que a norma mencionada indica no mínimo 100 lux para recintos não usados para trabalhos contínuos ou depósitos. A Figura 3 representa o cenário descrito previamente.



FIGURA 3. Iluminação natural da cerâmica. Autoria própria, 2020.

A análise luminotécnica com o aplicativo do Luxímetro também foi realizada no interior de um dos quatro fornos existentes na cerâmica, pelo qual constatou-se uma iluminação ineficiente. Esse fato pode ser explicado em virtude dessa área ser um ambiente fechado, portando somente duas portas de entrada, e o teto ser construído de tijolos maciços em formato de arco.

Dessa maneira, registrou-se 165 lux no forno cerâmico, enquanto que de acordo com [10], o mínimo é de 500 lux para o tipo de atividade exercida em seu interior. A Figura 4 ilustra o ambiente interno do forno cerâmico analisado.



FIGURA 4. Ambiente interno do forno cerâmico. Autoria própria, 2020.

De acordo com as etapas evidenciadas anteriormente, principalmente os procedimentos referentes a preparação da matéria-prima e extrusão são onde se encontram a maior parcela da potência instalada, atingindo aproximadamente 95% do consumo, enquanto os outros 5% são alusivos à iluminação e aos ventiladores existentes nos fornos. Nesse viés, após a identificação das irregularidades nas instalações elétricas, tornou-se necessário avaliar o consumo em kWh da vigente empresa.

Assim, ao analisar três faturas de energia da indústria, observou-se que o consumo oscilava muito de um mês para o outro no histórico dos últimos doze meses. Logo, ao indagar o responsável técnico, o mesmo salientou que em virtude da empresa estar localizada na zona rural e pertencer ao Grupo B3 de tarifação, a Enel, que é a concessionária distribuidora de energia elétrica no Ceará, realiza as leituras dos medidores a cada 60 dias, sendo que o consumo de um mês é o valor real e o outro é extraída uma média aritmética dos meses anteriores.

Além disso, o profissional também destacou que por motivos de manutenção em equipamentos a empresa permaneceu fechada por aproximadamente 9 meses, período correspondente de março a dezembro de 2018, tempo esse em que a mesma não consumia energia elétrica, impactando, dessa maneira, nos valores atuais medidos. O valor cobrado por kWh consumido é de R\$ 0,72872, sendo o valor em reais obtido pelo produto do consumo mensal em kWh pelo valor em Real. Ante o exposto, só foi considerado para efeito de análise os meses de maior consumo, conforme evidenciado na Tabela 2.

TABELA 2. Histórico de consumo concernente aos três últimos meses da indústria cerâmica.

<i>Mês</i>	<i>Consumo (kWh)</i>	<i>Valor (r\$)</i>
Junho	11.882	8.658,65
Agosto	13.731	10.006,05
Outubro	12.854	9.366,97

Autoria própria, 2020.

Seguidamente, após aquisição dos dados de consumo, efetuou-se a leitura das correntes elétricas dos motores em pleno funcionamento com o auxílio de um alicate amperímetro da marca FoxLux, modelo FX-AA. Nesse sentido, as medições foram realizadas por fase (A, B, C) e considerando como dados de análise o maior módulo de corrente verificada pelo aparelho.

Devido ao longo período de utilização e a ausência de conservação de todos os motores, alguns destes equipamentos não apresentavam a placa de identificação, fazendo-se crucial consultar os trabalhadores locais para ter conhecimento das respectivas potências nominais dos motores, visto que quando os mesmos foram adquiridos, estavam em perfeito estado.

Portanto, os valores das correntes nominais que estavam impossibilitadas de serem lidas em algumas máquinas, foram tomadas como base os dados referentes aos motores da WEG S.A através de seus manuais obtidos no site da empresa fabricante. A Tabela 3 evidencia todos os motores elétricos com suas respectivas potências, correntes medidas e as correntes nominais de operação, bem como a localização dos mesmos no ambiente da presente indústria cerâmica.

TABELA 3. Características de operacionalidade e localização dos motores elétricos.

<i>Itens</i>	<i>Localização Equipamentos</i>	<i>Potência [cv]</i>	<i>Nº de polos</i>	<i>Corrente Nominal [A]</i>	<i>Corrente de Trabalho [A]</i>
01	Bomba de vácuo	10	4	14,9	10,9
02	Esteira de coleta	1	6	1,97	1,3
03	Esteira do caixão alimentador	3	4	4,87	3,3
04	Esteira do laminador	1	4	1,97	2,1
05	Esteira do misturador	1,5	4	2,55	3,1
06	Extrusora	75	6	106	85
07	Laminador 01	7,5	6	12,7	8,1
08	Laminador 02	4	4	6,67	2,9
09	Misturador	15	6	22,9	12,8
10	Policorte	3	2	4,82	4,7
11	Ventilador	5	4	8,19	5,1

Autoria própria, 2020.

No momento das medições realizadas com o alicate amperímetro, detectou-se possíveis pontos prejudiciais quanto à ventilação dos motores, tendo em vista que na maioria dessas máquinas elétricas, as aletas de ventilação estavam todas obstruídas com poeiras e partículas granuladas de argila, visto que os motores são instalados em pontos que dificultam suas limpezas. À vista disso, o responsável do setor salientou que o motor de 15cv já foi danificado diversas vezes por tais motivos. A Figura 5 denota o cenário retratado anteriormente.



FIGURA 5. Motores elétricos da linha de produção cobertos de poeiras e partículas granuladas de argila.

Autoria própria, 2020.

Mediante os dados obtidos na inspeção visual e no laudo técnico no âmbito da cerâmica retratada no vigente estudo, irá se analisar a possibilidade de fazer rodízio entre os motores elétricos, substituindo os que trabalham sobrecarregados por outros que tenham suas correntes nominais compatíveis com os valores medidos. Consoante a isso, pretende-se averiguar os impactos econômicos concernentes a substituição dos motores elétricos por outros de menor potência, pelo qual atendam as demandas de trabalho.

Outrossim, um fator de suma importância que estar intrinsecamente relacionado aos problemas expostos, são as formas de partidas utilizadas para acionar os motores. Conforme já salientado, os mesmos são submetidos a uma dinâmica de várias partidas no decorrer do dia, provocando excessos de picos de corrente e, conseqüentemente, maior consumo de eletricidade e diminuição da vida útil destes equipamentos. Por fim, será realizado um estudo objetivando averiguar a viabilidade da mudança do grupo tarifário, visto que atualmente a referida empresa está enquadrada no Grupo B3, e pretende-se migrar para o Grupo A4.

RESULTADOS

Fundamentado nas observações referentes aos valores das correntes elétricas dos motores, bem como no histórico de consumo de eletricidade referente aos três últimos meses da presente indústria cerâmica,

depreendeu-se que possíveis rodízios e substituições de motores, podem contribuir significativamente para a redução do consumo de energia elétrica, sem comprometer as características demandadas pelos equipamentos nos seus funcionamentos. A Tabela 4 denota as características dos motores em operação com suas respectivas potências, valores de correntes nominais e de trabalho.

TABELA 4. Especificações dos valores de potências, correntes nominais e de operação dos motores elétricos.

<i>Itens</i>	<i>Potência</i>	<i>Polos</i>	<i>Corrente</i>	<i>Corrente de</i>	<i>Motor sugerido</i>	
	<i>Atual [cv]</i>		<i>nominal [A]</i>	<i>trabalho [A]</i>	<i>cv</i>	<i>I_N [A]</i>
01	10	4	14,9	10,9	7,5	12,7
02	1	6	1,97	1,3	0,75	1,58
03	3	4	4,87	3,3	2	3,94
04	1	4	1,97	2,1	1	1,97
05	1,5	4	2,55	3,1	2	3,94
06	75	6	106	85	60	90,1
07	7,5	6	12,7	8,1	5	8,19
08	4	4	6,67	2,9	2,5	4,87
09	15	6	22,9	12,8	10	17,3
10	3	2	4,82	4,7	3	4,82
11	5	4	8,19	5,1	4	6,67
Total	126	-	-	-	97,75	-

Autoria própria, 2020.

Dessarte, sugere-se na mesma Tabela 4 a substituição de alguns motores elétricos para que os mesmos se adequem às correntes exigidas pelos equipamentos, evitando, dessa maneira, tanto o superdimensionamento quanto o subdimensionamento destas máquinas. Nota-se, que em alguns casos específicos os motores deverão ser substituídos por outros de maior potência, contudo, verifica-se a presença de motores superdimensionados. Em segundo plano, será analisado a diferença entre a potência atual e a sugerida, com o intuito de verificar sua aplicabilidade.

Nessa perspectiva, percebe-se claramente, observando a Tabela 4, que a diferença entre a potência atual e a sugerida é de 28,25 cv. Desse modo, considerando que a empresa trabalha 7hs (sete horas) diárias, durante 22 dias a cada mês e que 1 cv é equivalente a 0,736 kW, pode-se estimar uma economia no consumo em aproximadamente 3.200 kWh mensal.

Em virtude de as chaves de partida para o acionamento dos motores serem em sua maioria do tipo partida direta, com exceção do motor de 75 cv, que é tem uma chave compensadora automática, bem como a dinâmica do funcionamento destes equipamentos, tendo em vista que todos os motores partem com carga, torna-se uma tarefa difícil realizar o dimensionamento exato de uma chave que atenda às necessidades da unidade consumidora.

Diante deste cenário, aconselha-se que os motores acima de 5 cv sejam equipados com chaves que suavizem suas partidas, por exemplo: compensadora, estrela-triângulo ou chaves eletrônicas, adequando-se à NBR 5410:2008. É oportuno destacar, que a implementação dessa medida de eficiência energética refletiria em uma economia de aproximadamente R\$ 3.500,00.

Além destas ações, a instalação de uma embreagem mecânica no motor do misturador é de extrema importância, haja vista que o mesmo sistema já é utilizado no motor de 75 cv, e esse artifício proporciona a diminuição do número de partidas diárias, uma vez que o sistema se assemelha ao dos automóveis, seguindo o mesmo princípio: a potência mecânica do eixo do motor só é transmitida à carga após a embreagem ser acionada. Esse sistema é imprescindível para o misturador, visto que o mesmo comporta um motor de elevada potência e é acionado inúmeras vezes ao dia.

Nesse sentido, analisou-se a possibilidade da mudança do grupo tarifário B3 para o grupo A4, considerando o funcionamento da indústria cerâmica fora do horário de ponta, na modalidade tarifária Horó

Sazonal Verde, cujo valor da presente tarifa de energia elétrica fornecida pela Enel CE é R\$ 0,31172400 por kWh (quilowatt-hora).

Dessa forma, calculou-se os novos valores das faturas de energia tendo como base o histórico de consumo dos três meses considerados (junho, agosto e outubro). A Tabela 5 evidencia um comparativo entre os valores das tarifas de energia elétrica nos grupos A4 (na modalidade tarifária Horo Sazonal Verde) em relação ao grupo B3, pelo qual a empresa está enquadrada atualmente.

TABELA 5. Comparativo dos valores das faturas de energia elétrica entre os grupos A4 e B3.

<i>Mês</i>	<i>Consumo (kWh)</i>	<i>Valor da Tarifa Grupo</i>		<i>Valor (R\$)</i> <i>Grupo B3</i>	<i>Economia</i> <i>(R\$)</i>
		<i>A4 (R\$/kWh)</i>	<i>Grupo A4</i>		
Junho	11.882	0,31172400	3.703,90	8.658,65	4.954,75
Agosto	13.731	0,31172400	4.280,28	10.006,05	5.725,77
Outubro	12.854	0,31172400	4.006,90	9.366,97	5.360,07
Total	-	-	11.991,08	28.031,67	16.040,59

Autoria própria, 2020.

Nesse contexto, analisando-se a Tabela 4, percebe-se nitidamente, que o grupo A4 inserido na modalidade tarifária Horo Sazonal Verde, apresenta uma economia bastante expressiva em relação ao grupo B3, expressando uma estimativa de economia de aproximadamente R\$ 16.000,00 nos três meses analisados. Ante o exposto, torna-se evidente que a mudança da unidade consumidora do grupo B3 para o grupo A4 é vantajosa, haja vista que a mesma estará economizando na fatura de energia mais da metade do valor que está pagando hodiernamente. Por fim, se porventura for realizada a substituição dos motores elétricos atuais por motores mais eficientes e de menor potência, munidos com as chaves de partidas apropriadas, a indústria cerâmica estaria economizando cerca de R\$ 8.000,00.

4. CONCLUSÃO

Por todo o exposto, tornou-se possível observar que simples ações concernentes à eficiência energética na presente indústria cerâmica, tais como a troca das lâmpadas incandescentes por lâmpadas LED e possíveis substituições dos motores elétricos atuais por motores mais eficientes e de menor potência, podem proporcionar melhorias significativas em todo processo produtivo, expressando uma economia no consumo mensal de energia elétrica de aproximadamente 3.200 kWh. Uma outra consideração a ser feita, refere-se à ineficácia da iluminação diagnosticada em determinados ambientes da cerâmica, uma vez que apresentaram valores de iluminância inferiores aos mínimos estabelecidos na NBR 8995-1:2013.

No que se refere a possibilidade da mudança do grupo tarifário B3 para o grupo A4, inserido na modalidade tarifária Horo Sazonal Verde, conclui-se que a presente transmutação é muito vantajosa para a indústria, tendo em vista que, de acordo com as estimativas econômicas, a cerâmica em questão estaria economizando cerca de R\$ 16.000,00 em apenas três meses de consumo. Aliado a isso, faz-se imprescindível a adoção de políticas relacionadas ao uso racional de energia elétrica no ambiente de trabalho da fábrica, almejando informar os empregados sobre a importância da utilização eficiente da eletricidade.

Dessa maneira, o presente trabalho configura-se como um estudo pioneiro no estado do Ceará, uma vez que alvitra técnicas de eficiência energética referente a parte elétrica em uma indústria cerâmica de pequeno porte localizada no município de Russas/CE. Contudo, as estratégias empregadas pelos autores deste artigo podem ser implementadas em qualquer empresa do setor de cerâmica vermelha do Brasil e do mundo, considerando as especificidades e a dinâmica de funcionamento de cada uma das unidades consumidoras a serem analisadas.

REFERÊNCIAS

- [1] Nascimento, C. A. Estudo da reengenharia de fornos cerâmicos com crivamento: uma oportunidade real de melhoria da sustentabilidade. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Guarapuava, Paraná, Brasil, 2015.

- [2] Cabral Júnior, M. O setor de cerâmica vermelha e a pequena empresa: desafios ao desenvolvimento em bases sustentáveis. *Seminário de Sustentabilidade Ambiental e Mercado de Carbono para a Indústria de Cerâmica Vermelha*, São Paulo, SEBRAE, 2006.
- [3] Leite, G. R.; Aragão Júnior, D. P. Estudo de Caso da Utilização de Diferentes Fornos na Indústria Ceramista e Seus Impactos no Meio Ambiente. *XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Fortaleza/CE, Brasil, 2015.
- [4] Coelho, J. M. Projeto de assistência técnica ao setor de energia: perfil de argilas para cerâmica vermelha. *Relatório Técnico*, Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, 2009.
- [5] Abreu, Y. V. Estudo comparativo da eficiência energética da indústria da cerâmica de revestimento via úmida no Brasil e na Espanha. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, São Paulo, Brasil, 2001.
- [6] Silva, R. G. Diagnóstico de desperdícios de uma cerâmica vermelha rumo à produção mais limpa. *6th International Workshop Advances in Cleaner Production*, São Paulo, Brazil, 2017.
- [7] Abrahao, R.; Carvalho, M. Environmental impacts of the red ceramics industry in Northeast Brazil. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, v.6. p. 310-317, 2017.
- [8] Ouahabi, M.; Daoudi, L.; Vleeschouwer, F.; Bindler, F. R.; Fagel, N. Potentiality of clay raw materials from Northern Morocco in ceramic industry: tetouan and meknes areas. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, v.2, p. 145-159, 2014.
- [9] WEG S. A. Eficiência Energética em Motores Elétricos. Disponível online: <http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp>. (acesso em 28/10/2020).
- [10] ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013. Iluminação de Ambientes de Trabalho, 2013.



Artigo

Estudo das propriedades mecânicas de polímeros aplicados em manufatura aditiva em comparação a polímero de aplicação industrial

Ramsés Otto Cunha Lima ^[1], Samuel de Oliveira Martins ^[2], Kalyude Diógenes de Sousa ^[3] e Mayla Alencar Medeiros ^[4]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; samuelmartins2802@gmail.com

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; kalyude_13@hotmail.com

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; maylalencar@gmail.com

Recebido: 08/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: A aplicação da impressão 3D para manufatura rápida tem a proposta de produzir peças de geometrias complexas de acordo com projetos computacionais, além de ter o benefício de evitar desperdício de material, uma vez que não há necessidade de operações de usinagem nas peças fabricadas. Dessa forma, oferecem muitas vantagens na fabricação de compósitos poliméricos, como alta precisão dimensional, custo competitivo efetivo e geometria customizada. No entanto, devido às propriedades mecânicas relativamente limitadas dos materiais poliméricos aplicados como matéria-prima para essas máquinas, é necessário realizar um estudo comparativo em relação às propriedades mecânicas de outros materiais mais comumente aplicados na indústria a fim de avaliar se, de fato, os materiais impressos podem substituir os polímeros mais usuais. Nesta pesquisa, cinco amostras de cada material, impressas por prototipagem 3D, ou seja, acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e ácido polilático (PLA), foram conduzidas para ensaios mecânicos de tração e flexão, tendo seus resultados comparados com as propriedades mecânicas do Nylon 6, submetido aos mesmos testes. A partir da comparação das propriedades mecânicas analisadas e da densidade específica dos materiais testados, verifica-se que os materiais usados na manufatura aditiva, em determinadas situações, podem substituir os plásticos de engenharia, comumente aplicados.

Palavras-chave: manufatura aditiva; polímeros de engenharia; ensaios mecânicos; propriedades mecânicas.

Abstract: The application of 3D printing for rapid manufacturing has the proposal of producing complex geometry pieces in accordance with computational projects, besides having the benefit of avoiding material waste, since there is no need for machining operations on manufactured pieces. Thus, they offer many advantages in manufacturing with polymer composites, such as high dimensional accuracy, competitive effective cost and customized geometry. However, due to the relatively limited mechanical properties of polymeric materials applied as feedstock for these machines, it is necessary to carry out a comparative study in relation to mechanical properties of other materials more commonly applied in industry in order to evaluate if, in fact, printed materials can replace the more usual polymers. In this research, five samples of each material, printed by 3D prototyping, i.e. acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polylactic acid (PLA), are conducted to mechanical tensile and flexural tests and their results are compared with mechanical properties of Nylon 6, submitted to the same tests. From the comparison of the mechanical properties analyzed, and the specific density of the tested materials, it is verified that the materials applied in additive manufacture, in certain situations, can replace commonly applied engineering plastics.

Key-words: additive manufacturing; engineering polymers; mechanical tests; materials properties.

1. INTRODUÇÃO

A indústria manufatureira, constantemente, busca novos materiais e processos de fabricação a fim de alcançar maior capacidade de produção, tolerâncias mais estreitas, melhor acabamento, associado ao baixo custo. Nesse contexto, a manufatura aditiva ou impressão 3D se popularizou, pois, diferentemente da usinagem, que funciona removendo material da peça para esculpi-la, a manufatura aditiva insere material em dimensões projetadas [1-3]. Recentemente, foram desenvolvidas técnicas de manufatura aditiva mais baratas e rápidas que podem produzir altas qualidades de impressão. Além disso, materiais poliméricos para impressão 3D estão sendo produzidos com uma ampla gama de propriedades [2,3]. Esses avanços mudam continuamente a maneira como os produtos são projetados e fabricados e como são utilizados pelos consumidores [1-4]. Essa tecnologia tem sido utilizada, tanto na área de engenharia, quanto em outras áreas, como arquitetura, construção e até medicina e a odontologia, com a produção de próteses.

As impressoras 3D baseadas em modelagem por fusão e deposição (FDM) são, atualmente, os dispositivos de consumo mais populares para impressão de polímeros e seus compostos baseados em sistemas de manufatura aditiva de extrusão. Entre outras técnicas baseadas em extrusão, a FDM é uma técnica de fusão de material, que usa um carretel de filamento termoplástico como policarbonato (PC), acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e ácido polilático (PLA) com diâmetros variados para ser fundido e extrudado através de um bico aquecido [1,5]. O consumo global de sistemas de manufatura aditiva, materiais de impressão, peças ou software relacionados à tecnologia totalizaram mais de US\$ 13 bilhões em 2016. Além disso, os gastos mundiais com impressão 3D devem ter uma taxa de crescimento anual de 22,3% nos próximos anos [1]. Para essas aplicações práticas, as peças impressas devem suportar várias quantidades de tensões mecânicas e ambientais durante o uso.

Materiais poliméricos termoplásticos como ABS e PLA, entre outros, podem ser processados por tecnologia de manufatura aditiva, encontrando aplicações possíveis mesmo em áreas como a indústria aeroespacial, devido às tolerâncias estreitas alcançadas neste processo, para a criação de estruturas leves complexas [6]. No entanto, a maioria dos produtos de polímero impressos em 3D são, ainda, usados como protótipos conceituais ao invés de componentes funcionais, uma vez que produtos de polímero puro construídos por impressão 3D apresentam falta de resistência e funcionalidade se comparados aos plásticos de engenharia comuns [7]. O Nylon 6, por exemplo, é um polímero que pode ser aplicado como peças totalmente funcionais e com suporte à aplicação de carga devido às suas propriedades mecânicas adequadas [8]. Essas desvantagens restringem a ampla aplicação industrial de polímeros impressos em 3D.

Em estudo sobre as propriedades do Nylon 6 [8], foram realizados ensaios de tração utilizando a norma ASTM D638M, com velocidade de ensaio de 5 mm/min, em que valores limites de resistência à tração de 55 MPa e deformação na ruptura de 25% foram obtidos. Em outra pesquisa [9], foram realizados ensaios utilizando os mesmos parâmetros da anterior, alterando-se apenas a velocidade de ensaio para 50 mm/min, com o resultado obtido de 68 MPa de limite de resistência à tração e apenas 2% de deformação na ruptura, além disso a um módulo de elasticidade de 2,7 GPa. Em estudo semelhante [10], os testes foram realizados seguindo os mesmos parâmetros da pesquisa anterior, ou seja, com velocidade de 50 mm/min, obtendo valores semelhantes a 65 MPa de resistência à tração e módulo de elasticidade pouco acima de 2 GPa. Em estudo com testes de flexão de 3 pontos [11], seguindo o padrão ASTM D790, com os apoios a uma distância de 50 mm, um valor limite de resistência à flexão de 94,2 MPa foi encontrado. Em outro estudo [9], ao realizar o mesmo teste alterando a distância dos apoios para 64 mm, foi encontrado o valor de 89 MPa.

Como regra geral, as melhores propriedades mecânicas (principalmente para tração) são obtidas quando os filamentos poliméricos são orientados longitudinalmente e paralelamente à direção de carregamento, e as piores propriedades de tração são obtidas quando as amostras são carregadas ao longo da construção direção devido a uma fraca ligação intercamada [1]. O uso de compósitos poliméricos em manufatura aditiva resolve alguns problemas, combinando a matriz e os reforços para obter um sistema com propriedades estruturais ou funcionais mais úteis, não atingíveis por qualquer um dos constituintes sozinhos [12]. Nos últimos anos, houveram conquistas consideráveis no desenvolvimento de compósitos poliméricos imprimíveis, com incorporação de partículas, fibras ou reforços de nano materiais, com desempenho aprimorado [13]. Porém, por enquanto, essa tecnologia ainda é cara, restringindo seu uso.

Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) é um dos materiais de filamento de impressão 3D mais comuns. Este material é favorecido por suas propriedades reológicas, que tornam as superfícies relativamente lisas no FDM, além disso, o ABS é particularmente variável porque os três monômeros usados em sua produção podem ser

adicionados em diferentes proporções e em diferentes estágios, resultando em misturas e copolímeros rotulados como ABS [14]. É sempre recomendado certificar-se de que qualquer ABS produzido por FDM seja feito em um espaço bem ventilado, pois o material produz gases tóxicos ao ser derretido, produzindo um odor perceptível e causando dores de cabeça rapidamente [14].

Em pesquisa anterior [15] na qual o ensaio de tração do ABS foi realizado utilizando a norma ASTM D638, foram apresentadas as propriedades mecânicas obtidas em diferentes orientações. Com as fibras termoplásticas dispostas de forma diferente, o resultado foi que há maior resistência se houver impressão longitudinal, onde o valor limite da resistência à tração foi de 25,7 MPa e o módulo de elasticidade de 987,8 MPa. Da mesma forma, em outro estudo [16], foram realizados ensaios comprovando que a orientação longitudinal foi a mais resistente com um limite de resistência à tração de 33,5MPa e um módulo de elasticidade de 2 GPa. Na mesma pesquisa citada anteriormente [15], ao testar a flexão utilizando a norma ASTM D790 impressa longitudinalmente, foi obtido o valor limite de resistência à flexão de 38 MPa. Ao fazer uma investigação semelhante [17], ele encontrou um valor limite de resistência à flexão de 51 MPa.

O polilactídeo (PLA) é um polímero bem conhecido em aplicações no campo biomédico. É usado há décadas em dispositivos cirúrgicos, como suturas ou cliques. No campo biomédico, o PLA é altamente aceito por causa de suas boas propriedades mecânicas combinadas com sua biocompatibilidade e sua capacidade de degradar *in vivo* e *in vitro* [18,19]. É um polímero versátil feito de matérias-primas agrícolas renováveis e é totalmente biodegradável além disso, outra característica que torna este polímero interessante é o fato de poder ser processado de forma semelhante às poliolefinas; além disso, o PLA possui boa rigidez e resistência [20].

As propriedades mecânicas dos polímeros à base de ácido lático podem variar bastante, desde plásticos macios e elásticos a materiais rígidos e de alta resistência [21]. O PLA é, à temperatura ambiente, um polímero rígido e frágil, com uma temperatura de transição vítrea de 55 °C e uma temperatura de fusão de 180 °C, dependendo da quantidade de lactídeo L- e D-, usados na composição do monômero original. Os valores típicos das propriedades mecânicas de tal polímero de PLA incluem um módulo de elasticidade de mais de 3.500 MPa e uma resistência à tração de cerca de 40-60 MPa, com apenas 3% de alongamento na ruptura [18-20]. O PLA semicristalino é preferido, em vez de o polímero amorfo, quando propriedades mecânicas superiores são desejadas. O PLA semicristalino tem um módulo de tração aproximado de 3 GPa, resistência à tração de 50 - 70 MPa, módulo de flexão de 5 GPa, resistência à flexão de 100 MPa e um alongamento na ruptura de cerca de 4% [21,22]. Ainda assim, em um desses estudos [20], verificou-se que o PLA puro, obteve valores de resistência à tração e alongamento na ruptura superiores aos compósitos à base deste material testado. O que leva à tendência de que a adição desses elementos fragilize o material.

Apesar dos avanços consideráveis no estudo do processo de fabricação de aditivos, bem como nas propriedades dos materiais aplicados nesta tecnologia, ainda há pouca exploração quanto ao uso destes em ambiente industrial. Plásticos de engenharia, como o Nylon 6, continuam a ser amplamente aplicados devido à sua confiabilidade e propriedades mecânicas homogêneas. Porém, a utilização destes apresenta o inconveniente da necessidade de processos de usinagem, os quais, dependendo da complexidade geométrica do produto, bem como das tolerâncias dimensionais necessárias, podem se apresentar como fatores limitantes para o processo de produção. Assim, esta pesquisa propõe a comparação das propriedades mecânicas do Nylon 6 com o ABS e PLA. O objetivo é estudar a possibilidade de substituição desses materiais em aplicações de engenharia, acelerando assim a produção das peças e garantindo sua funcionalidade. Os resultados confirmam a possibilidade, em determinadas situações, de aplicação desses materiais em substituição ao Nylon 6, o que se torna viável no caso de peças com geometria complexa, baixa densidade e boa resistência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As dimensões das amostras foram baseadas na norma ASTM D638-14 (2014) [23], para ensaios de tração e na norma ASTM D790-16 (2016) [24], para ensaios de flexão. Para amostras de tração, foram utilizadas as dimensões do Tipo IV especificadas na norma [23], essas dimensões são recomendadas para materiais com diferentes valores de rigidez, geralmente usados quando se busca um estudo comparativo. Na norma para testes de flexão [24], as dimensões para termoplásticos são especificadas. As amostras de tração contêm a espessura de 4 mm e as amostras de flexão contêm espessura de 3,2 mm. Amostras de Nylon 6 foram feitas por usinagem convencional e amostras de ABS e PLA foram obtidas por meio de impressão 3D FDM.

Todas as amostras de ABS e PLA foram impressas com porcentagem de material de enchimento de 100%, a fim de atingir a resistência máxima à tração. Além disso, todas as amostras de manufatura aditiva foram impressas com orientação de ângulo de 45°. A escolha desta orientação se deve ao fato de que, por mais que como regra geral, as melhores propriedades mecânicas sejam obtidas quando os filamentos são orientados paralelamente (longitudinal) à direção de carregamento, a variação da orientação permite obter-se diferentes comportamentos mecânicos para diferentes materiais [1]. Desta forma, optou-se por uma orientação a qual considerou-se mediana entre os materiais a serem testados para se obter equilíbrio na influência das propriedades de todas as amostras. A geometria e as dimensões finais (mm) das amostras estão resumidas na Figura 1.

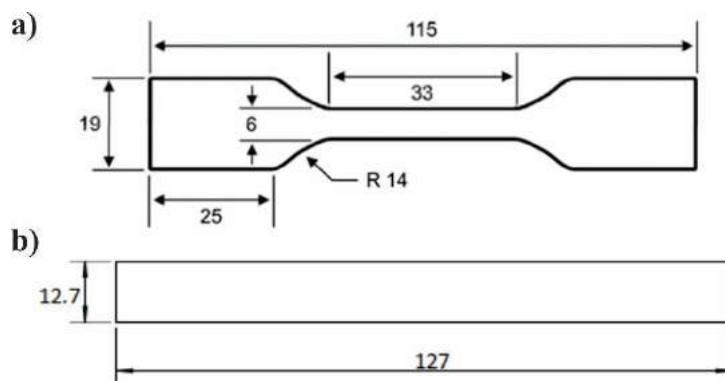


FIGURA 1. Representação esquemática com dimensões (mm) das amostras para (a) tração e (b) ensaios de flexão.

A avaliação da possibilidade de uso de um determinado material em aplicações industriais é importante. Nesse caso, a densidade é uma variável a ser considerada. Os sistemas mecânicos, assim como os elementos estruturais, quando leves, tendem a cumprir sua função de forma mais eficiente, dispensando tensões excessivas que podem encurtar sua vida útil. Para avaliar a densidade específica média dos corpos de prova confeccionados, a massa de cada um foi medida com o auxílio de uma balança de precisão Bioscale, modelo FA2204, com resolução de quatro casas decimais e o resultado dividido pelo seu volume.

Inicialmente, as amostras de flexão e tração foram projetadas no software SolidWorks® e exportadas no formato STL, em seguida, importado para a impressora 3D para fabricação. As amostras para ensaios de tração e flexão são mostradas na Figura 2 e Figura 3, respectivamente.

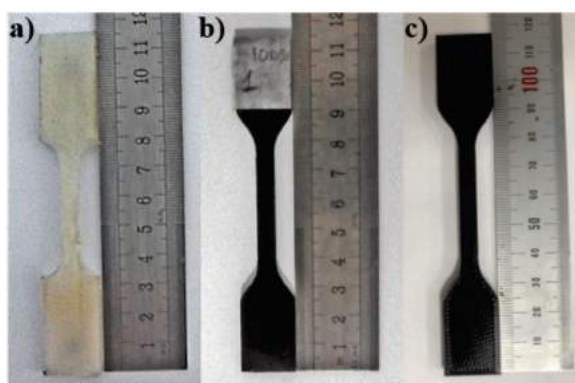


FIGURA 2. Amostras para ensaios de tração: a) Nylon 6; b) ABS e c) PLA.

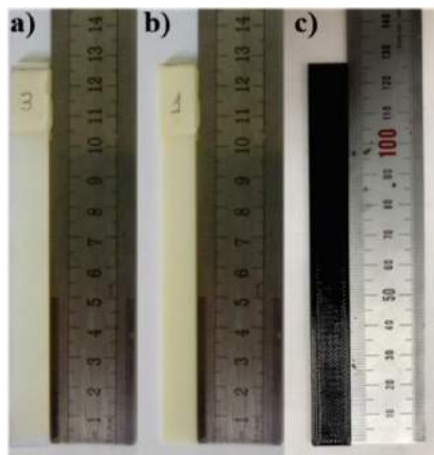


Figura 3. Amostras para ensaios de flexão: a) Nylon 6; b) ABS e c) PLA.

Todos os ensaios foram realizados na máquina de ensaios universal EMIC, modelo DL30000, com célula de carga de 100 kN. Para os ensaios de tração, cinco amostras foram testadas a uma velocidade de teste de 5 mm/min. É necessário garantir que a amostra esteja firmemente presa às garras para que não haja escorregamento e, conseqüentemente, uma leitura incorreta do alongamento. Para flexão, o ensaio de 3 pontos foi realizado em que a carga aumenta no ponto central da amostra. Cinco amostras foram ensaiadas com uma velocidade transversal de 2 mm/min e uma distância entre os suportes de 51,2 mm.

O cálculo do módulo de elasticidade é dado pela Equação (1), onde E é o módulo de elasticidade, σ a variação da tensão no regime elástico, $\Delta\chi$ a deformação proporcional à tensão e L é o comprimento útil da amostra.

$$E = \Delta\sigma / (\Delta\chi/L) \quad (1)$$

O cálculo da resistência à tração é dado pela Equação (2), onde σ_{max} é o limite da resistência à tração, F_{max} é a força máxima aplicada ao corpo de prova e A é a área da seção transversal da amostra. Para encontrar a tensão de ruptura, a mesma equação é aplicada, porém a força utilizada é a força no momento da ruptura.

$$\sigma_{max} = F_{max} / A \quad (2)$$

A tensão de flexão é encontrada na Equação (3), onde σ_f é a tensão de flexão, P é a carga de teste, L é a distância entre os apoios, b é a largura da amostra e d é a espessura da amostra.

$$\sigma_f = (3PL) / (2bd^2) \quad (3)$$

A deformação é calculada pela Equação (4), onde ϵ_f é a deformação de flexão e D o deslocamento do corpo de prova durante o teste. Por meio do gráfico tensão-deformação, encontram-se os valores do módulo de elasticidade em flexão, limite de resistência à flexão e flexão na ruptura.

$$\epsilon_f = (6Dd) / (L^2) \quad (4)$$

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos, bem como a comparação entre as propriedades dos materiais estudados.

3. RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados, comparados e discutidos os resultados da densidade específica, bem como as análises dos ensaios mecânicos dos materiais testados. Além disso, serão analisadas algumas ocorrências relacionadas ao comportamento de fratura das amostras, bem como escorregamento durante alguns ensaios mecânicos.

3.1. Densidade específica

Na Tabela 1 são apresentados os valores de densidade específica das amostras preparadas para serem submetidas aos ensaios mecânicos.

TABELA 1. Valores de densidade específica (g/cm^3) para amostras ensaiadas.

Material / Valores médios (g/cm^3)	Densidade específica (g/cm^3)	Desvio padrão
Nylon 6	1,4593	0,0581
ABS	1,1912	0,0154
PLA	1,4144	0,0183

Em relação às densidades calculadas para os materiais das amostras ensaiadas, observou-se proximidade entre os valores apresentados em pesquisas anteriores, e as densidades amostrais do Nylon 6 [5], ABS [1,5] e PLA [20,21,27]. É importante notar que o desvio padrão observado para as amostras de Nylon 6 foi maior do que para outros materiais. Como as amostras de ABS e PLA foram fabricadas por impressão 3D, elas possuem maior precisão dimensional e geométrica (e, conseqüentemente, de massa) do que as amostras de Nylon 6, que foram fabricadas por usinagem convencional.

3.2. Ensaios mecânicos

O comportamento das amostras de Nylon 6, ABS e PLA, ao longo dos ensaios de tração e flexão, são apresentados na Figura 4, Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

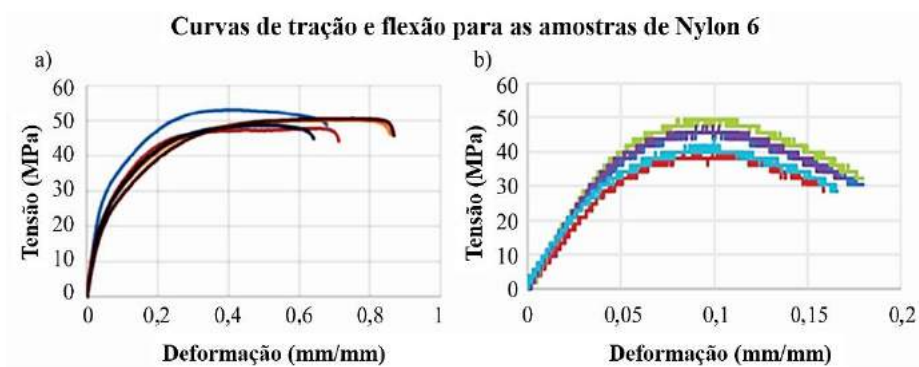


Figura 4. Comportamento de amostras de Nylon 6 para ensaios de a) tração e b) flexão.

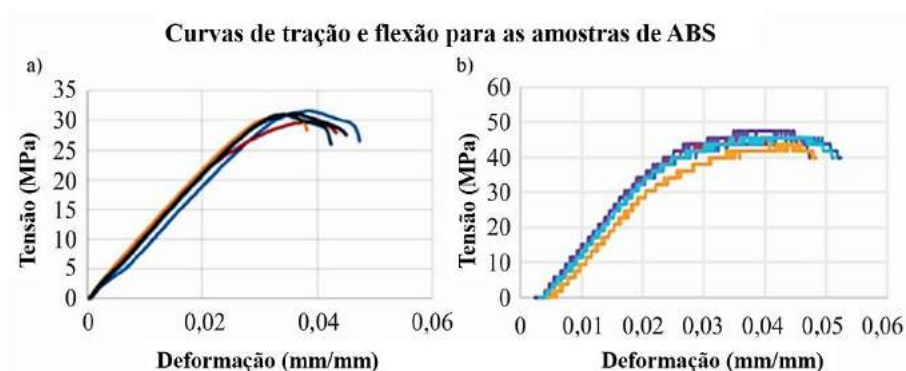


Figura 5. Comportamento de amostras de ABS para ensaios de a) tração e b) flexão.

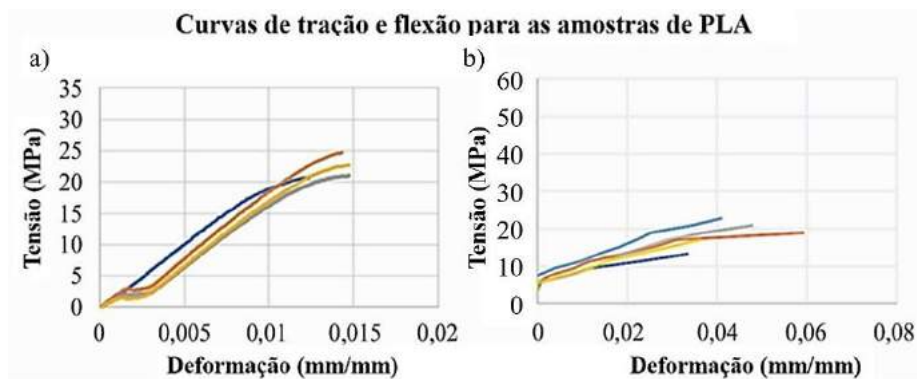


Figura 6. Comportamento de amostras de PLA para ensaios de a) tração e b) flexão.

O regime plástico do Nylon 6 foi iniciado antecipadamente em comparação ao ABS e PLA, esse comportamento conduziu a um módulo de elasticidade inferior, entre os materiais testados, o que está de acordo com estudos anteriores [8]. Isso pode ser devido às características de alta sensibilidade às taxas de deformação desses polímeros. Ao comparar esses estudos, observa-se que as tensões suportadas pelo Nylon 6 são muito próximas às do ABS, porém com alguma dispersão.

As propriedades mecânicas verificadas para os materiais de impressão 3D estão de acordo com estudos anteriores [6,13]. Ao contrário dos corpos de prova de Nylon 6, os corpos de prova de ABS e PLA foram produzidos por injeção, portanto, livres dos erros inerentes aos processos de usinagem. Observa-se um maior valor de resistência à tração do Nylon 6, bem como uma alta capacidade de deformação. Em contraste, o ABS e o PLA atingiram a fratura muito mais rápido. O PLA apresentou um comportamento mais frágil, exigindo menos tensão para falhar e apresentando menos deformação. Os materiais ABS e PLA apresentaram menor dispersão de valores nos ensaios, devido à maior precisão dimensional deste processo de fabricação, sendo milimetricamente idênticos.

Observa-se que os valores de tensões de flexão para o ABS foram próximos aos obtidos para o Nylon 6 e estão de acordo com estudos anteriores [6,8], sendo que o PLA apresentou valores menores. Isso pode ter ocorrido pelos mesmos motivos do ensaio de tração. É notável que existe uma diferença considerável entre os valores de deformação dos materiais. O Nylon 6 e ABS obtiveram valores muito maiores que o PLA, mesmo quando este último atingiu a tensão de ruptura. O PLA apresentou a menor deformação dos três materiais, confirmando sua característica de menor ductilidade (mais frágil). Assim como no ensaio de tração, a dispersão de PLA e ABS foi menor em relação ao Nylon 6, neste último caso porque a célula de carga de 100 kN não tem sensibilidade para avaliar a evolução da força aplicada.

A Tabela 2 confirma o comportamento dos materiais estudados durante os ensaios mecânicos e resume os valores médios das tensões máximas, bem como seus respectivos desvios-padrão. Além disso, são apresentadas as deformações totais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração e flexão. Os valores calculados do módulo de elasticidade, bem como sua dispersão, também estão presentes.

TABELA 2. Valores-limite para resistência à tração e flexão dos materiais ensaiados.

Valores médios / Material	Nylon 6	ABS	PLA
Módulo de elasticidade (MPa)	774,23	1075,12	1762,07
Desvio padrão	16,8	8,34	6,76
Resistência à tração (MPa)	50,1725	30,9619	22,2613
Desvio padrão	3,99	2,25	1,84
Deformação total	75,17%	4,33%	1,40%
Desvio padrão	0,1046	0,0034	0,0011
Resistência à flexão (MPa)	45,2065	45,5864	18,6144
Desvio padrão	8,08	2,94	3,65
Deformação total	17,09%	4,82%	4,45%
Desvio padrão	0,0091	0,0041	0,0103

A princípio, esperava-se que o módulo de elasticidade do Nylon 6 fosse maior do que o dos demais polímeros (ABS e PLA), conforme demonstrado em estudos anteriores [8,9]. Isso se deve ao fato das características mecânicas do polímeros são altamente sensíveis à taxa de deformação [25]. Porém, com base no comportamento dos materiais durante os ensaios de tração e flexão, o PLA apresentou o maior valor para o módulo de elasticidade. Este não foi tão alto quanto o encontrado em alguns estudos anteriores [18,21,26], no entanto, é consistente em comparação com os outros materiais testados [27]. Os maiores valores observados nas pesquisas, anteriormente citadas, podem estar relacionados à estratégia de impressão, visto que, de maneira geral, amostras com rota de deposição longitudinal em relação ao comprimento apresentam maior resistência mecânica [1] do que para deposição na orientação de ângulo de 45°, como é o caso das amostras da presente pesquisa. Outro fator que provavelmente contribuiu para essa diferença é que muitas das pesquisas recentes não aplicam o polímero puro, mas sim, um compósito a partir dele.

Esse resultado corrobora o comportamento mais frágil desse material, entre os três estudados. O PLA foi o polímero que apresentou menor comportamento dúctil durante os ensaios mecânicos, praticamente, não passando pelo regime plástico. Este atingiu, praticamente, o dobro do valor verificado para o outro material aplicado na manufatura aditiva neste estudo (ABS) que também apresentou conformidade com a literatura [15]. O Nylon 6 e o ABS apresentaram valores de módulo de elasticidade mais próximos entre si, isso se deve à semelhança do comportamento dúctil desses dois materiais ao longo dos ensaios mecânicos, comprovando que ambos possuem rigidez aproximada.

Pode-se verificar que o Nylon 6 ainda é o polímero com maior resistência à tração, embora, junto com isso, este material tenha a maior taxa de deformação. Os valores obtidos para este material estão de acordo e/ou até um pouco superiores aos de pesquisas anteriores [1,5,8]. Dentre os três materiais estudados, o ABS foi o que apresentou valores medianos de resistência à tração, porém com um valor consideravelmente baixo de taxa de deformação, por mais que este polímero apresente comportamento dúctil. Esses dados estão de acordo com pesquisas anteriores [1,5,15,16]. O PLA foi o polímero com os menores valores de resistência à tração, mesmo abaixo dos valores encontrados em pesquisas anteriores [18,20,21,22]. Esse comportamento pode estar associado ao fato de este material ter o comportamento mais frágil entre os três, o que pode, também, ser evidenciado pelo seu baixo índice de deformação.

Com relação aos testes de flexão, o Nylon 6 e o ABS apresentaram valores médios equivalentes de tensão máxima. No entanto, o Nylon 6 apresentou uma taxa de deformação consideravelmente maior, como ocorreu em relação aos ensaios de tração, devido ao seu comportamento muito dúctil. O fato de o ABS apresentar valores de resistência à flexão semelhantes aos observados em pesquisas anteriores [15,17] e semelhantes aos do Nylon 6, porém, com deformação muito menos acentuada pode ser benéfico no sentido de permitir seu uso em aplicações nas quais não se exige tensões muito severas. Isso torna o ABS um forte candidato para substituir o Nylon 6 em algumas aplicações de engenharia. O PLA, novamente, foi o polímero que apresentou menores valores de resistência à flexão, sendo quase metade dos valores obtidos pelos outros dois materiais estudados. Os valores de resistência à tração e flexão tendem a tornar o PLA aplicável apenas em situações de baixa carga, uma vez que não suporta altas tensões. Porém, para estes casos, especificamente, por o PLA ser um material biodegradável, pode revelar-se uma boa opção de escolha, pois, assim, pode-se garantir que este polímero não irá falhar devido às cargas leves aplicadas e, também, garantindo a sustentabilidade do projeto, agredindo o menos possível o meio ambiente.

3.3. Análises de fratura e deslizamento

Além da análise da densidade específica e das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração e flexão, outros fenômenos foram observados ao longo do procedimento experimental. Estes se referem a algumas análises das condições de fratura e deslizamento das amostras testadas, que são relatadas e discutidas neste tópico.

A ruptura dos corpos de prova testados ocorreu na seção útil para todas as amostras testadas. Das cinco amostras de PLA preparadas para ensaio de tração, uma delas não pode ser testada pelo fato de que, devido ao seu comportamento frágil, ter quebrado durante a fixação nas pinças da máquina de ensaios. A Figura 7 apresenta as amostras de PLA testadas para resistência à tração.



Figura 7. Comportamento à fratura de amostras de PLA para ensaio de tração.

Na maioria dos casos, a fratura de um componente termoplástico é dúctil devido à reorientação e alongamento das macromoléculas semelhantes a fios que permitem alta deformação no material [28,29]. Este comportamento esperado foi observado para a maior parte das amostras de Nylon 6 e ABS (Figura 4 e Figura 5). Porém, no caso das amostras de PLA, devido à característica mais frágil desse material [29], as amostras testadas praticamente não sofreram a fase plástica, conforme já indicado na Figura 6.

Além disso, foi observado durante o ensaio de flexão que a carga não desceu de forma linear. Houve uma certa inclinação que, aliada à baixa velocidade do ensaio, ocasionou pequenos escorregamentos nos corpos de prova (Figura 8). Outra razão provável para isso é porque a superfície lisa das amostras resultou no seu escorregando, tanto em relação à garra como do suporte da amostra. Esse fenômeno já havia sido observado em pesquisas anteriores [30].

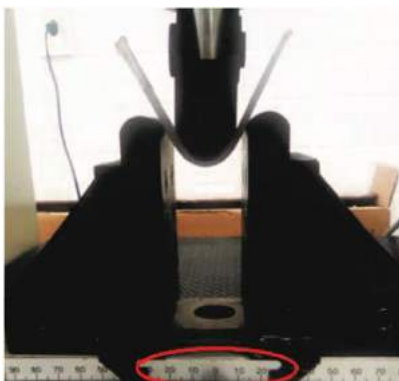


Figura 8. Distância entre os suportes da amostra durante os ensaios de flexão.

A distância entre os suportes de amostra é de 51,2mm, aproximando-se da largura do aplicador de carga. Para evitar a colisão com os apoios devido a esta inclinação, foi necessário movimentar os apoios para a esquerda, variando entre 29,2 mm à esquerda da origem e 22mm à direita da origem. O efeito desses deslizamentos pode ser observado nas curvas de flexão das Figuras 4, Figura 5 e Figura 6, bem como o valor do desvio padrão para os valores de resistência à flexão, apresentados na Tabela 2, que foram maiores que os observados para a resistência à tração.

A partir dos resultados apresentados, bem como da sua análise a partir da comparação com estudos semelhantes, serão apresentadas as considerações finais que encerram esta pesquisa.

4. CONCLUSÃO

Uma comparação entre as propriedades mecânicas do Nylon 6, um polímero de engenharia comumente aplicado na indústria, e do ABS e PLA, polímeros mais aplicados em processos de manufatura aditiva, foi investigada neste estudo. Esta comparação teve como objetivo avaliar a possibilidade de utilização de peças fabricadas por impressão 3D (com seus materiais característicos) em aplicações industriais, em substituição aos

polímeros normalmente selecionados. Assim, vantagens como alta precisão dimensional e menor disposição de resíduos podem ser obtidas. As seguintes conclusões podem ser tiradas com base nas descobertas deste estudo:

- Nylon 6 é o material com maior densidade entre os três testados, incluindo a maior dispersão de valores. Os outros dois materiais (ABS e PLA) possuem densidades semelhantes, com menor dispersão.
- PLA é o material com maior módulo de elasticidade (rigidez) devido à sua baixa ductilidade. Seguindo a ordem decrescente de rigidez, seguem o ABS e, por último, o Nylon 6.
- O Nylon 6 apresentou maiores valores de resistência à tração, com maiores deformações, seguido do ABS e PLA, apresentando menor dispersão.
- Para flexão, o Nylon 6 e o ABS suportaram tensões semelhantes, mas com deformações maiores para o primeiro. O PLA apresentou um comportamento frágil, mas com tensões menores.
- A aplicação do ABS em substituição ao Nylon 6 torna-se possível no caso de peças com geometria complexa e baixos carregamentos, devido à sua baixa densidade e boa resistência.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento ao Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) pelo apoio nos ensaios mecânicos dos materiais estudados.

REFERÊNCIAS

- [1] Dizon, John Ryan C.; Espera, Alejandro H.; Chen, Qiyi; Advincula, Rigoberto C.. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 2018. [s.l.], Elsevier BV. v. 20, p. 44-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
- [2] Berman, Barry. 3-D printing: the new industrial revolution: The new industrial revolution. *Business Horizons*. 2012. [s.l.], Elsevier BV. v. 55, n. 2, p. 155-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- [3] Gao, Wei; Zhang, Yunbo; Ramanujan, Devarajan; Ramani, Karthik; Chen, Yong; Williams, Christopher B.; Wang, Charlie C.L.; Shin, Yung C.; Zhang, Song; Zavattieri, Pablo D.. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 2015. [s.l.], Elsevier BV. v. 69, p. 65-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- [4] Leon, Al C. de; Chen, Qiyi; Palaganas, Napolabel B.; Palaganas, Jerome O.; Manapat, Jill; Advincula, Rigoberto C.. High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *Reactive And Functional Polymers*. 2016. [s.l.], Elsevier BV. v. 103, p. 141-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.04.010>.
- [5] Tanikella, Nagendra G.; Wittbrodt, Ben; Pearce, Joshua M.. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Additive Manufacturing*. 2017. [s.l.], Elsevier BV. v. 15, p. 40-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.005>.
- [6] Tymrak, B.M.; Kreiger, M.; Pearce, J.M.. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*. 2014. [s.l.], Elsevier BV. v. 58, p. 242-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>.
- [7] Martinez, Andressa Carmo Pena; Souza, Douglas Lopes de; Santos, Denise Mônico dos; Pedroti, Leonardo Gonçalves; Carlo, Joyce Correna; Martins, Marianna Auxiliadora Dias. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. 2019. [s.l.], Universidade de Sao Paulo, USP Academic Information Management Agency (AGUIA). v. 14, n. 1, p. 125-141, 6. Brazilian. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289>.
- [8] Valera, T.S. et al. Propriedades do Compósito Poliamida-6/Vidro em pó. In: Anais of 14 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. São Pedro – SP. 2000. 49401-49411. Brazilian.
- [9] Hamid, Farizah; Akhbar, Suffiyana; Halim, K.H. Ku. Mechanical and Thermal Properties of Polyamide 6/HDPE-g- MAH/High Density Polyethylene. *Procedia Engineering*. 2013. [s.l.], Elsevier BV.; v. 68, p. 418-424. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.201>.
- [10] Leite, Amanda Melissa Damiano; Araujo, Edcleide Maria; Paz, Rene Anisio da; Pereira, Osanildo Damiano; Lira, Hélio Lucena; Ito, Edson Noriyuki. Structure and mechanical properties of polyamide 6 Brazilian clay nanocomposites. *Materials Research*. 2009. [s.l.], FapUNIFESP (SciELO). v. 12, n. 2, p. 165-168. <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392009000200009>.

- [11] Chow, W. S.; Ishak, Z. A. Mohd. Mechanical, morphological and rheological properties of polyamide 6 Organo-montmorillonite nanocomposites. *Express Polymer Letters* 2007. [s.l.], Department of Polymer Engineering, Scientific Society of Mechanical Engineering.; v. 1, n. 2, p. 77-83. Brazilian. <http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2007.14>.
- [12] Malhotra, S.K.; Goda, K; Sreekala, M.S.. *Part One Introduction to Polymer Composites*. In: Polymer Composites. 1st ed.1. Wiley-VCH. 2012.
- [13] Wang, Xin; Jiang, Man; Zhou, Zuowan; Gou, Jihua; Hui, David. 3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective. : A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2017. [s.l.], Elsevier BV. v. 110, p. 442-458. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- [14] Bates-Green, K., Howie, T. *Materials for 3D Printing by Fused Deposition*. Edmonds Community College. 2017. 21p
- [15] Zieman, C.; Sharma, M.; Zieman, S. *Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling*, IntechOpen, USA. 2012.159-180.
- [16] Cantrell, Jason T.; Rohde, Sean; Damiani, David; Gurnani, Rishi; Disandro, Luke; Anton, Josh; Young, Andie; Jerez, Alex; Steinbach, Douglas; Kroese, Calvin. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2017. [s.l.], Emerald. v. 23, n. 4, p. 811-824. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-03-2016-0042>.
- [17] Divyathej, M V; Varun, M; Rajeev, P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Volume 7. Issue 3. 116-124.
- [18] Jacobsen, S.; Fritz, H. G.; Degée, PH.; Dubois, PH.; Jérôme, R.. Polylactide (PLA)-a new way of production. *Polymer Engineering & Science*. 1999. [s.l.], Wiley. v. 39, n. 7. p. 1311-1319. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11518>.
- [19] Bergström, Jörgen S.; Hayman, Danika. An Overview of Mechanical Properties and Material Modeling of Polylactide (PLA) for Medical Applications. *Annals Of Biomedical Engineering*. 2015. [s.l.], Springer Science and Business Media LLC. v. 44, n. 2, p. 330-340. <http://dx.doi.org/10.1007/s10439-015-1455-8>.
- [20] Mathew, Aji P.; Oksman, Kristiina; Sain, Mohini. Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *Journal Of Applied Polymer Science*. 2005. [s.l.], Wiley. v. 97, n. 5, p. 2014-2025. <http://dx.doi.org/10.1002/app.21779>.
- [21] Farah, Shady; Anderson, Daniel G.; Langer, Robert. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016. [s.l.], Elsevier BV. v. 107, p. 367-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
- [22] Södergård, Anders; Stolt, Mikael. Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition. *Progress In Polymer Science*. 2002. [s.l.], Elsevier BV. v. 27, n. 6, p. 1123-1163. [http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700\(02\)00012-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700(02)00012-6).
- [23] ASTM D638-14, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [24] ASTM D790-16, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2016
- [25] Callister Jr., William D. *Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução*. (ed.) LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro. 2002. Brazilian.
- [26] Chacón, J.M.; Caminero, M.A.; García-Plaza, E.; Nñez, P.J.. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*. 2017. [s.l.], Elsevier BV. v. 124, p. 143-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.
- [27] Lanzotti, Antonio; Grasso, Marzio; Staiano, Gabriele; Martorelli, Massimo. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*. 2015. [s.l.], Emerald. v. 21, n. 5, p. 604-617. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-09-2014-0135>.
- [28] Banjanin, Bojan; Vlastic, Gojko; Pál, Magdolna; Balos, Sebastian; Dramicanin, Miroslav; Rackov, Milan; Knezevic, Ivan. Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology. *Matéria* (Rio de Janeiro). 2018. [s.l.], FapUNIFESP (SciELO). v. 23, n. 4, p. 1-15. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0584>.

- [29] Perez, Angel R. Torrado; Roberson, David A.; Wicker, Ryan B.. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. *Journal Of Failure Analysis And Prevention* 2014. [s.l.], Springer Science and Business Media LLC. v. 14, n. 3, p. 343-353. <http://dx.doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>.
- [30] Ibrahim, Yehia; Melenka, Garrett W.; Kempers, Roger. Fabrication and tensile testing of 3D printed continuous wire polymer composites. *Rapid Prototyping Journal*. 2018. [s.l.], Emerald. v. 24, n. 7, p. 1131-1141. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-11-2017-0222>.



Artigo

O uso do sensor RGB TCS3200 em arduino, aplicado a esteira seletora por cor

Gabrielle Roveratti^[1], Adriano de Araújo Feitosa^[2] e Jhonatan Wiliam Galera^[3]

^[1] Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, IGCE - UNESP; gabbyroveratti@gmail.com

^[2] Centro universitário Claretiano; adrianodeaf@gmail.com

^[3] Centro universitário Claretiano; jhonatan@gmail.com

Recebido: 19/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica acerca do uso e aplicação do sensor RGB TCS230, utilizando arduino. Este trabalho é um relato de uma de suas inúmeras aplicações: esteira seletora de cor, com enfoque apenas no teste de seu uso. Foram feitos testes e experimentos a respeito do funcionamento do referido sensor e seu comportamento. Vários ensaios foram realizados para determinar a aplicabilidade e o funcionamento do sensor RGB na linguagem do Arduino. Foi possível verificar a eficácia do sensor, assim como a sua margem de tolerância, o sensor mostrou-se funcional, em aplicações na qual as cores a serem detectadas no espectro não são próximas. Após estes ensaios terem sido realizados, constatou-se que esse sensor não é a melhor opção para tal finalidade, sendo útil apenas se for utilizado sozinho, sem nenhuma integração com outro módulo.

Palavras-chave: Arduino, TCS230, Programação, Experimentação.

Abstract: The present paper consists of a literature review about the use and application of the RGB TCS230 sensor, using arduino. This study is a report of one of its numerous applications: color selector mat, it focuses only on the test of its use. Tests and experiments were conducted regarding the functioning of this sensor and its behavior. Several tests were performed to determine the applicability and functioning of the RGB sensor in the arduino language. It was possible to verify the effectiveness of the sensor, as well as its tolerance margin, the sensor proved functional, in applications in which the colors to be detected in the spectrum are not close. After these tests have been performed, it was found that this sensor is not the best option for this purpose, it just being useful only if it is used alone, without any integration with another module.

Key-words: Arduino, TCS230, Programming, Experimentation.

1. INTRODUÇÃO

A classificação (seleção) de cores, como o nome sugere, é simplesmente selecionar o produto escolhido no uso da esteira, de acordo com sua cor. Isto pode ser facilmente realizado apenas olhando para ele, mas quando há muitos produtos para serem classificadas sendo uma tarefa repetitiva, faz com que máquinas de triagem automática de cores são muito úteis. Estas máquinas têm o sensor da cor projetado para detectar a cor de todos os objetos e, após ocorrer à detecção, a “esteira” do servo motor da respectiva cor direcionada o produto para o local da cor correspondente a ele. Pode ser usado em diferentes áreas de aplicação onde a identificação, distinção e a classificação da cor são importantes como, por exemplo, indústria agrícola (classificação de grãos com base na cor), indústria de alimentos, indústria mineradoras e de diamantes e reciclagem, não se limitando apenas a estas.

Quanto à cronologia do uso de dispositivos sensíveis a luz ou qual foram suas aplicações pioneiras, não há informações consistentes, como dito por [1]. Embora [2], façam a ponte com a atualidade desta tecnologia, a qual vem sendo amplamente usada para a avaliação e controle de qualidade de vários produtos. [3] descreve que a principal utilização desta tecnologia como dependente da extração de informações da aquisição de imagens

acerca da qualidade do produto em questão. Também, neste mesmo paper, considera que esta tecnologia é precisa, não destrutiva, consistente, rápida, de baixo custo, além de ser uma tecnologia emergente recente [4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11].

No mesmo artigo é exemplificado o uso de sensor RGB na indústria de alimentos devido à facilidade da análise de imagem e baixo custo [2] com, por exemplo, seleção de maçãs [12], seleção de tamarindos doces [13], gradação de maçãs [14], gradação de morangos [15], defeitos em maçãs [16,17] e defeitos em frutas cítricas [18, 19].

Outra aplicação mais rentável se dá, como apontado por [20] na criação do KINECT para a indústria do entretenimento, sendo criado, inicialmente, para ser um substituto dos controles manuais de consoles em jogos virtuais. Atualmente, há uma ampla utilização dos recursos ali contidos, como exemplificado [21] os quais acoplaram a câmera RGB do dispositivo e a câmera de profundidade a um Arduino, tornando possível o controle de um braço robótico através de movimentos com as mãos.

[22] criaram uma interface homem-computador capaz de reconhecer os movimentos da Linguagem Brasileira de Sinais e de transformá-los em áudio ou texto, através do reconhecimento de imagens e movimentos. Já [23] utilizam sensor RGB na medição da tornando possível o monitoramento remoto da densidade de plânctons em oceanos. Esse sensor pode até mesmo ter uma aplicação mais complexa em sistemas com inteligência artificial, em visão artificial ou aprimorar sistemas de leituras de imagens, como demonstrado por [24] que desenvolveram um sistema para reconhecer as estruturas geométricas de um ambiente, através de modelos matemáticos para reconhecimento e processamento de imagens com profundidade.

Como explicado por [25], várias são as razões para as quais esses novos sensores passam a ter um melhor funcionamento para com novos materiais e designs coloridos das embalagens. O motivo primordial é a utilização de um amplo espectro de luz, garantindo a existência de diferenças satisfatórias entre os níveis de luz incidente da marca de cor e os níveis refletidos da embalagem brilhante, proporcionando uma maior precisão na detecção de cor mesmo em embalagens de depósito de vapores em alumínio brilhante.

O funcionamento deste sensor se assemelha ao olho humano, o qual percebe o espectro de cores da luz visível (de 4.10^{-7} nm a 7.10^{-7} nm) usando uma combinação da informação vinda de células específicas localizadas no olho, chamadas de cones e bastonetes. Os bastonetes são mais adaptados para situações de pouca luz, porém, eles somente detectam a intensidade da luz. Já os cones, por outro lado, são as células que se assemelham ao sensor TSC3200, pois, funcionam melhor com intensidades maiores de luz e são capazes de discernir as cores que enxergamos (e que o sensor detecta), através da frequência emitida por cada uma delas. Existem três tipos de cones nos nossos olhos, cada um, especializado em comprimentos de luz curtos (S - B [Blue/Azul], no caso do sensor), médios (M - G [Green/Verde], sensor) ou longos (L - R [Red/Vermelho], sensor) [26]. O conjunto de sinais possíveis dos três tipos de cones define as cores que conseguimos ver e se encontram na Figura 1 abaixo.

Cada tipo de célula não só acaba por ser especializada em uma cor, mas também possui níveis variáveis de sensibilidade ao longo de um comprimento de onda. É possível notar também como a percepção humana de cores é mais sensível a luz na região amarelo-verde do espectro; essa informação acaba sendo utilizada nas chamadas "bayer arrays" nas câmeras digitais modernas [26].

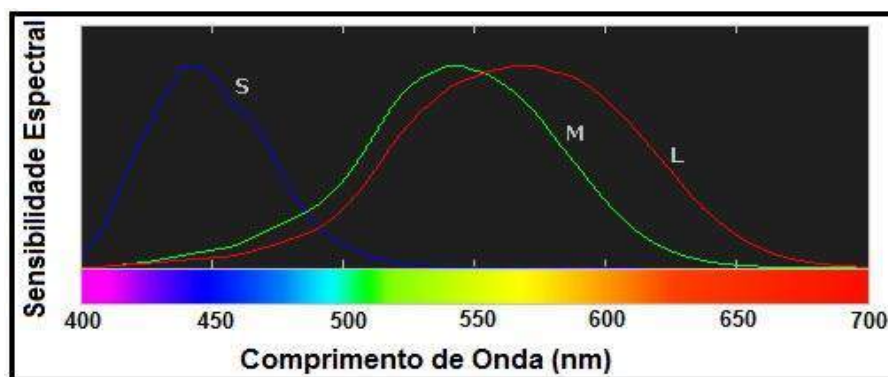


FIGURA 1. Sensibilidade relativa aos cones x frequência da luz visível [26].

Praticamente todas as cores visíveis podem ser produzidas utilizando alguma mistura de cores primárias por combinação aditiva ou subtrativa. O processo aditivo cria cores adicionando luz a um fundo preto, o

processo subtrativo usa pigmentos ou tinturas para, seletivamente, bloquear a luz branca. A compreensão de cada um desses processos é a base fundamental para entender a reprodução de cores [26].

A composição de cores se dá pela adição das cores primárias (Azul, Verde e Vermelho), que, quando misturadas, resultam nas cores conhecidas. Os monitores de computador, por exemplo, emitem luz para produzir cores através do processo aditivo; impressoras, por outro lado, usam tinta, ou pigmento, para absorver a luz, através do processo subtrativo. É por isso que a grande maioria de monitores usa uma combinação de pixels vermelho, verde e azul (o que é comumente chamado de RGB, do inglês "red, green and blue"). As impressoras, por sua vez, usam (pelo menos) tintas das cores ciano, magenta e amarelo (o que é chamado de CMY, do inglês "cyan, magenta and yellow"). Muitas impressoras também utilizam a tinta preta (abreviado, nesse caso, por CMYK, onde o K vem de "black"), já que uma combinação de CMY não é capaz de produzir preto profundo [26].

O funcionamento deste módulo de sensor de cor RGB é baseada no chip TCS230, o qual converte a 'cor' da luz em frequência ao filtrar os dados RGB da fonte de luz e convertê-los em uma onda quadrada (50% duty cycle) com frequência diretamente proporcional à intensidade da luz (irradiância). A frequência de saída em escala cheia pode ser escalonada por um dos três valores pré-definidos através de dois pinos de entrada de controle SO e S1, com opções selecionáveis 2%, 20%, 100% de frequência. Já os pinos S2 e S3 controlam o filtro de RGB. As entradas e saídas digitais permitem interface com um microcontrolador ou outro circuito lógico. O pino Output Enable (OE) coloca a saída em estado de alta impedância para o uso de vários sensores em apenas uma linha de entrada do microcontrolador. O utilizador pode calcular a cor da luz emitida por valores RGB [27].

Diante do exposto acima e de todas as possíveis aplicações, desde as mais simples e diretas até as mais complexas e elaboradas, fazendo-se necessário modelos de cálculos vetoriais específicos, bem como as implementações que utilizam sensores e controladores industriais, entende-se a necessidade do conhecimento dos princípios básicos e funcionamento destes sistemas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho está inserido dentro do que ficou conhecido como "a cultura do faça você mesmo (Cultura Makers)". Inicialmente, realizou-se uma pesquisa para a definição de qual sensor detector seria utilizado no projeto de uma esteira selecionadora de cor, foram encontrados algumas possibilidades de sensores. Assim sendo, fez-se necessário a criação de alguns critérios que nortearam a escolha do sensor: integração com arduino, baixo custo, facilidade de ser encontrado no mercado, quantidade significativa de material disponível na internet e uma precisão razoável.

O datasheet dos módulos mostrou-se ser uma importante fonte de informação e facilitador de escolha. A partir dessa análise, foi possível identificar as principais características de alguns módulos, os recursos necessários para iniciar uma aplicação de forma rápida, bem como os conhecimentos necessários para iniciar o desenvolvimento de algum projeto. Posteriormente, as características elétricas, foram verificadas, a fim de se averiguar a compatibilidade com o arduino.

Optou-se pelo sensor TCS3200 pois, inicialmente, e se baseando nos critérios mencionados acima, ele os atendia, possibilitando o andamento do projeto. A fim de seguir as ideias da cultura do "faça você mesmo" realizou-se uma pesquisa em sites, blogs e bancos de dados/artigos acadêmicos, e a partir desta pesquisa, escolheu-se um projeto para ser replicado, e a partir da réplica, pretendia-se desenvolver um novo projeto, com características próprias para uma esteira selecionadora de cor.

O projeto a ser usado como referência foi selecionado entre uma infinidade de projetos, os critérios que nortearam a escolha foram: a documentação do projeto, a disponibilidade do diagrama eletrônico, detalhamento do diagrama eletrônico, disponibilidade do código, bibliotecas e detalhamento de todo algoritmo. O projeto escolhido para ser utilizado como referência, tinha como hardware dois servomotores, uma fonte compatível com arduino (modelo Mega, como ilustrado na Figura 2), uma esteira e um módulo TCS3200 (Figura 2).



FIGURA 2. Componentes utilizados. A direita, Arduino Mega e a esquerda, o sensor TCS230 (Autoria própria, 2019).

Antes da montagem do hardware, foram realizados alguns teste com os módulo TCS3200, a fim de averiguar a integração do sensor com o arduino e a sua confiabilidade do código base. Na primeira análise verificou-se que o código era executado sem erros pelo arduino, constatou-se que o código funcionava de forma correta, conforme havia sido descrito no site. Já para a segunda análise feita, pretendia-se verificar se as “leituras” das cores ocorria de fato.

Seguindo o detalhamento do diagrama eletrônico, montou-se uma parte do hardware (arduino+módulo TCS3200) para teste de integração dos componentes e verificação das leituras o que acabou mostrando-se inconsistente, visto que as leituras eram divergentes com as do site. É importante ressaltar que fez-se a verificação de todas as conexões eletrônicas, a fim de eliminar o fator de mau contato ou alguma falha de montagem do circuito.

Em uma pesquisa na bibliografia de projetos similares verificou-se de que diversas pessoas que trabalhavam ou trabalharam com o sensor TCS3200, relataram a mesma falha. A medida que a pesquisa foi sendo refinada, descobriu-se que não era uma falha, mas as característica do sensor que causava leituras divergentes. O módulo TCS3200 é muito sensível a luz ambiente, e a componente infravermelha da luz ambiente altera a leitura da cor.

Algumas tentativas de aprimoramento das leituras foram realizadas e, em laboratório, mostraram-se relativamente satisfatórias, como isolar o sensor em uma caixa, deixando somente um orifício aberto na parte superior (Figura 3), seguiu-se o desenvolvimento do projeto mecânico da esteira. Paralelamente, buscava-se uma solução que atenuassem os efeitos da sensibilidade do módulo TCS3200 em relação a luz ambiente, de forma mais consistente. Após inúmeras tentativas e ajustes no código, constatou-se que o módulo TCS3200 era aplicável, porém a confiabilidade e a margem de erro eram questionáveis.



FIGURA 3. Dispositivo desenvolvido para isolar o sensor da luz ambiente (Autoria própria, 2019).

Uma opção viável ao problema mencionado acima seria a experimentação de outros códigos. Após um levantamento bibliográfico, constatou-se diferentes estratégias na elaboração do código, sendo que as

estratégias mais comuns faziam uso de algumas bibliotecas para “simplificar” o código, o que, por vezes, dificultava a alteração do código, ou não faziam uso de bibliotecas. Em resumo, o código consistia em “ler” a entrada do arduino no qual o módulo TCS3200 estava conectado e “imprimir” no serial monitor três valores correspondentes às componentes das cores RGB (Vermelho, Verde e Azul).

Após a análise de diversos códigos, compreendeu-se que para um código funcionar razoavelmente bem, minimizando erros de leitura, e com um nível de confiabilidade razoável, precisaria de uma etapa de calibração. Alguns códigos com uma etapa inicial de calibração foram testados, e notou-se alguma melhora nos resultados (Tabela 1), porém alguns destes códigos não foram escritos para arduino, o que por vezes gerou bastantes conflitos de linguagem.

3. RESULTADOS

Inicialmente desenvolveu-se um padrão em papel cartão de 5 cores; vermelho (255,0,0), verde (0,255,0), azul (0,0,255) branco (255,255,255) e preto (0,0,0). Utilizou-se o software de edição gráfica (Publisher-Microsoft). O padrão de cores foi elaborado e impresso como uma alternativa de baixo custo aos padrões de cores profissionais.

3.1. Calibração dos padrões

É importante ressaltar que no processo de geração do arquivo para a impressão e no processo de impressão, uma parte das características da cor seria “perdida”. Porém, para o objetivo de verificar o funcionamento do sensor, a perda não se mostrou-se tão significativa. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos dos padrões elaborados como mostra a Figura 4 abaixo.

Posteriormente, todos eles foram inseridos, individualmente, sobre o sensor, em uma distância de 9 milímetros do chip. Extraiu-se ao todo, 120 amostras (1 amostra a cada 0,5s) do mesmo ponto do cartão (padrão). Os dados obtidos foram organizados em uma tabela, e para realizar a análise, retirou-se dos dados coletados, a média, o valor máximo, o valor mínimo a amplitude e o desvio padrão. Os valores estão demonstrados na tabela 1.

Para cada padrão de cor (vermelho, verde, azul, branco e preto), foi elaborado um gráfico e, para facilitar a análise visual, todos os gráficos foram elaborados seguindo-se um mesmo padrão. No eixo horizontal estão as amostras coletadas (1 à 120). No eixo vertical, encontram-se os valores referente a frequência aferida de cada amostra. Os gráficos foram elaborados de forma a conter somente as informações que contribuíssem diretamente com a análise.

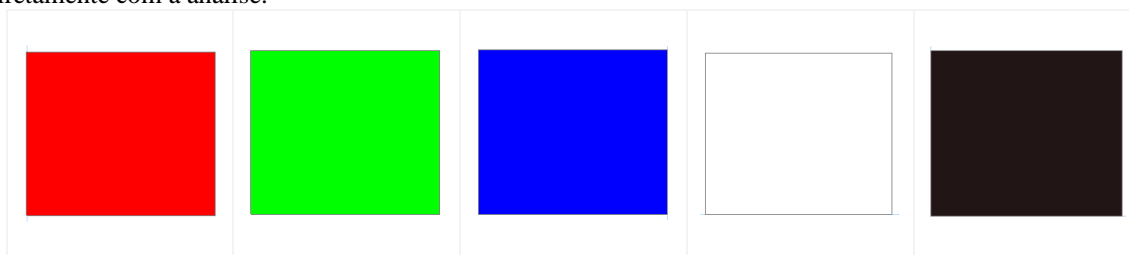
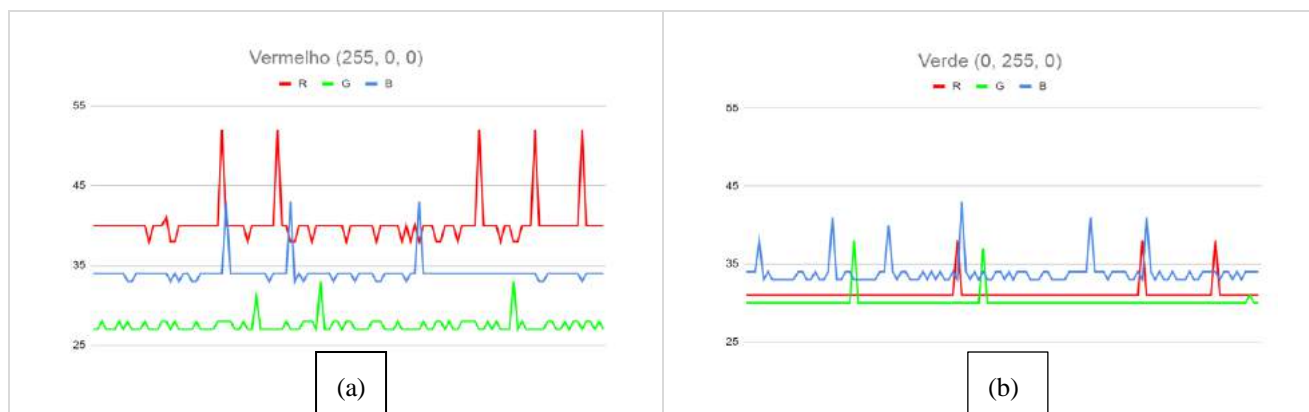


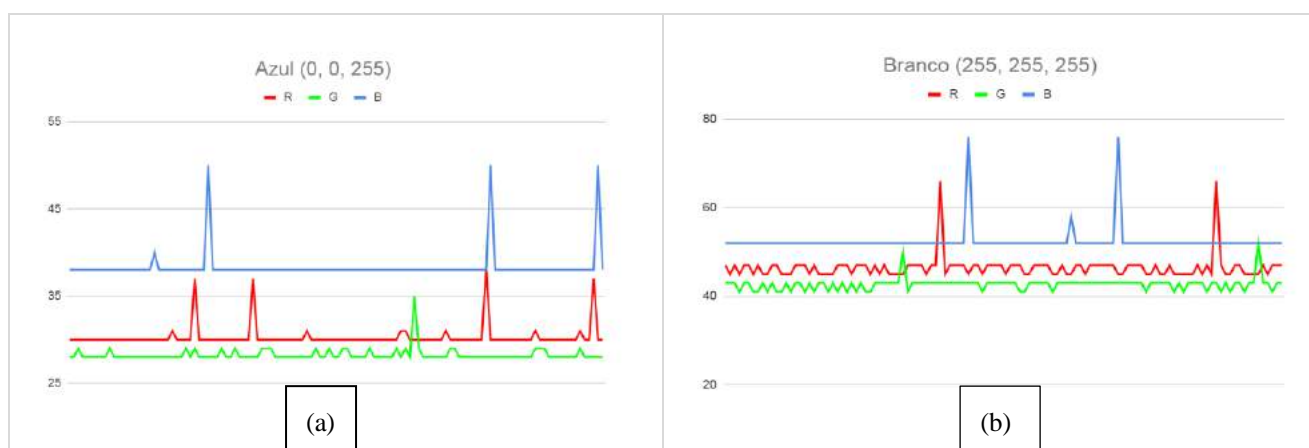
FIGURA 4. Padrão impresso utilizado para testar o funcionamento do sensor (Autoria própria, 2020).

TABELA 1. Dados de média, máximo, mínimo, amplitude e desvio padrão das respectivas amostras.

Padrão	Vermelho (255, 0, 0)			Verde (0, 255, 0)			Azul (0, 0, 255)			Branco (255, 255, 255)			Preto (0, 0, 0)		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Média	40,2	27,5	34,1	31,2	30,1	33,9	30,3	28,3	38,3	46,5	42,7	52,5	30,1	26,8	32,1
Máximo	52,0	33,0	43,0	38,0	38,0	43,0	38,0	35,0	50,0	66,0	52,0	76,0	37,0	32,0	40,0
Mínimo	38,0	27,0	33,0	31,0	30,0	33,0	30,0	28,0	38,0	45,0	41,0	52,0	29,0	26,0	32,0
Amplitude	14,0	6,0	10,0	7,0	8,0	10,0	8,0	7,0	12,0	21,0	11,0	24,0	8,0	6,0	8,0
DevPad	2,57	0,92	1,47	1,09	0,97	1,67	1,32	0,73	1,88	2,74	1,38	3,12	0,93	1,02	0,74
	3	6	6	7	0	5	0	6	8	0	6	7	1	3	9



GRÁFICOS 1 e 2. (a) Amostra padrão vermelho (frequência x amostra). (b) Amostra padrão verde (frequência x amostra).



GRÁFICOS 3 e 4. (a) Amostra padrão azul (frequência x amostra).

(b) Amostra padrão branco (frequência x amostra).



GRÁFICO 5. Amostra padrão preto (frequência x amostra).

Analisando a tabela 1, verifica-se que existe uma variação significativa que poderia vir a comprometer a identificação correta das cores. O desvio padrão próximo a zero evidencia a baixa variação nos dados coletados, porém verifica-se, em algumas configurações de padrões de cores, uma amplitude alta, que, provavelmente, se deve à ruídos do circuito e/ou do processo de fabricação do módulo sensor.

Por outro lado, ao se analisar os gráficos de 1 à 5, verifica-se que alguns pontos se destacam (ruídos), se estes pontos fossem eliminados da análise, a amplitude diminuiria, a média diminuiria, e o desvio padrão se aproxima de zero. Porém, em uma situação concreta, onde se busca a automação do processo de identificação e seleção por cor, estes ruídos ocorreram. Para diminuir ou eliminar os erros de identificação por cor, o ideal seria desenvolver um algoritmos que identifique os ruídos e os elimine ou reduza os seus impactos.

Seguindo a análise dos gráficos 1 à 5, comparando duas cores seria fácil distingui-las, pois existe um padrão bem definido entre os padrões de cores vermelho e verde, vermelho e azul e verde azul. Contrariando as expectativas, a componente predominante, da cor verde é o azul.

Comparando as três cores, seria possível distingui-las, com uma pequena margem para erros dependendo do tom da cor. Comparando as três cores com a cor preta e a cor branca, seria possível realizar uma distinção clara entre elas. Em sistema de calibração, a cor preta e a cor branca, exercem a função de identificar a quantidade luminosa que está incidindo sobre o módulo sensor.

3.2. Teste das amostras

Com a finalidade de analisar uma situação aplicável, foi elaborado um padrão de cores com as cores do chocolate colorido M&M's (Figura 5). Foi selecionada uma imagem disponível no google com as cores do chocolate, e utilizou-se um software de edição gráfica (Publisher-Microsoft), para elaborar alguns cartões e simular as cores do chocolate. No processo de geração dos arquivos de para impressão e no processo de impressão, como já mencionado anteriormente, uma parte das características é perdida, porém para o objetivo pretendido, este fato não provocou perdas significativas (Tabela 2).

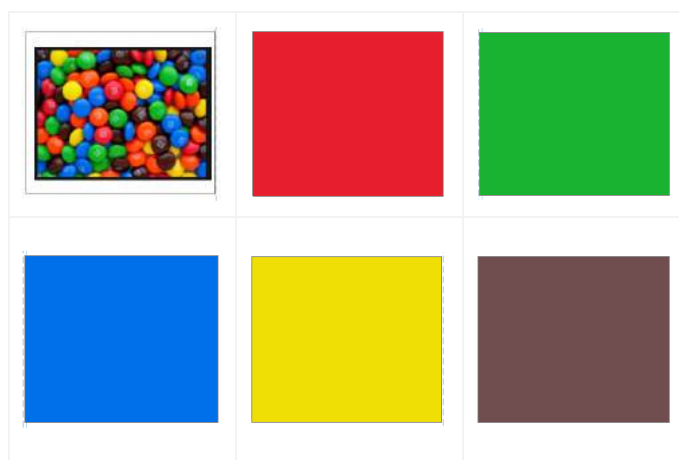


FIGURA 5. Padrões de cores M&M's utilizado.

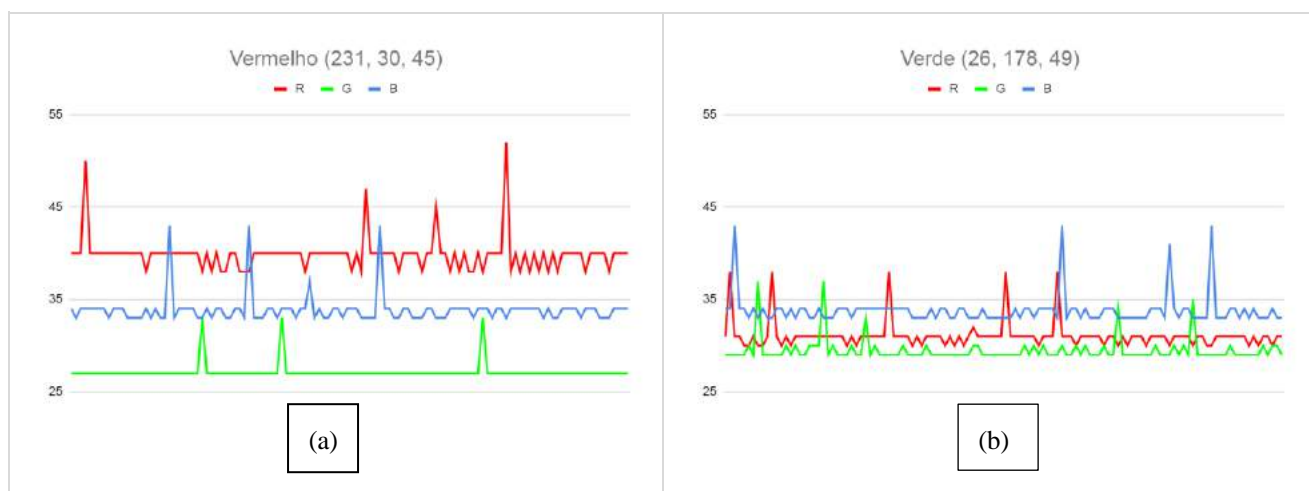
TABELA 2. Tabela análise dos padrões de cores M&M's na saída do sensor.

Padrão	Vermelho (231, 30, 45)			Verde (26, 178, 49)			Azul (0, 111, 234)			Amarelo (240, 223, 5)			Marrom (112, 77, 78)		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Média	39,9	27,2	33,9	31,1	29,5	33,8	30,4	29,6	40,5	44,1	37,3	37,1	31,1	27,2	32,6
Máximo	52,0	33,0	43,0	38,0	37,0	43,0	38,0	37,0	55,0	58,0	47,0	45,0	38,0	33,0	33,0
Mínimo	38,0	27,0	33,0	30,0	29,0	33,0	30,0	29,0	40,0	43,0	37,0	37,0	31,0	26,0	32,0
Amplitude	14,0	6,0	10,0	8,0	8,0	10,0	8,0	8,0	15,0	15,0	10,0	8,0	7,0	7,0	1,0
DevPad	1,88	0,94	1,58	1,51	1,31	1,70	1,25	1,10	1,98	1,99	1,80	0,91	0,90	1,14	0,50

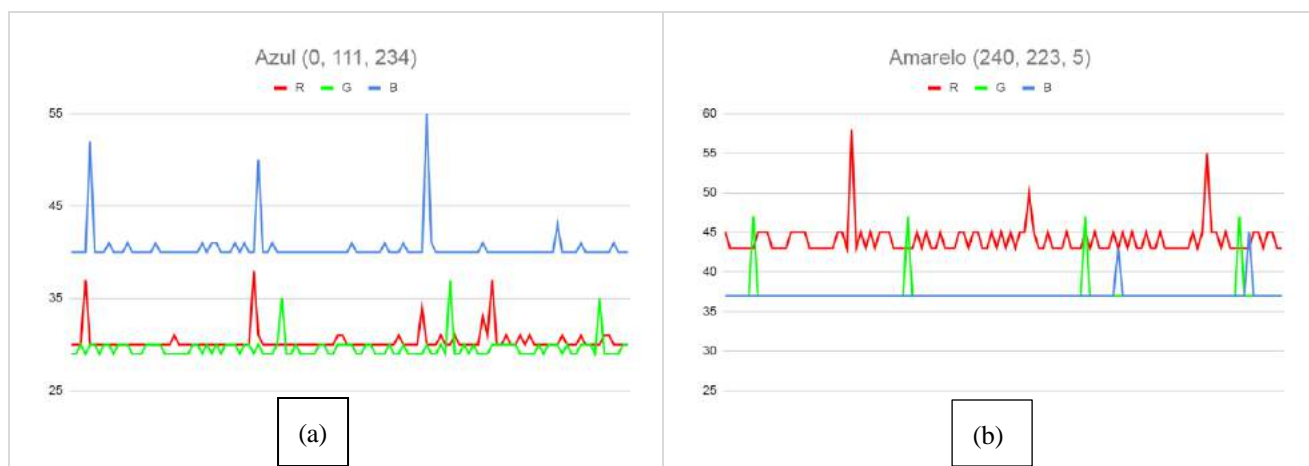
Analisando a tabela II, verifica-se que o valor do desvio padrão possui baixos valores, denotando baixa variação amostral. Porém, a amplitude em algumas configurações possui um valor considerado alto, o que denota a interferência de algum ruído. Para algumas configurações, verifica-se que os valores de máximo e mínimo estão em uma mesma faixa de valores consideradas “próximas”. Por exemplo, as cores verde e azul, estão em uma mesma faixa de valores, com um baixo valor de amplitude, logo não seria fácil distingui-las por comparação, provavelmente ocorreria um número significativo de erros.

Foram elaborados gráficos seguindo o padrão mencionado acima. A análise visual realizada nos gráficos de VI à X, permite afirmar que seria possível distinguir por comparação a cor vermelha das cores verde, azul,

amarelo e marrom. Por comparação, não seria “fácil” distinguir entre as cores verde e azul, provavelmente ocorreria erros significativos. É possível distinguir por comparação, as cores verdes, amarelo e marrom, com baixa possibilidades de erros.



GRÁFICOS 6 e 7. (a) Amostra M&M's vermelha (frequência x amostra). (b) Amostra M&M's verde (frequência x amostra).



GRÁFICOS 8 e 9. (a) Amostra M&M's azul (frequência x amostra). (b) Amostra M&M's amarelo (frequência x amostra).



GRÁFICO 10. Amostra M&M's marrom (frequência x amostra).

3.3. Testes finais

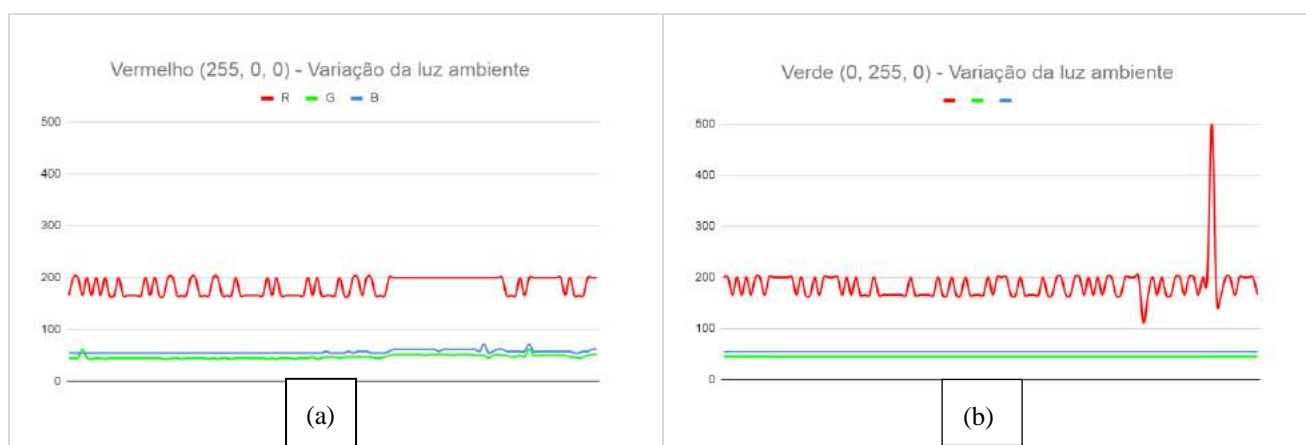
Para verificar os efeitos da variação da luz ambiente sobre o sensor e sobre a amostra, repetiu se o experimento executado para se obter os dados da tabela I. Foi utilizado o mesmo padrão, porém, o procedimento foi alterado, para verificar o efeito causado pela luz ambiente, a caixa que protegia o sensor da luz ambiente foi removida e para forçar a alteração da luz ambiente, utilizou-se uma lanterna. Os dados coletados neste experimento foram organizados na tabela 3.

TABELA 3. Dados de média, máximo, mínimo, amplitude e desvio padrão das respectivas amostras.

Padrão	Vermelho (255, 0, 0)			Verde (0, 255, 0)			Azul (0, 0, 255)			Branco (255, 255, 255)			Preto (0, 0, 0)		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
Média	184,2	47,3	57,2	184,8	45,0	55,0	39,4	56,6	120,4	266,9	240,5	281,7	51,8	39,1	39,3
Máximo	200,0	62,0	71,0	500,0	45,0	55,0	58,0	90,0	250,0	333,0	333,0	333,0	142,0	166,0	90,0
Mínimo	166,0	43,0	55,0	111,0	45,0	55,0	33,0	52,0	111,0	250,0	200,0	250,0	21,0	18,0	23,0
Amplitude	34,0	19,0	16,0	389,0	0,0	0,0	25,0	38,0	139,0	83,0	133,0	83,0	121,0	148,0	67,0
DevPad	17,0	3,5	3,3	34,4	0,0	0,0	7,0	5,9	13,9	33,6	21,9	40,5	31,1	23,3	16,8

Analisando os dados da tabela 3, verifica-se que em todas as configurações, ao menos uma das componentes o desvio padrão tem um alto valor, logo existe uma variação amostral alta. Ao analisar a amplitude, verifica-se que os valores referente a amplitude são altos. Sendo os valores de desvio padrão e amplitudes considerados altos, a detecção da cor se mostra ‘difícil’, pois a variação existente implicaria em erros significativos.

Os gráficos de 11 à 15, demonstram de forma visual, a instabilidade gerada pela variação da luz ambiente incidindo sobre o sensor e sobre a amostra. Devido às variações, verifica-se que não seria uma tarefa ‘fácil’ estruturar um algoritmo para diferenciar por exemplo a cor vermelha (gráfico 11) e a cor verde (gráfico 12).



GRÁFICOS 11 e 12. (a) Amostra padrão vermelho (frequência x amostra). (b) Amostra padrão verde (frequência x amostra).



GRÁFICOS 13 e 14. (a) Amostra padrão azul (frequência x amostra). (b) Amostra padrão branco (frequência x amostra).



GRÁFICO 15. Amostra padrão preto (frequência x amostra).

4. CONCLUSÃO

Diante do exposto acima, é possível constatar que este não é um sensor genérico aplicado a todas as cores RGB e que ele funciona razoavelmente bem com três cores, cujos espectros não sejam com faixas de frequência próximas. Independente das aplicações é preciso encontrar um meio calibrar o sensor na luz ambiente do local de uso, previamente, antes de sua utilização.

A iluminação ambiente interfere na leitura das cores por causa do infravermelho presente na maioria das lâmpadas e qualquer pequena alteração na fonte de luz, mesmo que seja uma mudança de local no mesmo ambiente causa a instabilidade de leitura. Para atenuar as instabilidades causada pela luz ambiente, é preciso encontrar um meio adequado para diminuir o impacto da luz ambiente sobre o sensor e sobre a amostra.

No módulo do sensor, estão fixados 4 led's brancos, a qualidade desse led's, interfere na "leitura", logo se forem de baixa luminosidade e ou baixa qualidade, a resultados das amostras coletadas pelo arduino, podem ser não significativas. Uma iluminação externa, de uma fonte constante, melhora a identificação da cor e por consequência, diminui-se os erros na seleção por cor.

O módulo sensor TCS3200, não é um sensor genérico de fácil aplicação. Porém é possível fazer seleção de cor de forma aleatória já nos primeiros testes, mas à medida que os requisitos do projeto torna-se mais específico, a necessidade de conhecimento prévio de programação de algoritmos em alto nível passa a ser necessário, assim como conhecimento prévio da teoria da formação das cores.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Centro Universitário Claretiano pela disponibilidade do espaço em que os ensaios foram realizados.

REFERÊNCIAS

- [1] Greschuk, J., Pauli, J. L., Oliveira, V. V. Sistema de reconhecimento de objetos por cor integrado a uma mesa pneumática de coordenadas no plano cartesiano (X,Y). Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Santa Catarina, Instituto Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015
- [2] MANICKAVASAGAN, A., AL-MEZENI, N., SHEKAILI, K. Técnica de cor RGB para classificação de tâmaras. *Scientia Horticultu-rae*, 2014, 175, p 87–94, jan./jun..
- [3] GUNASEKAN, S. Computer vision technology for quality assurance. *TrendsFood Sci. Technol.* 1996, 7, 245–256..
- [4] CHEN, Y., CHAO, K., Kim, S., 2002. Machine vision technology for agricultural applica-tions. *Comput. Electron. Agric.* n. 36, 173–191. Du, C., Sun, D., 2006.
- [5] LU, J., TAN, J., SHATADAL, P., GERRARED, E.D. Evaluation of pork color by usingcomputer vision. *Meat Sci*, 2000, 56, 413–419.
- [6] Tao, Y., Heinemann, P.H., Vargheses, Z., Morrow, T.C., Sommer, H.J. Machine vision for color inspection of potatoes and apples. *Trans. ASABE*, 1995, 38, 1555–1561.
- [7] Brosnan, J., Sun, D. Inspection and grading of agricultural and food productsby computer vision systems—a review. *Comput. Electron. Agric*, 2002, 36, 193–213.
- [8] Du, C., Sun, D. Learning techniques used in computer vision for food qualityevaluation: a review. *J. Food Eng.* 200, 72, 39–55.
- [9] Venora, G., Grillo, O., Ravalli, C., Cremonini, R. Identification of Italian landracesof bean (*Phaseolus vulgaris* L.) using an image analysis system. *Sci. Hortic.* 2009, 121,410–418.
- [10] Miranda, C., Girard, T., LAURI, P.E. Random sample estimates of tree mean forfruit size and colour in apple. *Sci. Hortic.* n. 112, 33–41. 2007.
- [11] Ercisli, S., Sayinci, B., Kara, M., Yildiz, C., Ozturk, I., Determination of size and shape features of walnut (*Juglans regia* L.) cultivars using image processing. *Sci.Hortic*, 2012, 133, 47–55.
- [12] Shahin, M.A., Tollner, E.W., Giyaiyis, R.D., McClendon, R.W., Arabina, H.R. Apple classification based on surface bruises using image processing and neuralnetworks. *Trans. ASABE*, 2002, 45, 1619–1627.
- [13] Jarimopas, B., Jaisin, N. An experimental machine vision system for sortingsweet tamarind. *J. Food Eng.* 2008, 89, 291–297.
- [14] Leemans, V., Magein, H., Destain, M.F. On-line fruit grading to their externalquality using machine vision. *Biosyst. Eng.* 2002, 83, 397–404.
- [15] Liming, X., Yanchao, Z. Automated strawberry grading system based on imageprocessing. *Comput. Electron. Agric*, 2010, 71, S32–S39.
- [16] Puchalski, C., Gorzelany, J., Zaguia, G., Brusewitz, G. Image analysis for appledefect detection. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.—OL PAN*, 2008, 8, 197–205.
- [17] Leemans, V., Magein, H., Destain, M.F. Defects segmentation on ‘GoldenDelicious’ apples by using color machine vision. *Comput. Electron. Agric*, 1998, 20,117–130.
- [18] Blasco, J., Aleixos, N., Molto, E. Computer vision detection of peel defects incitrus by means of a region oriented segmentation algorithm. *J. Food Eng.* 2007, 81, 535–543.
- [19] Lopez-Garcia, F., Andeeu-Garcia, G., Blasco, J., Aleioxos, N., Valiente, J. Auto-matic detection of skin defects in citrus fruits using a multivariate imageanalysis approach. *Comput. Electron. Agric*, 2010, 71, 189–197.
- [20] Cardoso, G., S. *Microsoft Kinect: Criando aplica-ções interativas com o Microsoft Kinect*. Casa do Código, Brasil: São Paulo, 2013.
- [21] Neto, J., D., Xavier, F., Lima P., Claudio, G. de Oliveira., Costa, J. A., G., da. *Incentivo ao desenvol-vimento e pesquisa em robótica educacional utilizando o Kinect sensor*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Paraíba, 2014.
- [22] Almeida, S., Moreira, G. Guimarães, G. F., Ramírez, J. A. *Reconhecimento de estrutura fonológica da Língua Brasileira de Sinais usando um sensors RGB-D*. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Ge-rais, Brazil. *Expert Systems with Applications*, v. 41, p. 7259–7271, mai. 2014.
- [23] Ssampedro, Ó., Ssalgueiro, J., R. *Turbidímetro e sensor RGB para monitoramento remoto em meios aquáticos*. Departamento de Física Aplicada, Universidade de Vigo, Espanha. *Measurement*, v. 68, p. 128–134, dez. 2014/fev. 2015.
- [24] Tao, D., Cheng, J., Lin, X., Yu, J. Estruturação de ambiente preservando projeções discriminativas para sensor RGB-D, *Information Sciences*, 2015, 320, p. 383–394, jun. 2014/mar..

- [25] OMRON. 2020. Sensores de Marca de Cor Série E3S-DC/E3NX-CA. Disponível em: https://assets.omron.eu/downloads/brochure/pt/v5/y216_e3s-dc_e3nx-ca_series_color_mark_senors_brochure_pt.pdf Acesso em 30 de Janeiro de 2020. 4 pp
- [26] CAMBRIDGE IN COLOUR. 2019. Colour Perception. Disponível em: < <https://www.cambridgeincolour.com/pt-br/tutoriais/color-perception.htm> >. Acesso em 13 de Novembro de 2019.
- [27] LOJA DA ELÉTRICA. 2020. Módulo sensor de cor RGB TCS230. Disponível em: <https://daeletrica.com.br/modulo-sensor-de-cor-rgb-tcs230.html?search=sensor%20RGBhtml>. Acesso em 28 de Fevereiro de 2020.



Artigo

Determinação de Erros Máximos Contidos em Parâmetros Elétricos de Linhas de Transmissão Estimados a Partir de Medidas de Tensão e Corrente

Nikolas I. F. de Oliveira ^[1], Cleydson A. de C. Nascimento ^[2], Iggor B. da Silva ^[3], Melinda C. S. da Cruz ^[4]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nikolas.oliveira@ufersa.edu.br

^[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; cleydson.adller@ifce.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; iggor.silva@ufersa.edu.br

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-Árido ; melinda@ufersa.edu.br

Recebido: 20/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: Esse artigo apresenta uma análise estatística para determinar os erros máximos contidos na estimação dos parâmetros de linhas de transmissão obtidos a partir de medidas de tensão e corrente. As tensões e correntes nos sistemas elétricos são medidas por transformadores de instrumentos, que podem inserir erros nas medições a partir de sua classe de exatidão. Portanto, o objetivo desse trabalho é utilizar a teoria da propagação de erros para determinar os limites dos erros dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, com 95% de probabilidade de sucesso. Para obter os resultados, uma linha de transmissão foi simulada usando o software ATPDraw[®] e um algoritmo foi desenvolvido para estimação de parâmetros e determinação dos erros máximos.

Palavras-chave: Estimação de parâmetros; Linha de transmissão; Teoria de propagação de erros.

Abstract: This article presents a statistical analysis that was performed to determine the maximum errors contained in transmission line parameters estimated from voltage and current measurements. The voltages and currents in an electrical system are measured by instrument transformers, which can insert errors in measured quantities from their accuracy class. Thus, the objective of this work is use theory of errors propagation to determine the limits of error of line parameters, with 95% of success probability. In order to obtain the results, a transmission line was simulated using the software ATPDraw[®] and an algorithm was developed to parameter estimation and determination of maximum erros.

Key-words: Parameter estimation; Transmission line; Theory of erros propagation.

1. INTRODUÇÃO

UM sistema elétrico de potência pode ser dividido em três segmentos: geração, transmissão e distribuição. O transporte de energia entre a geração e os centros de consumo é feito por linhas de transmissão (LTs), que são cabos condutores que operam em elevados níveis de tensão.

Com o contínuo crescimento da demanda de eletricidade, se torna necessário intensificar os estudos e a implementação de novas tecnologias relacionadas às linhas de transmissão, com o intuito de melhorar a capacidade de transporte e a confiabilidade na condução de grandes blocos de potência, bem como auxiliar operadores do sistema elétrico na tomada de decisões [1].

Uma das áreas de estudo em linhas de transmissão é a estimação dos parâmetros elétricos (resistência, reatância e susceptância *shunt*) que a caracterizam. A obtenção correta desses valores é importante, pois estes são usados em diversas aplicações, como por exemplo, na localização de faltas na rede, correta parametrização do sistema de proteção, conhecimento das características de propagação na linha, entre outros [2]

Uma série de fatores influenciam no cálculo convencional dos parâmetros elétricos longitudinais e transversais de uma linha de transmissão (LT), inserindo erros nesses dados como: condições atmosféricas diárias (temperatura, umidade, etc.), e condições geográficas do local onde a linha de transmissão está inserida (relevos, tipo e rugosidade do solo, etc.) [3].

As metodologias de estimação de parâmetros que dependem de medidas de tensão e corrente, apesar de não serem sensíveis a fatores como erro humano, condições climáticas e localização da torre de transmissão, podem indicar parâmetros imprecisos, se as medidas de entrada forem imprecisas [2]. Assim, o objetivo deste trabalho é estabelecer o erro máximo, ou limite de erro, associado aos parâmetros elétricos de linhas de transmissão, calculados a partir de tensões e de correntes que podem conter erros originados da classe de exatidão de transformadores de potencial e transformadores de corrente.

O trabalho é dividido em duas etapas. A primeira consiste em calcular valores de parâmetros, a partir de um algoritmo de estimação baseado em fasores pré-falta. A segunda etapa consiste em determinar as variâncias ou limites de erro de cada parâmetro, usando a teoria de propagação de incertezas, a fim de estabelecer o erro máximo contido em cada estimativa. A partir do erro máximo obtido, pode-se concluir se a medida é confiável ou não para ser usada nas mais diversas aplicações que fazem uso desse dado.

Para obtenção dos resultados, usou-se o software *ATPDraw*® para simulação de uma linha de transmissão, e foram implementados algoritmos para estimação de parâmetros e determinação dos erros máximos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Teoria de Erros

O objetivo da maioria dos experimentos na ciência física é combinar diferentes variáveis em uma única quantidade. O erro no valor combinado é uma função dos erros constituintes. Como a soma de probabilidades não é linear, simplesmente somar os erros dos termos constituintes fornece uma superestimativa para o erro da variável combinada [4].

Todo processo experimental que envolve medição de grandezas está susceptível a introdução de erros na obtenção dos valores, pois nem sempre o valor medido é o valor verdadeiro dessa grandeza. O objetivo durante uma medição é garantir que os erros sejam os menores possíveis de forma a obter uma estimativa confiável de sua dimensão.

Existem dois tipos de erros que podem estar presentes em um mesmo processo de medição: erro aleatório e erro sistemático.

Os erros aleatórios (ou estatísticos), conforme [5] são aqueles que resultam em variações aleatórias nos resultados obtidos, causados por fatores que não podem ser controlados dentro de um processo de medição. Para [5], é possível observar o aparecimento das incertezas aleatórias com a repetição das medições.

A maioria dos experimentos físicos se preocupa em reduzir os erros aleatórios. A característica marcante de erros aleatórios em um experimento é que repetidas medições são dispersadas dentro de uma escala. Quanto menor a incerteza aleatória, menor será a dispersão dos dados dentro dessa escala, e conseqüentemente, mais precisas se tornam as medições [4]. Uma fonte comum de erros aleatórios são pequenos erros de julgamento feito pelo observador (quando interpolando); pequenos distúrbios nos aparelhos (como vibrações mecânicas); problemas de definição; entre outros [6].

Os erros sistemáticos, segundo [5], são a diferença entre o valor obtido através da medição e o valor real, sendo o erro repetido a cada nova medição, ou seja, leva o resultado sempre para a mesma direção. A causa mais óbvia de erros sistemáticos são instrumentos mal calibrados, como um relógio que gira mais lentamente, uma régua que esticou ou um medidor incorretamente zerado [6].

Ao contrário dos erros aleatórios, não existe uma técnica de estatística padrão para qualificar os erros sistemáticos. Depende do experimentador elaborar outros conjuntos de medidas que possam fornecer algum conhecimento da origem das discrepâncias sistemáticas [4].

Após um processo de medição, é necessário quantificar o grau de incertezas nos valores obtidos. Para isso, existem diversos parâmetros estatísticos que podem ser encontrados para auxiliar na determinação do grau de incertezas, como variância, desvio padrão e limite de erro. Esse último, é definido por [6] como sendo o intervalo de t-desvios padrão do valor real que forneça a probabilidade que uma medição de valor x pertença a esse intervalo, onde t é qualquer número real. Por exemplo, a probabilidade que um valor medido esteja dentro de um intervalo de desvio padrão com valor σ é 68%. A Figura 1 mostra o gráfico da probabilidade versus t , para obter a probabilidade de um dado se encontrar em um determinado intervalo dependendo do limite de confiança de qualquer conjunto de medidas que possua uma distribuição do tipo Gaussiana.

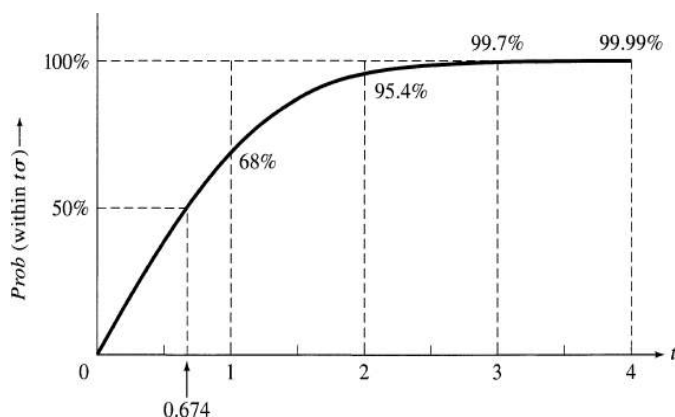


FIGURA 1. Probabilidade em função do limite de confiança.

2.2. Teoria da Propagação de Erros

Pseudomedida é uma grandeza cujo valor pode ser obtido através da combinação dos valores medidos de duas ou mais grandezas.

A Teoria da propagação de erros (ou incertezas), bastante utilizada na análise de pseudomedidas, segundo [5] tem como objetivo determinar o melhor valor possível para a grandeza a partir das medições, determinando a diferença entre o melhor valor obtido e o valor real. As regras para a propagação de erros se referem a uma situação em que são encontradas quantidades, x, \dots, z com incertezas $\sigma_x, \dots, \sigma_z$ e então se utiliza esses valores para calcular uma certa quantidade q . As incertezas em x, \dots, z se propagam através dos cálculos e causam uma incerteza em q [6]. A Equação 1 mostra como obter a variância de uma grandeza cuja função depende de múltiplas variáveis.

$$\sigma_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (1)$$

Onde σ_q^2 é a variância da grandeza q , σ_x^2 e σ_z^2 a variância das grandezas x e z , respectivamente.

Nos estudos de estatística e confiabilidade é comum utilizar o limite de confiança como sendo 2σ , como utilizado por [7], pois de acordo com a Figura 1, possibilita um grau de confiabilidade de 95,4%. Assim, o limite de confiança em função da classe de exatidão de instrumento de medição e do valor médio de suas medidas realizadas é dado pela Equação 2, como mostrado por [6].

$$L_r = \left(\frac{\text{classe de exatidão}}{100}\right) \times V_{\text{médio}} \quad (2)$$

As variâncias das grandezas independentes podem ser expressas como uma função dependente da classe de exatidão dos instrumentos de medição. A Equação 3 é obtida ao adotar o limite de confiança como sendo 2σ e assumindo que o valor médio fornecido pelos instrumentos é o próprio valor por eles medido.

$$\sigma_r^2 = \left(\frac{\text{classe de exatidão}}{200}\right)^2 \times V_{\text{medido}}^2 \quad (3)$$

2.3. Transformadores de Medidas

Para a realização de qualquer tipo de medição são necessários instrumentos adequados para medir essas grandezas. Em um sistema elétrico de potência, devido à presença de altos níveis de tensão e corrente, se torna necessário a utilização de transformadores capazes de reduzir o nível dessas grandezas. Para isso, utiliza-se os transformadores de medidas, definido por [8] como equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionar adequadamente sem a necessidade de trabalhar na corrente que flui pela carga ou estar conectado à tensão nominal do sistema.

Para um sistema elétrico, utiliza-se o transformador de corrente (TC) e o transformador de potencial (TP) como transformadores de medidas.

Os transformadores de corrente, na sua forma mais simples, possuem um primário, geralmente de poucas espiras, e um secundário, no qual a corrente nominal transformada é, na maioria dos casos, igual a 5 A. Dessa

forma, os instrumentos de medição e proteção são dimensionados em tamanhos reduzidos devido aos baixos valores de correntes secundárias para os quais são projetados. Os TCs transformam, por meio do fenômeno de conversão eletromagnética, correntes elevadas, que circulam no seu primário, em pequenas correntes secundárias, segundo uma relação de transformação [8].

Os erros presentes nos transformadores de corrente podem ser de duas naturezas: erro de relação de transformação que é o erro na leitura da corrente secundária medida com um TC, que não corresponde exatamente ao produto da corrente primária pela relação de transformação nominal; e erro de ângulo de fase que é o ângulo que mede a defasagem entre a corrente vetorial primária e o inverso da corrente vetorial secundária. Os TCs possuem classe de exatidão, que englobam os dois tipos de erros, sendo especificados dependendo da aplicação. De acordo com [8], para medição podem ser utilizados os TCs com precisão de 0,3%; 0,6% ou 1,2%. Para utilização em sistemas de proteção, podem ser empregados os TCs com classe de exatidão de 2,5%; 5% ou 10%.

O transformador de potencial (TP) é definido por [9] como um transformador especial com o objetivo de fornecer o sinal de tensão a instrumentos de medição, controle e proteção. Ainda segundo o mesmo, a tensão no secundário do TP, geralmente normalizada em 115 volts, deve ser uma réplica da tensão do sistema elétrico conectada ao primário do TP.

Os TPs devem ser capazes de reproduzir em seu secundário a tensão no primário com o menor erro possível. Porém, assim como nos TCs, erros estão presentes nesse processo e podem ser classificados como erro de relação de transformação que é originado na medição de tensão com o TP, na qual a tensão registrada no secundário não corresponde ao produto da tensão do primário pela relação de transformação de potencial nominal; e erro do ângulo de fase que é obtido a partir do ângulo que mede a defasagem angular entre a tensão vetorial no primário e a tensão vetorial no secundário de um TP. Segundo [8], os TPs podem apresentar classe de exatidão de 0,1%; 0,3%; 0,6% e 1,2%, que englobam os dois tipos de erros presentes nos TPs. A classe de exatidão de 0,1% é utilizada para calibração de equipamentos em laboratório. TPs com classe de exatidão de 0,3% são indicados para medição de grandezas para fins de faturamento. Com precisão de 0,6%, os TPs são úteis para medições de grandezas sem fins de faturamento. Já os transformadores de potencial com precisão de 1,2% são utilizados em sistemas de proteção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção detalha as etapas que foram seguidas para elaborar os algoritmo de determinação de erros máximos de parâmetros, proposto nesse trabalho.

3.1. Obtenção das equações para determinação dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão

Para o cálculo dos parâmetros elétricos longitudinais e transversais de uma linha de transmissão, Resistência (R), Reatância (X), Condutância (G) e Susceptância (B), utiliza-se equações que relacionam esses parâmetros com os valores de tensão e corrente nos terminais da linha. Assim, a partir da linha de transmissão da Figura 2, será possível obter as equações usadas para calcular os parâmetros elétricos da LT.

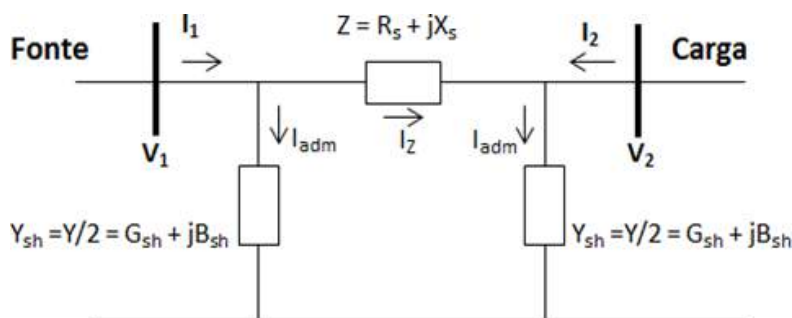


FIGURA 2. Representação do circuito π da linha de transmissão analisada.

3.1.1. Equação da admitância *shunt*

Para o cálculo da admitância *shunt*, utiliza-se as Leis de Kirchhoff para obter as relações de corrente no circuito da linha de transmissão apresentado na Figura 2. Assim, as Equações 4 e 5, mostram a corrente I_Z em função das outras correntes no circuito.

$$I_Z = I_1 - I_{adm} \quad (4)$$

$$I_Z = I_{adm} - I_2 \quad (5)$$

A corrente I_{adm} pode ser calculada, em cada ramo, através das Equações 6 e 7.

$$I_{adm} = V_1 * \frac{Y}{2} \quad (6)$$

$$I_{adm} = V_2 * \frac{Y}{2} \quad (7)$$

Assim, igualando as Equações 4 e 5 e substituindo as equações que representam as correntes de admitância, é possível obter o valor total da admitância *shunt* em função das medidas nos terminais da linha através da Equação 8.

$$Y = 2 * \left(\frac{I_1 + I_2}{V_1 + V_2} \right) \quad (8)$$

Por se tratar de fasores, a Equação 8 pode ser expressa utilizando a forma fasorial para explicitar que a admitância é uma função também dependente dos ângulos das grandezas dos terminais da linha. A Equação 9 apresenta a admitância *shunt* na forma fasorial.

$$Y = 2 * \left(\frac{I_1 e^{j\theta_{I1}} + I_2 e^{j\theta_{I2}}}{V_1 e^{j\theta_{V1}} + V_2 e^{j\theta_{V2}}} \right) \quad (9)$$

A Equação 9 é da forma complexa, ou seja, é composta por uma parte real e uma parcela imaginária. Utilizando das devidas ferramentas algébricas, é possível expandir essa equação de modo que seja possível obter a Equação 10, que se refere a parte real da admitância Y e representa a condutância da linha. Enquanto a Equação 11 é a parte imaginária de Y , representando a susceptância *shunt* da linha de transmissão.

$$G_{sh} = \frac{2[V_1 I_1 \cos(\theta_{I1} - \theta_{V1}) + V_2 I_1 \cos(\theta_{I1} - \theta_{V2})] + 2[V_1 I_2 \cos(\theta_{I2} - \theta_{V1}) + V_2 I_2 \cos(\theta_{I2} - \theta_{V2})]}{V_1^2 + 2V_1 V_2 \cos(\theta_{V1} - \theta_{V2}) + V_2^2} \quad (10)$$

$$B_{sh} = \frac{2[V_1 I_1 \sin(\theta_{I1} - \theta_{V1}) + V_2 I_1 \sin(\theta_{I1} - \theta_{V2})] + 2[V_1 I_2 \sin(\theta_{I2} - \theta_{V1}) + V_2 I_2 \sin(\theta_{I2} - \theta_{V2})]}{V_1^2 + 2V_1 V_2 \cos(\theta_{V1} - \theta_{V2}) + V_2^2} \quad (11)$$

3.1.1. Equação da impedância série

Para obter a expressão que representa a impedância da linha de transmissão, é preciso novamente analisar o circuito da Figura 2. Aplicando as leis de Kirchhoff, é possível obter as Equações 12 e 13 que fornecem a corrente que percorre a impedância.

$$I_Z = \frac{V_1 - V_2}{Z} \quad (12)$$

$$I_Z = V_2 * \frac{Y}{2} - I_2 \quad (13)$$

Substituindo a Equação 8 na Equação 13 e igualando o resultado com a Equação 12, é possível obter a expressão que permite encontrar o valor da impedância série, sendo apresentada através da Equação 14.

$$Z = \frac{(V_1)^2 - (V_2)^2}{V_2 I_1 - V_1 I_2} \quad (14)$$

Por se tratar de fasores, a Equação 14 é dependente dos módulos e dos ângulos das tensões e correntes em ambos terminais. Por isso, a Equação 15 apresenta a impedância série na forma fasorial.

$$Z = \frac{(V_1 e^{j\theta_{V1}})^2 - (V_2 e^{j\theta_{V2}})^2}{V_2 e^{j\theta_{V2}} I_1 e^{j\theta_{I1}} - V_1 e^{j\theta_{V1}} I_2 e^{j\theta_{I2}}} \quad (15)$$

Analisando a Equação 15, percebe-se que, assim como a equação da admitância, se trata de uma equação complexa, possuindo uma parte real e uma parte imaginária. Portanto, utilizando as devidas manipulações

algébricas é possível extrair duas expressões. A parte real da impedância série Z , que corresponde a resistência série da linha de transmissão, pode ser obtida pela Equação 16. Já a parte imaginária corresponde à reatância indutiva série da linha de transmissão, pode ser calculada através da Equação 17.

$$R_s = \left(\frac{V_1^2 V_2 V_1 \cos(2\theta_{V1} - \theta_{V2} - \theta_{I1}) - V_1^3 I_2 \cos(\theta_{V1} - \theta_{I2})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) + \left(\frac{V_2^2 V_1 I_2 \cos(2\theta_{V2} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) - V_2^3 I_1 \cos(\theta_{V2} - \theta_{I1})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) \quad (16)$$

$$X_s = \left(\frac{V_1^2 V_2 V_1 \sin(2\theta_{V1} - \theta_{V2} - \theta_{I1}) - V_1^3 I_2 \sin(\theta_{V1} - \theta_{I2})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) + \left(\frac{V_2^2 V_1 I_2 \sin(2\theta_{V2} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) - V_2^3 I_1 \sin(\theta_{V2} - \theta_{I1})}{(V_2 I_2)^2 - 2V_1 V_2 I_1 I_2 \cos(\theta_{V2} + \theta_{I1} - \theta_{V1} - \theta_{I2}) + (V_1 I_2)^2} \right) \quad (17)$$

3.2. Simulação da linha de transmissão

O estudo proposto neste trabalho foi realizado considerando uma linha de transmissão que opera com 230 kV em regime permanente, e que possui 180 km de comprimento, inserida em um sistema elétrico semelhante ao da Figura 3.

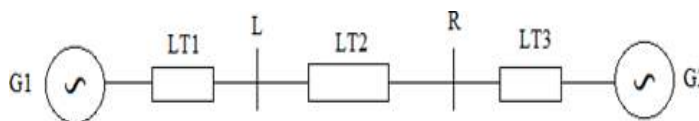


Figura 3. Sistema elétrico analisado.

Nesse sistema, analisa-se a linha de transmissão LT2 para determinação de seus parâmetros elétricos com base nas medidas de tensão e corrente nas barras L e R. Os geradores e as demais linhas de transmissão a montante e a jusante de LT2, representam um equivalente de Thevenin do restante do sistema.

Com intuito de verificar o comportamento do sistema elétrico em condições normais de operação em regime permanente e obter os fasores de tensão e corrente nas barras L e R, faz-se necessário simular o sistema utilizando o software *ATPDraw*® (*Alternative Transient Program*), no qual foram utilizados, como parâmetros das linhas de transmissão, dados típicos de uma linha da Eletrosul [10] conforme a Tabela 1.

TABELA 1. Dados do Sistema elétrico analisado.

<i>G1</i>	<i>LT1, LT2 e LT3</i>		<i>G2</i>
	$R1 = 0,09127 \Omega/\text{km}$	$R0 = 0,44016 \Omega/\text{km}$	
	$X1 = 0,51879 \Omega/\text{km}$	$X0 = 1,5659 \Omega/\text{km}$	
230kV	$C = 8,47 \text{ nF}/\text{km}$	$C0 = 6,10 \text{ nF}/\text{km}$	230kV
60Hz	Comprimento da linha LT1 = 20 km		60Hz
	Comprimento da linha LT2 = 180 km		
	Comprimento da linha LT3 = 20 km		

3.3. Algoritmo de determinação de erros

O algoritmo desenvolvido tem como objetivo a determinação dos erros máximos contidos nos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão, considerando que os erros nas medidas foram originados da classe de exatidão dos transformadores de instrumentos (TC e TP) e dos relés registradores.

O algoritmo desenvolvido utilizou-se das equações previamente demonstradas dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão em função dos módulos de tensão e corrente em ambos terminais da linha. A partir dos dados de um ciclo dos sinais de tensão e corrente obtidos através do *ATPDraw*®, tornou-se possível a extração dos fasores da componente fundamental desses sinais utilizando a Transformada Discreta de Fourier com uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo.

Para realizar o cálculo da variância das grandezas medidas, é necessário introduzir na Equação 3 os erros originados a partir dos transformadores de instrumentos e relés registradores, tanto de relação de transformação, quanto de ângulo de fase, em ambos dispositivos. Assim, o limite do erro para cada fasor é a soma dos limites dos erros introduzidos por cada dispositivo. A Equação 18 apresentada por [7], mostra como obter a variância para os módulos de tensão e corrente.

$$\sigma_{(v,i)}^2 = \left(\frac{c_exat_{(TI)} V_{med(TI)} + c_exat_{(reg)} V_{med(reg)}}{200} \right)^2 \quad (18)$$

Onde $c_exat_{(TI)}$ é a classe de exatidão dada em porcentagem dos transformadores de instrumento e $c_exat_{(reg)}$ é a classe de exatidão dada em porcentagem do relé registrador. O termo $V_{med(TI)}$ é o módulo de tensão ou corrente medido pelo transformador e $V_{med(reg)}$ é o valor de tensão ou corrente registrado pelo relé.

O mesmo procedimento é adotado por [7] para calcular a variância dos ângulos dos fasores de tensão e corrente, ou seja, o limite do erro para os ângulos é a soma dos erros máximos de fase introduzidos pelos transformadores de instrumentos e relés registradores, como mostrado através da Equação 19.

$$\sigma_{(\theta v, \theta i)}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{\theta(TI)} + \varepsilon_{\theta(reg)}}{2} \right)^2 \quad (19)$$

Onde $\varepsilon_{\theta(TI)}$ e $\varepsilon_{\theta(reg)}$ são os erros máximos de fase, dado em graus, introduzidos pelos transformadores de instrumentos e relés registradores, respectivamente.

A Tabela 2 resume os valores adotados nesse trabalho para classe de exatidão e erros máximos de ângulo de fase dos dispositivos. Vale salientar que os erros máximos de fase são encontrados a partir da análise dos paralelogramas característicos da classe de exatidão de cada dispositivo medidor, apresentados por [7]. Esses valores foram escolhidos devido serem dados típicos de classe de exatidão de equipamentos utilizados em sistema de proteção.

TABELA 2. Valores adotados para os dispositivos.

<i>Dispositivo</i>	<i>Classe de exatidão</i>	<i>Erro máximo de ângulo de fase</i>
Relé registrador	0,6%	0,52°
TC	10%	8,67°
TP	1,2%	1,04°

Para a aplicação da fórmula genérica da Teoria de Propagação de Erros, expressa através da Equação 1, implementou-se um algoritmo auxiliar com o objetivo de calcular separadamente as variâncias presentes na Equação 1 para todos os parâmetros elétricos da linha de transmissão. Esse algoritmo auxiliar foi desenvolvido principalmente para reduzir o tempo de processamento do algoritmo principal, uma vez que a equação da propagação de erros envolve cálculos complexos de derivadas parciais das expressões dos parâmetros em relação aos módulos e fase dos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da linha.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados iniciais foram obtidos a partir da análise da linha de transmissão trifásica de 230 kV, operando na tensão nominal e em regime permanente, com comprimento de 180 km, com frequência nominal de 60 Hz. A partir das formas de onda de tensão e corrente nos terminais da LT utilizando o *ATPDraw®* e aplicando a metodologia proposta, os parâmetros longitudinais e transversais foram estimados conforme Tabela 3, que também apresenta uma comparação com os valores reais. Vale ressaltar que utilizou-se apenas os fasores de tensão e corrente de uma das fases, uma vez que a LT é equilibrada.

TABELA 3. Valores estimados obtidos.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valores</i>	
	<i>Reais (Ohm)</i>	<i>Estimados (Ohm)</i>
Bsh	5,747E-04	5,774E-04
Rs	16,429	16,128
Xs	93,382	92,584

Considerando os resultados da Tabela 3, percebe-se que a estimativa ficou bem próxima dos valores reais da linha. Porém, sabendo que em um sistema elétrico os dados de tensão e corrente são coletados através de TPs, TCs e relés em cada terminal da linha, deve-se verificar o quanto de erro a classe de exatidão desses dispositivos podem introduzir nos parâmetros da LT. Assim, aplicando as equações para encontrar as variâncias das grandezas medidas e utilizando a equação da Teoria de Propagação de Erros, é possível determinar a variância, e consequentemente o desvio padrão e limite de erro, para quantificar as incertezas presentes na estimação dos parâmetros da linha como é mostrado na Tabela 4. É admitido o limite do erro como 2σ para que os valores médios dos parâmetros elétricos tenham 95,4% de probabilidade de estarem dentro do intervalo de confiança.

TABELA 4. Medidas de dispersão para o TC da classe 10 e TP da classe 1,2.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite do erro</i>
Bsh	2,892E-08	1,701E-04	3,401E-04
Rs	99,74	9,987	19,996
Xs	167,22	12,931	25,868

Os resultados da Tabela 4 indicam que o limite do erro obtido possui um valor elevado quando comparado ao valor da grandeza. Ao verificar o limite superior e inferior do intervalo de confiança, que são dados pelo valor da grandeza acrescido do limite do erro e o valor da grandeza subtraído do limite do erro, respectivamente, percebe-se que o intervalo possui uma margem elevada e apresenta inconsistências, como por exemplo, valor negativo para resistência em seu limite inferior. Assim, tendo em vista que o valor estimado de Rs para a referida linha foi de 16,128 ohm, estabelecer um erro máximo de 19,996 ohm (conforme Tabela 4) é inviável, tendo em vista que no estudo realizado, as medidas sequer continham erros.

Com intuito de analisar a sensibilidade das equações utilizadas no processo de estimação dos parâmetros, foram obtidos outros resultados diminuindo a classe de exatidão do TC e mantendo constante a classe de exatidão do TP e relé registrador. Os resultados das grandezas estatísticas para as classes de exatidão do TC de 2,5% e 0,3% são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. É importante frisar que essas novas classes de exatidão de TCs não são indicadas para aplicação em sistemas de proteção, e está sendo adotada nesse estudo apenas para fins de análise.

TABELA 5. Medidas de dispersão para o TC de classe 2,5 e TP de classe 1,2.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,490E-09	4,990E-05	9,980E-05
Rs	73,993	8,602	17,204
Xs	155,110	12,454	24,909

TABELA 6. Medidas de dispersão para TC de classe 0,3 e TP de classe 1,2.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,219E-05	1,490E-05	2,979E-05
Rs	71,783	8,472	16,945
Xs	154,073	12,412	24,825

Nota-se que os valores das medidas de dispersão acompanham a redução na classe de exatidão do TC, havendo uma redução mais acentuada nos valores dos resultados quando houve transição do TC de 10% para o de 2,5%, do que na transição do TC de 2,5% para o de 0,3%.

Também foi analisada apenas a influência da mudança na classe de exatidão do TP com relação aos parâmetros estatísticos que caracterizam as incertezas nos parâmetros da linha. Para isso, a classe do TP foi alterada para 0,3%, enquanto a classe do TC foi mantida no valor inicial de 10%, e não houve qualquer alteração na classe de exatidão do relé. É sabido que a classe de exatidão de 0,3% para TPs não são adequadas para uso em sistemas de proteção, e foi utilizada nesse trabalho apenas para verificar sua influência no equacionamento. A Tabela 7 apresenta os dados obtidos a partir da redução da classe de exatidão do TP.

TABELA 7. Medidas de dispersão para TC de classe 10 e TP de classe 0,3.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,891E-08	1,700E-04	3,401E-04
Rs	46,053	6,786	13,572
Xs	51,743	7,193	14,386

É possível perceber pelos resultados mostrados na Tabela 7, que diminuir a classe de exatidão do TP provoca uma redução mais acentuada na variância do que diminuir a classe de exatidão do TC. Isso pode ser visto comparando os resultados da Tabela 6 com a Tabela 7.

Apenas de forma hipotética, a Tabela 8 apresenta os resultados obtidos se a classe de exatidão de TC e TP fossem para 0,3%, tendo o relé permanecido em sua classe de exatidão de 0,6%.

TABELA 8. Medidas de dispersão para TC de classe 0,3 e TP de classe 0,3.

<i>Parâmetro</i>	<i>Variância (σ^2)</i>	<i>Desvio Padrão (σ)</i>	<i>Limite de erro</i>
Bsh	2,116E-10	1,049E-05	2,909E-05
Rs	18,098	4,254	8,508
Xs	38,589	6,21	12,424

A Tabela 8 mostra que apesar de o TC e TP estarem com classes de exatidão que inserem baixos erros nas medidas, a variância ainda não fornece um limite de erro que gere um limite de confiança factível.

Linhas de transmissão com outros níveis de tensão foram simuladas com intuito de verificar o desempenho do algoritmo de determinação de erros máximos proposto. Foram duas linhas com dados típicos da Eletrosul [8], uma operando em 138 kV e outra em 500 kV, sendo que ambas apresentaram resultados de medidas de dispersão dos parâmetros elétricos compatíveis com o mesmo perfil dos resultados apresentados para a linha de 230 kV.

Uma outra análise foi realizada para verificar qual parcela da Equação 1 possui maior influência na variância dos parâmetros. Viu-se que as parcelas que envolvem a derivada da equação dos parâmetros em relação às tensões, são as que mais contribuem para o elevado valor das variâncias dos parâmetros elétricos da linha.

5. CONCLUSÃO

Esse estudo buscou verificar os erros máximos contidos nos parâmetros elétricos de linhas de transmissão, baseando-se na teoria de propagação de incertezas, e na modelagem de erros a partir da classe de exatidão de TPs, TCs e relés registradores. A estimação dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão se torna importante pois esses dados possuem importância pois são utilizados em diversas etapas de análise e operação do sistema elétrico, por exemplo, em algoritmos de localização de faltas.

Os resultados mostraram que, mesmo inicialmente admitindo medidas de tensão e de corrente sem erros, em nenhuma das situações, a variância dos parâmetros gerou um valor factível para o limite de erro, fazendo com que o intervalo de confiança encontrado não fosse adequado para ser utilizado, pois compreendia uma faixa de variação muito grande para os valores dos parâmetros.

Foi possível verificar que o equacionamento é fortemente influenciado pelo valor das tensões e isso explica a maior sensibilidade das equações à variação na classe de exatidão do TP do que na classe de exatidão do TC.

Em suma, é possível afirmar que, para o equacionamento mostrado na seção 3, a estimativa dos limites de erro dos parâmetros elétricos longitudinais e transversais de linhas de transmissão não é confiável, quando modelada a partir da teoria de propagação de incertezas, e quando utiliza dados da classe de exatidão de TPs, TCs, e relés registradores.

REFERÊNCIAS

- [1] LI, Changgang; ZHANG, Yaping; ZHANG, Hengxu; WU, Qiuwei; TERZIJA, Vladimir. Measurement-Based Transmission Line Parameter Estimation With Adaptive Data Selection Scheme. Ieee Transactions

- On Smart Grid, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 5764-5773, nov. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [2] COSTA, Eduardo Coelho M.; KUROKAWA, Sérgio. Estimation of transmission line parameters using multiple methods. *Iet Generation, Transmission & Distribution*, [S.L.], v. 9, n. 16, p. 2617-2624, 3 dez. 2015. Institution of Engineering and Technology (IET).
- [3] PINEDA, J. T. R.; et. al. Método de Estimação de Parâmetros de Linhas de Transmissão baseado em Dados de Faltas. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Natal, Brasil, 2016.
- [4] HUGHES, Ifan G.; HASE, Thomas P. A. *Measurements and their Uncertainties: A Practical Guide to Modern Error Analysis*. New York: Oxford University Press, 2010. 137 p.
- [5] VUOLO, José Henrique. *Fundamentos da Teoria de Erros*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1996. 240 p.
- [6] TAYLOR, John R.. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 2. ed. Sausalito: University Science Books, 1997. 331 p.
- [7] CRUZ, Melinda Cesianara Silva da. Metodologia de estimação de estados para tratamento de medições errôneas e registros não sincronizados em algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão. 2015. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- [8] MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 2013.
- [9] KINDERMANN, Geraldo. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 3. ed. Florianópolis: Labplan, 2012. 1 v.
- [10] CAMARGO, C. Celso de Brasil. *Transmissão de Energia Elétrica: aspectos fundamentais*. 4. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2009. 277 p.



Artigo

Desempenho Entre os Algoritmos de Localização de Faltas Completo e Simplificado Para Linhas de Transmissão Com 3 Terminais e Parâmetros Elétricos Diferentes

Cleydson A. de C. Nascimento ^[1], Nikolas I. F. de Oliveira ^[2] e Iggor B. da Silva ^[3]

^[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; cleydson.adller@ifce.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nikolas.oliveira@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; iggor.silva@ufersa.edu.br

Recebido: 21/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: A linha de transmissão é o equipamento do sistema elétrico mais propício a uma falta elétrica. Com base nas condições difíceis de acesso a essas linhas, como o distanciamento das cidades e por possuir grandes dimensões, torna-se imprescindível localizar uma falta elétrica com precisão e rapidez. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre duas vertentes do Algoritmo de Girgis, Hart e Peterson (1992) para localizar uma falta elétrica: o modo completo e o simplificado. Para simular a linha de transmissão foi utilizado o *software* ATP[®] e os algoritmos foram desenvolvidos em um *software* voltado para cálculos numéricos. Os cenários de simulação levaram em consideração variações nos parâmetros resistivos e indutivos de alguns trechos da linha de transmissão, em busca da localização do ponto de falta e do respectivo erro de localização devido a essas modificações.

Palavras-chave: Localização de Faltas; Erros de Localização; Simulação Computacional

Abstract: The transmission line is the equipment of the electrical system most conducive to an electrical fault. Based on the difficult conditions of access to these lines, such as the distance from cities and because of its large dimensions, it is essential to locate an electrical fault accurately and quickly. The objective of this work is to carry out a comparative analysis between two aspects of the Girgis, Hart, and Peterson (1992) Algorithm to locate an electrical fault: the complete and the simplified model. To simulate the transmission line, the ATP[®] software was used and the algorithms were developed in software aimed at numerical calculations. The simulation scenarios took into account variations in the resistive and inductive parameters of some sections of the transmission line, in search of the location of the fault point and the respective location error due to these changes.

Key-words: Fault Location; Location Errors; Computational Simulation.

1. INTRODUÇÃO

A linha de transmissão é o componente do sistema elétrico responsável pelo transporte da energia da geração em direção as subestações, e conseqüentemente, aos consumidores. De acordo com [1], além de elemento intermediador, as linhas de transmissão garantem a estabilidade e confiabilidade da rede elétrica.

No Brasil, os investimentos nas linhas de transmissão se apresentam no Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE 2029), que trata das estratégias para o desenvolvimento energético no decênio 2019-2029. O PDE 2029 prevê um acréscimo de 56 mil quilômetros de novas linhas (totalizando 204 mil quilômetros de extensão) e conseqüentemente um investimento de R\$ 103,7 bilhões, sendo R\$ 73,6 bilhões em linhas de transmissão [1].

Ao avaliar os problemas que podem ocorrer em um sistema elétrico de transmissão, uma falta elétrica se apresenta como uma real preocupação. Isso acontece pois, durante esse sinistro, torna-se possível comprometer (totalmente ou parcialmente) o fornecimento dos blocos de energia elétrica para os consumidores finais.

Devidos a essas grandes extensões e a sua exposição (normalmente de forma aérea), a linha de transmissão torna-se um elemento passível de sofrer com faltas elétricas. Em números, [2] afirma que a linha aérea é o equipamento com maior probabilidade de ocorrência de uma falta, como exibido na Tabela 1.

TABELA 1. Probabilidade de ocorrência de falta nos equipamentos de um sistema elétrico

<i>Equipamentos do Sistema de Potência</i>	<i>Probabilidade de ocorrências</i>
Linhas Aéreas	50%
Cabos Subterrâneos	9%
Transformadores e reatores	10%
Geradores	7%
Disjuntores	12%
Transformadores de instrumento e equipamentos de controle	12%

Dessa forma, o estudo para localizar uma falta em uma linha de transmissão é altamente relevante, devido a ser o equipamento mais provável de ocorrer essa situação, além da própria natureza de uma falta elétrica que pode prejudicar a qualidade e continuidade do serviço elétrico.

Existem reais dificuldades para localizar uma falta elétrica em linhas de transmissão, devido as suas grandes extensões e estarem localizadas em locais com mobilidade comprometida. De acordo com [3], os autores abordam dificuldades em localizar uma falta utilizando o método convencional por patrulha ou helicóptero, além da lentidão em se obter uma localização correta devido ao deslocamento dos meios de transporte.

Com base nessas adversidades, o processamento digital de sinais se apresenta como solução na forma de impulsionar a construção de algoritmos computacionais. Esses algoritmos trabalham com dados discretos e com objetivos de determinar o local da falta de forma rápida e precisa. Dentre as diversas técnicas de localização de faltas dispostas na literatura, o algoritmo proposto por [4] se apresenta como uma técnica consolidada para localizações de faltas em diferentes topologias de rede.

Sendo assim, o presente trabalho se propõe utilizar-se do algoritmo proposto por [4] para três terminais e analisar o seu desempenho fazendo-se o uso do seu modo completo e simplificado, para trechos de linhas de transmissão com parâmetros elétricos diferentes. O objetivo torna-se em tirar conclusões sobre a precisão do método simplificado para variações de parâmetros elétricos em diferentes trechos de uma linha de transmissão.

2. ALGORITMO DE [4] PARA TRÊS TERMINAIS

O método de localização de faltas proposto por [4] utiliza dados sincronizados de tensão e corrente elétrica de três terminais (sendo eles os terminais S, R e P). Cada trecho de linha de transmissão (LS, LR e LP) são definidos e em quaisquer deles, pode ocorrer uma falta elétrica.

Além disso, por se tratar de trechos diferentes, cada um possui sua matriz de impedância série trifásica que dependem de seus parâmetros elétricos e representadas respectivamente por Z_S^{abc} , Z_R^{abc} e Z_P^{abc} . As medições de tensões e correntes elétricas em cada terminal são apresentadas através das expressões V_S^{abc} , V_R^{abc} , V_P^{abc} , I_S^{abc} , I_R^{abc} e I_P^{abc} . A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar do sistema analisado.

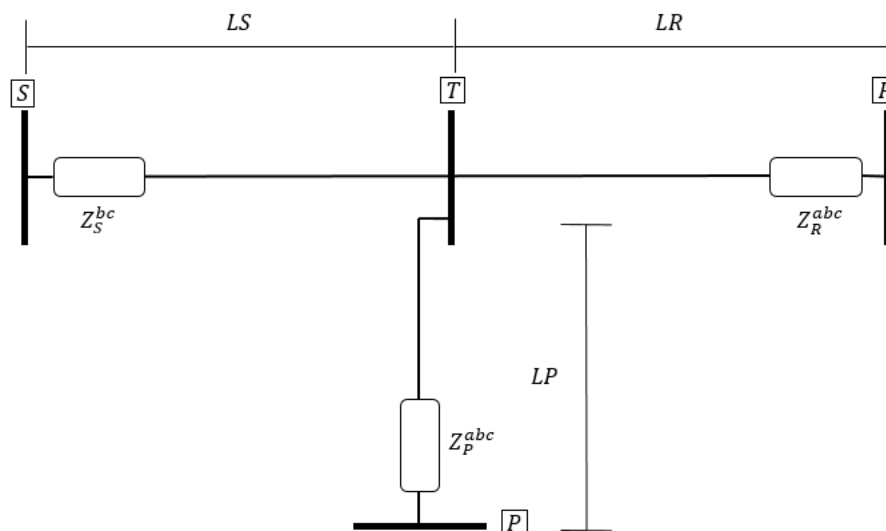


FIGURA 1. Sistema com três terminais de medição.

A técnica proposta desenvolve três equações trifásicas possíveis durante uma falta elétrica para o sistema analisado, na forma de encontrar equações que preencham o padrão $[Y]=[M]*D$, onde D é a distância da falta, $[Y]$ é a matriz que contém os termos trifásicos não dependentes da distância de falta e $[M]$ é a matriz que compreende os termos trifásicos dependentes da distância de falta.

Tendo conhecimento dos termos das matrizes trifásicas $[Y]$ e $[M]$, e utilizando um par das equações de falta, [4] propôs a solução de encontrar o ponto de falta (D) utilizando o método dos mínimos quadrados, como apresentado na Equação 1.

$$D=(M^+.M)^{-1}.M^+.Y \quad (1)$$

Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M .

Torna-se possível também, utilizar outros dois pares diferentes de equações, obter as matrizes $[Y']$ e $[M']$, e utilizar novamente os mínimos quadrados para obter a solução do ponto de falta, através da Equação 2.

$$D'=(M'^+.M')^{-1}.M'^+.Y' \quad (2)$$

Onde: M'^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M' .

Dessa forma, possibilita-se obter o ponto de falta através de qualquer uma das duas soluções encontradas (D e D'), visto que a solução do sistema é garantida. Em simulações computacionais percebe-se que esse par de respostas podem apresentar comportamentos diferentes (como velocidade de convergência e precisão) e dessa forma será analisado sempre os pares das respostas (D e D').

2.1. Algoritmo de [4] para uma modelagem completa

A descrição matemática para o algoritmo de [4] considerando os parâmetros elétricos individuais de cada trecho (LS , LR e LP) é apresentada em [5]. Para esse estudo, respeita-se as características elétricas dos trechos protegidos (Z_S^{abc} , Z_R^{abc} e Z_P^{abc}) podendo ser utilizado de forma mais genérica.

2.1.1. Falta elétrica em LS

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LS , como se mostra na Figura 2, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 3,4 e 5.

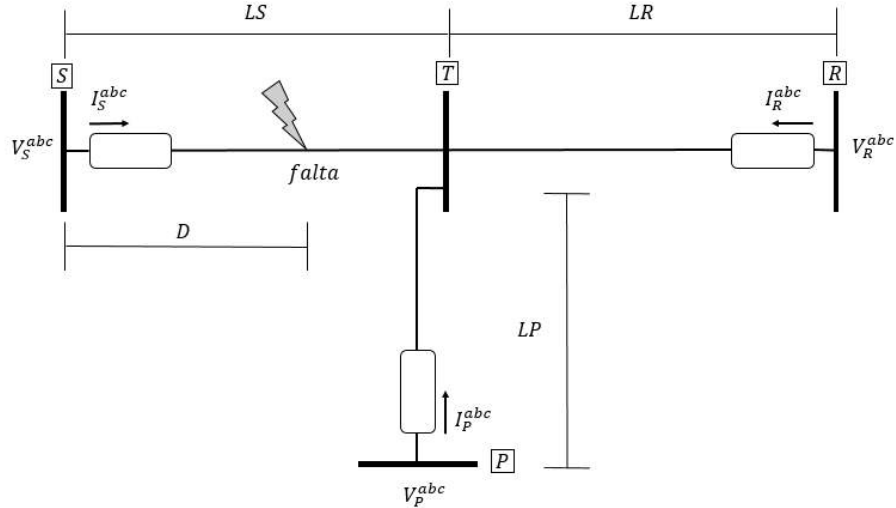


FIGURA 2. Falta elétrica ocorrida no trecho LS.

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - D \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} \quad (3)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - LR \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} - (LS - D) \cdot Z_S^{abc} \cdot (I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (4)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - LP \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} - (LS - D) \cdot Z_S^{abc} \cdot (I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (5)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 3 e 4, apresentando a Equação 6.

$$V_S^{abc} - V_R^{abc} + (LS \cdot Z_S^{abc} + LR \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_R^{abc} + Z_S^{abc} \cdot LS \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_S^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (6)$$

A Equação 6 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 7.

$$\begin{bmatrix} Y1_a \\ Y1_b \\ Y1_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (7)$$

Onde: $Y1_j = V_S^j - V_R^j + \sum_{k=a,b,c} (LS \cdot Z_S^{jk} + LR \cdot Z_R^{jk}) \cdot I_R^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_S^{jk} \cdot I_P^k);$

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} Z_S^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k);$$

$$j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c.$$

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 1.

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 3 e 5 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 8.

$$V_S^{abc} - V_P^{abc} + (LS \cdot Z_S^{abc} + LP \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_P^{abc} + Z_S^{abc} \cdot LS \cdot I_S^{abc} = D \cdot Z_S^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (8)$$

A Equação 8 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 9,

$$\begin{bmatrix} Y2_a \\ Y2_b \\ Y2_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D' \quad (9)$$

Onde: $Y2_j = V_S^j - V_P^j + \sum_{k=a,b,c} (LS \cdot Z_S^{jk} + LP \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_P^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_S^{jk} \cdot I_S^k);$

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} Z_S^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k);$$

$$j = a, b, c \text{ e } k = a, b, c.$$

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 2. Segundo [4], se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $D < LS$ e $D' < LS$.

2.1.2. Falta elétrica no trecho LR

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LR, como se mostra na Figura 3, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 10, 11 e 12.

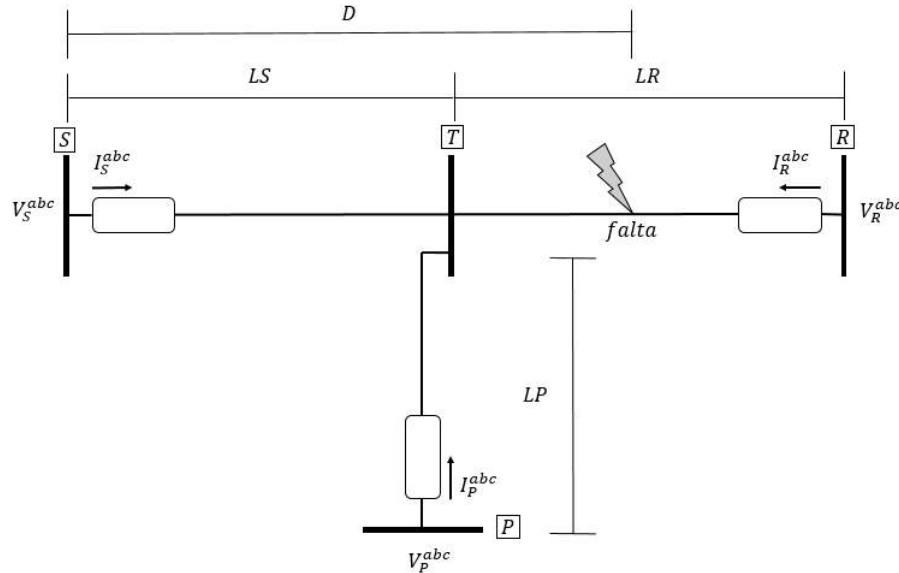


FIGURA 3. Falta elétrica ocorrida no trecho LR.

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - LS \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} - (D - LS) \cdot Z_R^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_P^{abc}) \quad (10)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - (LS + LR - D) \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} \quad (11)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - LP \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} - (D - LS) \cdot Z_R^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_P^{abc}) \quad (12)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 10 e 11, apresentando a Equação 13.

$$V_S^{abc} - V_R^{abc} + (-LS \cdot Z_S^{abc} + LS \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS + LR) \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} + LS \cdot Z_R^{abc} \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_R^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (13)$$

A Equação 13 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 14.

$$\begin{bmatrix} Y3_a \\ Y3_b \\ Y3_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M2_a \\ M2_b \\ M2_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (14)$$

Onde: $Y3_j = V_S^j - V_R^j + \sum_{k=a,b,c} (-LS \cdot Z_S^{jk} + LS \cdot Z_R^{jk}) \cdot I_S^k + (LS + LR) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_R^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_P^k$;
 $M2_j = \sum_{k=a,b,c} Z_R^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k)$;
 $j = a, b, c$ e $k = a, b, c$.

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 1.

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 11 e 12 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 15.

$$V_P^{abc} - V_R^{abc} + (LS \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS+LR)Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} - (LP \cdot Z_P^{abc} - LS \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_S^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (15)$$

A Equação 15 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 16.

$$\begin{bmatrix} Y4_a \\ Y4_b \\ Y4_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M2_a \\ M2_b \\ M2_c \end{bmatrix} \cdot D' \quad (16)$$

Onde: $Y4_j = V_P^j - V_R^j + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_S^k + (LS+LR) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_R^k - \sum_{k=a,b,c} (LP \cdot Z_P^{jk} - LS \cdot Z_R^{jk}) \cdot I_P^k$;
 $M2_j = \sum_{k=a,b,c} Z_R^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k)$;
 $j=a,b,c$ e $k=a, b, c$.

O método dos mínimos quadrados pode ser novamente aplicado, para se determinar o valor da localização de falta D' como é apresentada na Equação 2. De acordo com [4], se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $LS < D < (LS+LR)$ e $LS < D' < (LS+LR)$.

2.1.3. Falta elétrica em LP

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LP, como se mostra na Figura 4, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 17, 18 e 19.

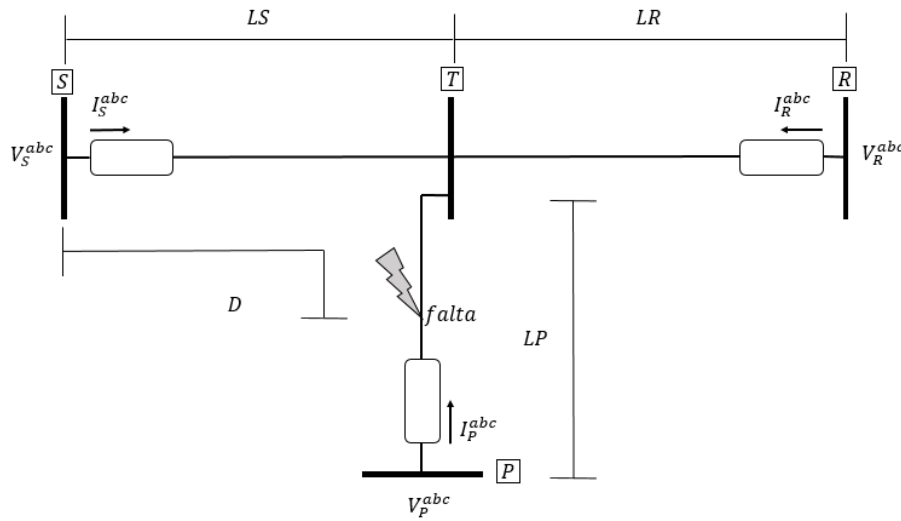


Figura 4. Falta elétrica ocorrida no trecho LP.

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - LS \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} - (D-LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc}) \quad (17)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - LR \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} - (D-LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc}) \quad (18)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - (LS+LP-D) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} \quad (19)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 17 e 19, apresentando a Equação 20.

$$V_S^{abc} - V_P^{abc} + (-LS \cdot Z_S^{abc} + LS \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_R^{abc} + (LS+LP) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (20)$$

A Equação 20 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 21.

$$\begin{bmatrix} Y5_a \\ Y5_b \\ Y5_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M3_a \\ M3_b \\ M3_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (21)$$

Onde: $Y5_j = V_S^j - V_P^j + \sum_{k=a,b,c} (-LS \cdot Z_S^{jk} + LS \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_S^k + (LS) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_R^k + (LS+LP) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_P^k$;
 $M3_j = \sum_{k=a,b,c} Z_P^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k)$;
 $j=a,b,c$ e $k=a, b, c$.

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 1.

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 18 e 19 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 22.

$$V_R^{abc} - V_P^{abc} + LS \cdot Z_P^{abc} \cdot I_S^{abc} + (-LR \cdot Z_R^{abc} + LS \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_R^{abc} + (LS+LP) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_P^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (22)$$

A Equação 22 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 23.

$$\begin{bmatrix} Y6_a \\ Y6_b \\ Y6_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M3_a \\ M3_b \\ M3_c \end{bmatrix} \cdot D' \quad (23)$$

Onde: $Y6_j = V_R^j - V_P^j + (LS) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_S^k + \sum_{k=a,b,c} (-LR \cdot Z_R^{jk} + LS \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_R^k + (LS+LP) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_P^k$;
 $M3_j = \sum_{k=a,b,c} Z_P^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k)$;
 $j=a,b,c$ e $k=a, b, c$

O método dos mínimos quadrados pode ser novamente aplicado, para se determinar o valor da localização de falta D' como é apresentada na Equação 2. É afirmado em [4] que se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $LS < D < (LS+LP)$ e $LS < D' < (LS+LP)$.

2.2. Algoritmo de [4] para uma modelagem simplificada

De forma a simplificar a análise, [4] apresenta processo de localização da falta ao considerar que todos os trechos de linha possuam parâmetros elétricos idênticos e consequentemente a mesma matriz de impedância trifásica (Z_{abc}).

Com esse artifício, um estudo que envolveria um método de localização para todos os percursos (LS, LR e LP) agora poderia ser resumido a uma análise trifásica unicamente para o trecho LS (Equações 7 e 9) e obedecendo um indicativo da simplificação apresentada na Figura 5. A limitação dessa simplificação é de que, em sua modelagem, não se leva em consideração linhas com parâmetros elétricos diferentes.

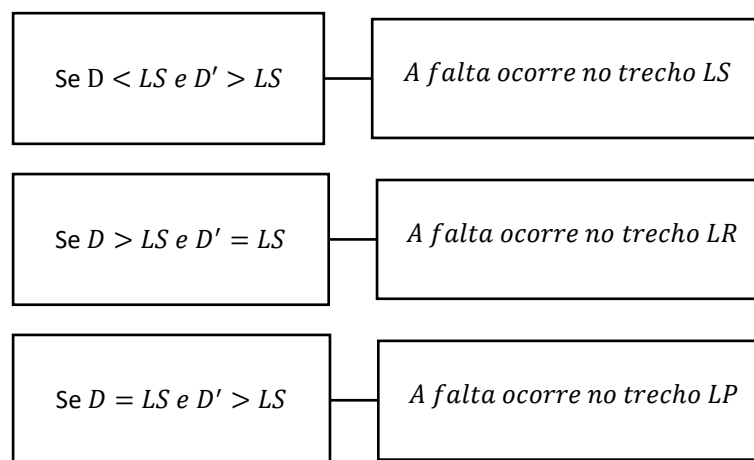


FIGURA 5. Simplificação proposta por [4].

3. METODOLOGIA

Esta seção apresenta as etapas iniciais necessárias para obtenção dos resultados computacionais ao desenvolver as técnicas apresentadas em algoritmos de programação, sendo essas: o modelo da rede adotada, os parâmetros elétricos das linhas de transmissão, e as características de amostragem dos sinais analisados.

3.1. Modelo da Rede Adotada

Para simular o sistema desejado e obter os dados de tensão e corrente, foi utilizado o *software Alternative Transients Programs*[®] (ATP[®]). A Figura 6 apresenta essa rede adotada para simulação, formada por: três geradores (G_S , G_R e G_P), três impedâncias equivalentes que representam as características do SEP a montante (ZTH_S , ZTH_R e ZTH_P), e a zona de detecção de falta localizada entre os três terminais (S , R e P), onde será obtido os sinais de tensões e correntes do comportamento do sistema.

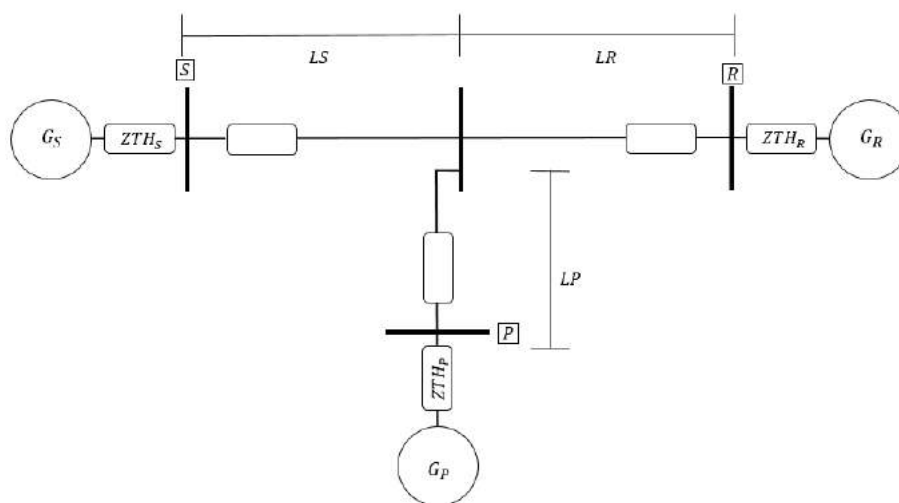


FIGURA 6. Sistema de 3 terminais simulado no *software* ATP[®].

Esses dados discretizados são conduzidos para o Algoritmo de Estimação Fasorial de Fourier de Ciclo Completo e a partir daí os fasores obtidos nos terminais medidores (S, R e P) posteriormente podem ser utilizados no método proposto por [4].

3.2. Parâmetros Elétricos da Linha de Transmissão Simulada

O estudo foi baseado em uma linha de transmissão de 138 kV com parâmetros elétricos de linhas típicas da Eletrosul, exposto por [6] e apresentados na Tabela 2. A escolha de uma linha de 138 kV acontece devido ao algoritmo de [4] ser mais indicado para aplicações em linhas curtas e por não considerar o ramo de admitância *shunt* em sua modelagem, como afirmado por [7].

TABELA 2. Parâmetros para uma Linha de Transmissão de 138 kV.

Sequência	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Capacitância (nF/km)
Zero	0,4163817	1,69306	5,5
Positiva	0,115674	0,46218	9,54

3.3. Performance do Algoritmo de Localização

Com o objetivo de avaliar a precisão do algoritmo de localização trabalhado, utiliza-se o parâmetro de erro de localização de faltas (E). Essa informação é obtida através da diferença absoluta entre a distância estimada pelo algoritmo (D_{estimado}) e a distância real (D_{real}) com base no comprimento do trecho protegido (L). A Equação 24 quantifica o respectivo índice.

$$E(\%) = \frac{|D_{\text{estimado}} - D_{\text{real}}| \cdot 100}{L} \quad (24)$$

3.4. Parâmetros para simulação

A Tabela 3 apresenta os parâmetros básicos para as simulações, modificando apenas características específicas de cada cenário.

TABELA 3. Parâmetros básicos para simulação.

<i>Parâmetros</i>	<i>Opção Escolhida</i>
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Sincronizados
Comprimento das LTs	LS = LR = LP = 90km
Impedância dos circuitos equivalentes ($Z_{TH_{SRP}}$)	$Z_{TH_0}=17,435 \angle 76,18^\circ$ V $Z_{TH_+}=4,764 \angle 75,94^\circ$ V
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	$V_S=1,00 \angle 0^\circ$ p.u $V_R=0,98 \angle -10^\circ$ p.u $V_P=0,99 \angle 10^\circ$ p.u
Frequência da rede	60 Hz
Frequência de Amostragem dos Sinais	15360Hz
Nº Amostras por Ciclo	256
Tipo da Falta Elétrica	Monofásica – Fase A
Local da Falta (Teórico)	112,5km (entre S e P)

4. RESULTADOS

Os resultados contidos nesse artigo são divididos em dois cenários de simulação. Com o objetivo de tirar as melhores conclusões sobre esses resultados, foi considerado que o trecho LS obedece aos parâmetros elétricos padrões da Tabela 3 e ocorrerão variações dos parâmetros elétricos dos trechos LR e LP.

Essas variações ocorrerão apenas nos parâmetros de resistência e indutância e serão individuais por cada trecho. Devido ao próprio algoritmo de localização não considerar o ramo *shunt* em sua modelagem, não foi modificado os parâmetros de capacitância de nenhum percurso de linha.

O primeiro cenário realiza-se uma variação nas resistências da linha de transmissão, de forma que o trecho LR será incrementado em 20% e o percurso LP será decrementado em 20%. O segundo, por sua vez, apresenta variações na indutância da linha de transmissão, incrementando 20% para o trecho LR e decrementando em 20% a indutância do trecho LP.

Independentemente da técnica completa ou simplificada, o algoritmo de [4] produz um par de soluções para localização da falta (D e D'), como apresentado nas Equações 1 e 2, gerando assim quatro soluções possíveis (duas por cada método). Ambas as soluções serão apresentadas para os métodos graficamente. O erro de localização de faltas também será apresentado em gráfico mostrando a precisão para as soluções encontradas pelos algoritmos utilizados.

4.1. Variação das resistências nos trechos LR e LP

A Figura 7 apresenta o resultado da localização encontrada para os métodos completo e simplificado do algoritmo de [4] quando ocorre uma variação dos parâmetros de resistência nos trechos LR e LP em +20% e -20%, respectivamente. Como apresentado na Tabela 3, a distância teórica da falta é de 112,5 km.

Graficamente é perceptível que as soluções providas dos algoritmos completo e simplificado convergem para próximo do valor teórico. A Tabela 4 apresenta os resultados pontuais quando a localização da falta se encontra em regime permanente.

TABELA 4. Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas.

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
112,4 km	112,4 km	112,7 km	112,9 km

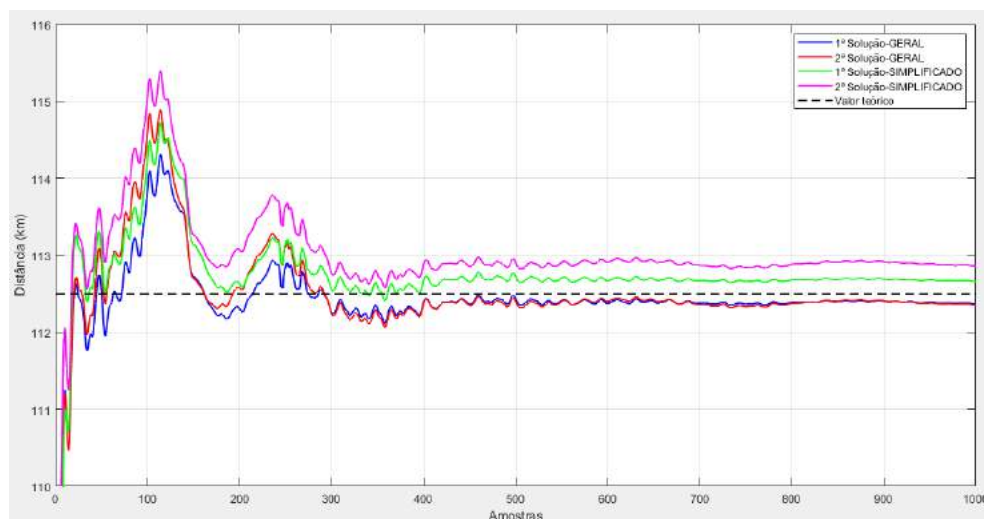


FIGURA 7. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

A Figura 8, por sua vez, exibe graficamente o erro de localização (E) considerando a mesma análise. A Tabela 5 apresenta os erros de localização pontuais para os valores em regime permanente, ficando perceptível a precisão de ambos os métodos (erros menores que 0,21%).

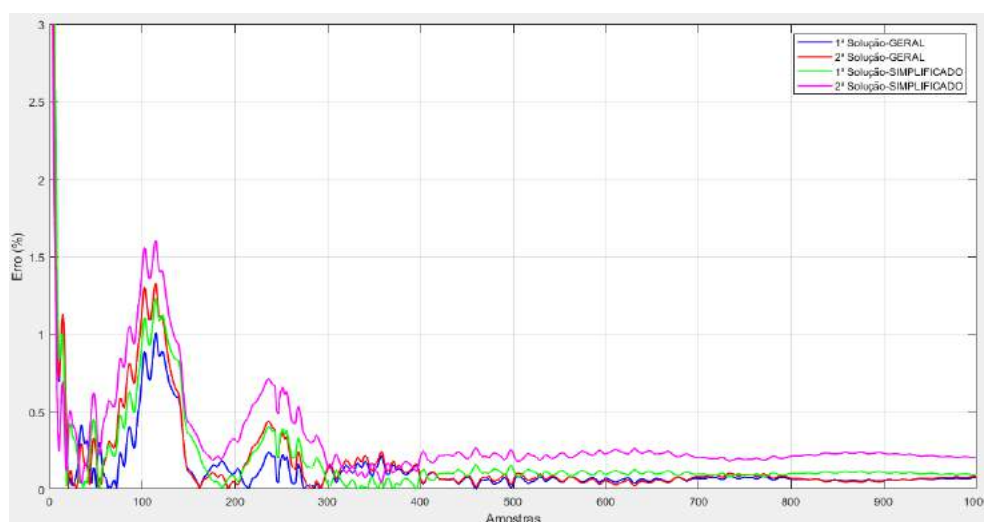


FIGURA 8. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

TABELA 5. Erro de Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas.

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
0,07426%	0,07426%	0,09015%	0,2018%

4.2. Variação das indutâncias nos trechos LR e LP

A Figura 9 apresenta o resultado da localização encontrada para os métodos completo e simplificado do Algoritmo de [4] quando ocorre uma variação dos parâmetros de indutâncias nos trechos LR e LP em +20% e -20%, respectivamente. Como apresentado na Tabela 3, a distância teórica da falta é de 112,5 km.

Graficamente é perceptível que as soluções providas do algoritmo completo apresentam melhores resultados e se aproximam do valor teórico, já o algoritmo simplificado estabiliza-se acima da respectiva referência. A Tabela 6 apresenta os resultados pontuais quando a localização da falta se encontra em regime permanente.

TABELA 6. Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
112,4 km	112,4 km	117 km	120,7 km

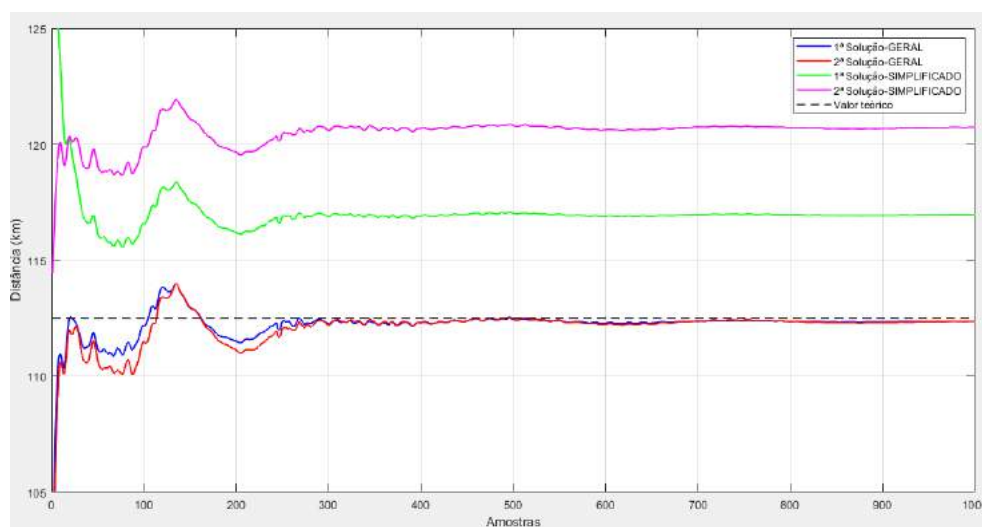


FIGURA 9. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

A Figura 10, por sua vez, exibe graficamente o erro de localização (E) considerando a mesma análise. A Tabela 7 apresenta os erros de localização pontuais para os valores em regime permanente, ficando perceptível a precisão do método generalizado (0,07426%) e a apresentação de erros máximos próximos a 5% com o método simplificado.

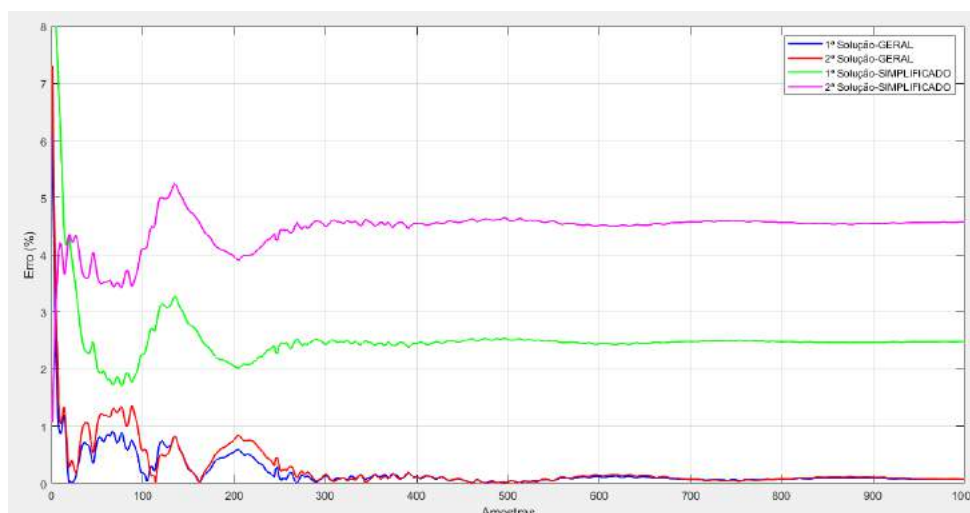


FIGURA 10. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

TABELA 7. Erro de Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas.

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
0,07426%	0,07426%	2,48%	4,567%

5. CONCLUSÃO

Este estudo procurou verificar o desempenho dos algoritmos simplificados e completos propostos por [4] com três terminais para situações onde ocorre variações dos parâmetros elétricos em diferentes trechos.

Para o cenário 1, onde foi feita modificações dos parâmetros de resistência da linha, percebe-se que essas variações pouco afetaram a precisão do algoritmo. Neste caso, os algoritmos gerais e simplificados se

comportaram de maneira equivalente, como mostra as Figuras 7 e 8. Os erros foram considerados satisfatórios para ambas as técnicas aplicadas, ficando abaixo de 0,21%.

O cenário 2, por sua vez, foi simulado com variações nos parâmetros de indutância da linha de transmissão e notou-se que essa modificação afetou consideravelmente a precisão do ponto de falta encontrado pelo algoritmo. Enquanto o método completo apresentou erros inferiores a 0,1 %, o método simplificado apontou erros na faixa de 4,5% (um erro 45 vezes maior). As Figuras 9 e 10, juntamente com as Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados pertinente a essa simulação.

O algoritmo de [4] em seu modo completo, que considera os parâmetros individuais de cada trecho protegido, apresentou resultados precisos. Para as situações simuladas, erros sempre abaixo de 0,1%.

Já o método simplificado do algoritmo de [4], apresentou pouca influência devido a variações dos parâmetros de resistência elétrica dos trechos. Por outro lado, a precisão do mesmo é diretamente influenciada por variações na natureza indutiva da linha de transmissão, considerando as simulações realizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. 2019. 382 p.
- [2] PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi: Phi, 2003. 287 p.
- [3] RAYBOLT, Ana Carolina da Silva. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão em Circuito Duplo Utilizando Redes Neurais Artificiais*. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coppe, Rio de Janeiro, 2011.
- [4] GIRGIS, A.a.; HART, D.g.; PETERSON, W.l.. *A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Liness*. IEEE Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 98-107, 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [5] NASCIMENTO, Cleydson Adller de Castro. *Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3F)*. 2020. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020.
- [6] CAMARGO, C. Celso de Brasil. *Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos fundamentais*. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2006. 277 p.
- [7] SILVEIRA, Eduardo Gonzaga da. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas*. 2007. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.



Artigo

Propulsão Hipersônica: limitações e alternativas

Artur Cristiano Paulino Pereira ^[1], Paulo Gilberto de Paula Toro ^[2] e George Santos Marinho ^[3]

^[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte; arturcpp17@gmail.com

^[2] Universidade Federal do Rio Grande do Norte; toro11ptoro@gmail.com

^[3] Universidade Federal do Rio Grande do Norte; gmarinho@ct.ufrn.br

Recebido: 21/11/2020;

Aceito: 24/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: Desde o final do século XX, o setor aeroespacial tem buscado alternativas para tornar o voo na atmosfera terrestre e o acesso ao espaço atividades mais próximas ao cotidiano do cidadão comum – seja para viagens a negócios ou atividades de lazer/aventura. Os veículos para atender a essas demandas devem combinar leveza, resistência e potência à segurança e custo acessível. Configura-se, portanto, um desafio de alta complexidade. Nesse sentido, empresas e órgãos governamentais têm se empenhado no desenvolvimento de veículos integrados ao sistema de propulsão scramjet – com capacidade para promover voo em velocidades hipersônicas, i. e., acima de Mach 5 (cinco vezes a velocidade do som). Trata-se de uma tecnologia que pode ser aplicada para voos na troposfera, na estratosfera e em missões de acesso à órbita terrestre. Entretanto, diversos problemas devem ser resolvidos antes que o primeiro veículo desse tipo se torne comercialmente operacional. Hoje, poucos países dispõem de recursos humanos e infraestrutura laboratorial dedicados à pesquisa em tecnologia scramjet – o Brasil é um dos integrantes desse seleto grupo. Neste artigo de revisão, descrevem-se os princípios de funcionamento, comparam-se vantagens e desvantagens do uso de hidrogênio como combustível em relação aos hidrocarbonetos e discutem-se problemas atinentes à proteção térmica, mistura combustível – ar e estabilização de chama do sistema de propulsão scramjet. Também se discorre sobre a relevância de aspectos geométricos do projeto da câmara, considerando-se alternativas para solução de problemas específicos do processo de combustão – como mistura e estabilização de chama, baseadas na inserção de descontinuidades (e.g., *struts*, *pylons*, *degraus*, cavidades e rampas) no caminho do escoamento dos fluidos de trabalho. Além disso, faz-se uma comparação entre os impulsos específicos de diferentes sistemas propulsivos (foguetes, turbojatos, ramjets e scramjets) quando utilizando hidrogênio e hidrocarboneto. Considerando-se os dados obtidos, foi possível evidenciar que, em se tratando do processo de combustão, as desvantagens atinentes à utilização do hidrogênio como combustível para promover propulsão hipersônica aspirada são, pelo menos teoricamente, superadas pelas vantagens de impulso específico e poder calorífico obtidas, cujos valores são superiores àqueles relativos ao uso de hidrocarbonetos.

Palavras-chave: Voo hipersônico; Hidrogênio; Acesso ao espaço.

Abstract: Since the end of the 20th century, the aerospace sector has been looking for alternatives to make flying in the earth's atmosphere and access to space activities closer to the everyday life of ordinary citizens - whether for business trips or leisure/adventure activities. The vehicles to meet these demands must combine lightness, endurance, and power with safety and affordability. A challenge of high complexity is therefore configured. In this sense, companies and government agencies have been engaged in the development of vehicles integrated with the scramjet propulsion system - with the capacity to promote flight at hypersonic speeds, i.e., above Mach 5 (five times the speed of sound). This is a technology that can be applied for flights in the troposphere, stratosphere, and in access missions to Earth orbit. However, several problems must be solved before the first such vehicle becomes commercially operational. Today, few countries have human resources and laboratory infrastructure dedicated to scramjet technology research - Brazil is one of the members of this select group. This review article describes the principles of operation, compares the advantages and disadvantages of using hydrogen as a fuel concerning hydrocarbons, and discusses problems related to thermal protection, fuel-air mixing, and flame stabilization of the scramjet propulsion system. The relevance of geometric aspects of the chamber design is also discussed, considering alternatives for solving specific problems of the combustion process - such as mixture and flame stabilization, based on the insertion

of discontinuities (e.g., struts, pylons, steps, cavities, and ramps) in the flow path of the working fluids. Besides, a comparison is made between the specific impulses of different propulsive systems (rockets, turbojets, ramjets, and scramjets) when using hydrogen and hydrocarbon. Considering the data obtained, it was possible to evidence that, when it comes to the combustion process, the disadvantages regarding the use of hydrogen as a fuel to promote aspirated hypersonic propulsion are, at least theoretically, overcome by the advantages of specific impulse and calorific power obtained, whose values are higher than those relative to the use of hydrocarbons.

Key-words: Hypersonic Flight; Hydrogen; Access to space.

1. INTRODUÇÃO

HÁ um hiato na aviação comercial moderna desde as saídas de cena do Concorde e do Tupolev Tu-144, quando os voos em velocidades supersônicas ficaram restritos às aeronaves militares. Acredita-se que o nicho de oportunidades será preenchido muito em breve, pois há uma corrida mundial entre empresas e órgãos governamentais para proporcionar não apenas o retorno do voo supersônico, mas algo que revolucionará o transporte aeroespacial – a tecnologia hipersônica.

O voo pode ser classificado em quatro categorias em função da velocidade (ver Tabela 1), quantificadas pelo número de Mach, matematicamente expresso por:

$$M = \frac{v}{a} \quad (1)$$

sendo **M** (adimensional) o número de Mach, **v** (m/s) a velocidade de deslocamento do veículo e **a** (m/s) a velocidade do som na altitude de voo do veículo.

TABELA 1. Classificação do voo quanto à velocidade [1].

<i>Número de Mach</i>	<i>Classificação</i>
$0 < M < 0,8$	Subsônico
$0,8 < M < 1,2$	Transônico
$1,2 < M < 5,0$	Supersônico
$M > 5,0$	Hipersônico

Embora o empreendimento comercial ainda esteja em fase de projeto, a viabilidade técnica do voo hipersônico tripulado já foi demonstrada na década de 1950, durante os experimentos com aeronaves da série X – 15 (ver Figura 1).

O veículo X – 15 transportava o próprio comburente (oxigênio líquido), usava motor de foguete que proporcionava impulso durante cerca de 10 minutos, suportava temperaturas próximas a 800 °C por breves períodos, atingia velocidades superiores a Mach 6 (acima de 7.000 km/h) e ultrapassava 100 km de altitude [2], ou seja, além da linha de von Karman. Portanto, superou os limites previstos no projeto e cumpriu a meta de demonstrar a viabilidade do voo à reação na alta atmosfera terrestre. Mais de cinquenta anos depois do X – 15, contudo, para ser adaptada ao voo comercial, atendendo aos critérios de conforto e segurança, a tecnologia hipersônica ainda necessita de mais tempo, mais dinheiro e, principalmente, mais cérebros.

Nesta breve narrativa será descrito um novo conceito de propulsão que, acredita-se, poderá ajudar a aproximar o voo hipersônico comercial da realidade, com possibilidades de aplicação ao voo espacial.

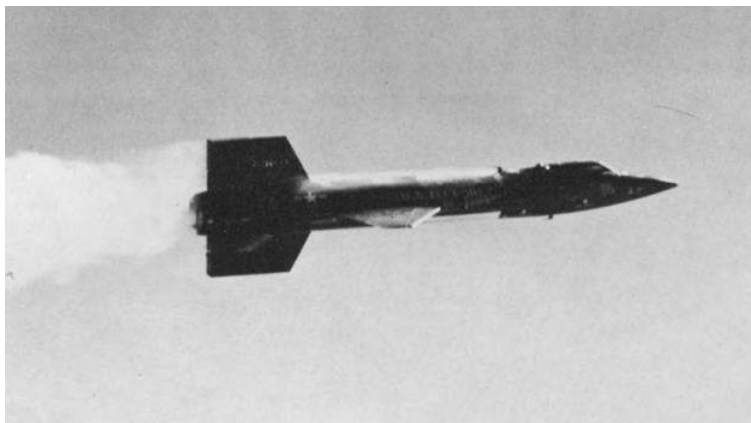


FIGURA 1. Aeronave experimental X – 15 durante voo em velocidade hipersônica na década de 1950 [2].

Assim como o turbojato das aeronaves convencionais, o scramjet (*supersonic combustion ramjet* – ramjet de combustão supersônica) é um sistema de propulsão aspirada que utiliza ar atmosférico para queimar combustível e gerar impulso [3]. Entretanto, diferentemente do turbojato – onde um conjunto compressor / turbina comprime o ar utilizado na combustão, o efeito *ram* consiste no aproveitamento da energia cinética do fluxo incidente na entrada do veículo para aumentar a pressão estática do ar [4, 5]. Trata-se de um “tubo vazado”, portanto, sem partes móveis em sua estrutura, por onde o ar entra pela extremidade frontal e os gases de combustão saem pela extremidade posterior. O deslocamento em velocidade hipersônica gera uma onda de choque que, graças à geometria do veículo, é refletida para dentro do tubo, aumentando a temperatura e a pressão do ar e reduzindo a velocidade do escoamento que chega à câmara de combustão até valores supersônicos; ao ser misturado ao ar nessa condição (temperatura e pressão elevadas), o combustível atinge o ponto de autoignição, expande-se durante a queima e é expelido, gerando impulso. O aproveitamento do oxigênio atmosférico para combustão permite ao veículo scramjet economia de peso – uma vantagem em relação aos foguetes, que têm de transportar o próprio oxigênio para queimar o propelente mesmo durante a etapa do voo que ocorre dentro da atmosfera.

Devido à ausência de partes móveis, Seleznev, Surzhikov e Shang [6] consideram o scramjet um dos mais promissores sistemas de propulsão. Além disso, como não necessita armazenar oxidante, torna-se uma opção mais leve e, conseqüentemente, mais econômica quando comparado a outros sistemas propulsivos [7].

Antonio Ferri concebeu a tecnologia scramjet na década de 1950, sendo a combustão supersônica demonstrada em laboratório na década de 1960, em túneis de vento [8]. A partir de então, aumentou a pesquisa para se compreender o fenômeno da combustão supersônica.

Atualmente, EUA, Rússia, China, Japão, França, Alemanha, Índia e Brasil despontam entre os principais países a realizar atividades de pesquisa sobre scramjet [7]. Como resultado, uma ampla gama de veículos demonstradores dessa tecnologia foi desenvolvida e testada, a saber: X-43 [9], HyShot [10], X-51 [11], HIFiRE [12] e HEXAFLY-INT [13].

Desde 2007, o Brasil desenvolve o Projeto 14 – X, um veículo aeroespacial para demonstração da tecnologia hipersônica scramjet. As pesquisas são realizadas no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), em São José dos Campos – SP, dotado de um conjunto de laboratórios (Figura 2) com infraestrutura para realização de experimentos e elaboração de diagnósticos de processos sobre escoamentos hipersônicos. Algumas técnicas de diagnóstico (e.g., por meio de laser) são inéditas. Atualmente, os esforços se concentram na integração do veículo 14 – X ao lançador sub-orbital VS-30, desenvolvido pelo IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço), com previsão para tese em voo entre 2021 e 2022, a ser realizado no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA).

A simplicidade devido à ausência de partes móveis está intrinsecamente associada à necessidade de acoplamento do scramjet a um equipamento auxiliar, dotado de sistema propulsivo convencional, que pode ser turbojato ou motores-foguete [14]. Esse equipamento tem a função de imprimir ao scramjet a velocidade requerida para causar um escoamento com alta energia cinética na região da entrada de ar, originando as ondas de choque oblíquas que comprimem e aquecem a mistura combustível – ar até valores que causem autoignição [15]. Em resumo, para o scramjet funcionar é preciso empurrá-lo até velocidades hipersônicas.

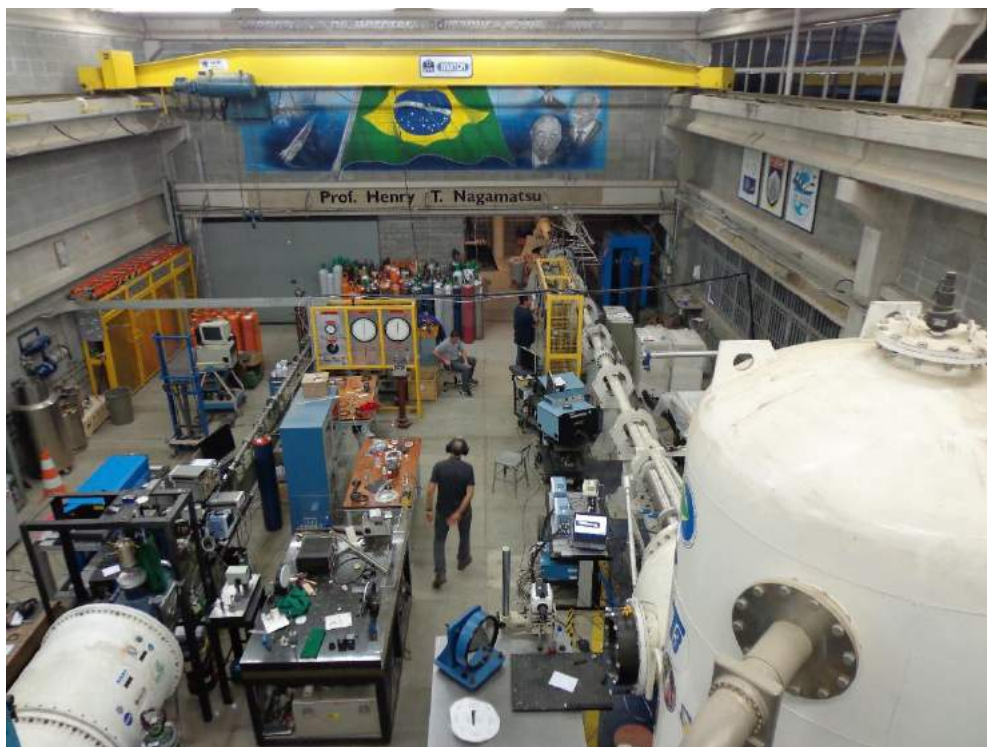


FIGURA 2. Túneis de vento hipersônicos do Laboratório Prof. Henry Nagamatsu, do IEAv / Brasil.

Scramjets são constituídos basicamente por três seções: *inlet* (seção de compressão), câmara de combustão e *nozzle* (seção de expansão). A geometria do *inlet* produz ondas de choque oblíquas responsáveis pela desaceleração, compressão e aquecimento do ar atmosférico, inicialmente em velocidade hipersônica (correspondente a $M > 5$). O ar admitido entra na câmara de combustão em velocidade supersônica ($1 < M < 5$), onde combustível é injetado e entra em autoignição. Os gases resultantes da queima são expandidos e acelerados pelo *nozzle*, produzindo empuxo. Na Figura 3 representa-se um scramjet genérico.

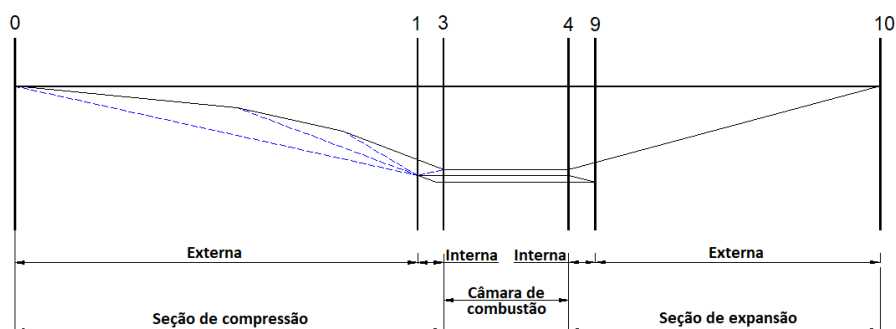


FIGURA 3. Representação genérica de um scramjet e de suas seções [16].

A numeração mostrada na Figura 3 indica os pontos que delimitam cada seção do scramjet e é derivada da designação das seções em turbinas a gás [17]. O ponto 0 indica o bordo de ataque do veículo. Entre os pontos 0 e 3 encontra-se a seção de compressão, dividida em compressão externa (entre 0 e 1) e interna (entre 1 e 3). A câmara de combustão está localizada entre os pontos 3 e 4. Entre os pontos 4 e 10 tem-se a seção de expansão, sendo expansão interna entre os pontos 4 e 9 e externa entre os pontos 9 e 10.

Durante a combustão, a energia térmica é liberada e gera um gradiente de pressão que pode se propagar na direção do *inlet*, provocando o descolamento da camada limite do escoamento e, conseqüentemente, a interrupção do escoamento interno ao scramjet. Este fenômeno é conhecido como *unstart* [6].

A condição de *unstart* leva à perda de empuxo e de controle do veículo, e pode ser evitada adicionando entre o *inlet* e a câmara de combustão uma outra seção chamada de isolador. O isolador impede que os distúrbios

gerados na câmara de combustão alcancem o *inlet* [18]. De acordo com Seleznev, Surzhikov e Shang [6], a possibilidade de ocorrer a condição de *unstart* diminui quando o scramjet opera em Mach acima de oito.

No presente artigo de revisão, procurou-se proporcionar um panorama do potencial de aplicação da tecnologia scramjet e discutir brevemente a utilização de hidrogênio como combustível em comparação aos hidrocarbonetos. Além disso, são apresentados alguns problemas desafiadores da pesquisa em scramjet.

2. APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA SCRAMJET

Entre as perspectivas de aplicação da tecnologia scramjet em curto ou médio prazo, destacam-se o transporte aeronáutico e o acesso ao espaço. Nesses casos, as possibilidades podem constituir alternativas mais econômicas para voos comerciais e transporte de cargas à órbita terrestre, uma vez que os veículos designados a essas atividades obterão o oxidante necessário à combustão diretamente da atmosfera, não necessitando levá-lo a bordo – uma vantagem significativa em relação à tecnologia de foguetes [15]. Prevê-se que aeronaves hipersônicas poderão reduzir drasticamente o tempo de viagens intercontinentais, resultando, por exemplo, em um voo de 110 minutos entre Tóquio e Los Angeles [19].

Para reduzir o intenso aquecimento aerodinâmico associado ao deslocamento em velocidades hipersônicas na atmosfera, provocado pelo atrito entre o ar e a superfície do veículo [20], pode-se recorrer à estratégia de realizar a fase de cruzeiro do voo comercial em altitudes superiores a 24 km [19], podendo chegar até cerca de 61 km, a máxima altitude prevista para veículos dotados de propulsão aspirada [21].

O aproveitamento do oxigênio atmosférico para combustão traz vantagens também no acesso ao espaço, uma vez que, ao eliminar o peso do oxidante, os veículos poderão aumentar a fração de carga útil transportada à órbita terrestre. É importante destacar outra vantagem, essencial à atividade espacial: o impulso específico proporcionado por scramjets é superior àquele obtido por meio de motores-foguete. Prevê-se que a combinação desses fatores implique na redução de 10 a 100 vezes dos custos de acesso ao espaço [22].

Conforme citado, scramjets dependem de um sistema propulsivo auxiliar para atingir a velocidade mínima de operação – em torno de Mach 4 [22]. Além disso, operam até uma altitude máxima de aproximadamente 60 km [21], devido à redução do oxigênio disponível na atmosfera terrestre [3]. Assim, conclui-se que as missões de acesso ao espaço por meio de tecnologia scramjet estarão intrinsecamente associadas a um sistema de lançamento de ciclo-combinado (multi-estágios), podendo ser: motor-foguete no primeiro estágio, para acelerar o conjunto até cerca de 30 km e $M \sim 4$, scramjet no segundo estágio, acelerando o conjunto até 60 km e $M \sim 10$ e o estágio final novamente impulsionado por motor-foguete. Seja em aplicações aeronáuticas ou espaciais, a viabilidade técnico-econômica do uso da tecnologia scramjet depende do domínio minucioso das complexidades atinentes aos processos de conversão da energia química em movimento.

3. HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL – VANTAGENS E DESVANTAGENS EM RELAÇÃO AOS HIDROCARBONETOS

O uso do hidrogênio como combustível em scramjets traz algumas vantagens em relação aos hidrocarbonetos. O H_2 possui alta velocidade de reação [23], alto poder calorífico (119,6 MJ/kg) e amplo limite de inflamabilidade – entre 4 e 74% em volume [24]. A inflamabilidade elevada requer menos energia para ignição, resultando em uma queima mais rápida se comparada aos hidrocarbonetos. O H_2 também possui alta difusividade, o que significa misturar-se mais facilmente ao ar [7]. Seu baixo peso molecular implica em elevados valores de impulso específico [25]. Scramjets propulsionados por hidrogênio podem atingir velocidades superiores a Mach 15 [22]. Na Tabela 2 apresentam-se algumas propriedades do hidrogênio e de hidrocarbonetos.

TABELA 2. Comparação entre propriedades do hidrogênio e combustíveis à base de hidrocarbonetos [7].

	<i>Hidrogênio</i>	<i>Metano</i>	<i>Jet A</i>	<i>JP-4</i>
<i>peso molecular</i>	2,016	16,04	~ 168	~ 132
<i>poder calorífico (inferior), kJ/g</i>	120	50,0	42,8	42,8
<i>temperatura de autoignição, K</i>	858	813	>500	>500
<i>limite de flamabilidade no ar, vol. %</i>	4,0 a 75,0	5,3 a 15,0	0,6 a 4,7	0,8 a 5,8

De acordo com a Tabela 2, o poder calorífico do hidrogênio é de duas a três vezes superior ao dos outros combustíveis, e seu peso molecular é muito inferior. São essas características que conferem ao hidrogênio um elevado impulso específico.

Na Figura 4 apresenta-se a relação entre o impulso específico (I_{sp}) e o número de Mach (M) para veículos impulsionados por turbojatos, ramjets, scramjets e motores-foguete, em duas situações: utilizando hidrogênio ou hidrocarboneto como combustível.

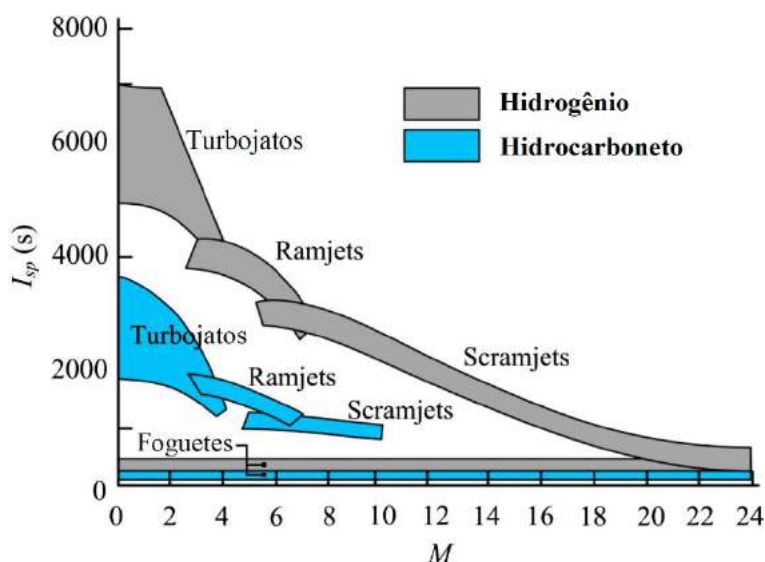


FIGURA 4. Comparação entre os impulsos específicos de diferentes sistemas propulsivos utilizando como combustível o hidrogênio (em cinza) e hidrocarboneto (em azul) [27].

De acordo com Cecere, Giacomazzi e Ingenito [26], o hidrogênio molecular possui valores elevados de condutividade térmica (k) e capacidade calorífica (C) e baixa viscosidade dinâmica (μ). A combinação dessas propriedades confere ao H_2 excelente capacidade de refrigeração, parâmetro importante no projeto da câmara de combustão – que pode atingir temperaturas superiores a $800\text{ }^\circ\text{C}$ e, portanto, limita as opções de material para sua composição.

Considerando-se fatores ambientais, a queima do H_2 produz apenas vapor d'água e uma pequena quantidade de NO_x [26]. Por sua vez, a combustão de hidrocarbonetos produz, além de vapor d'água e NO_x , CO , CO_2 , SO_x e UHC (hidrocarbonetos não-queimados) [7].

Entre as desvantagens do uso do H_2 como propelente, em comparação aos hidrocarbonetos, destaca-se a baixa densidade ($0,09\text{ kg/m}^3$), fato que demanda maiores volumes para armazenagem do propelente. O resfriamento até temperaturas criogênicas pode ser uma alternativa para aumentar a densidade e, desse modo, reduzir o volume [25]. Além disso, a tecnologia para liquefação do hidrogênio já é utilizada desde a década de 1950. Mesmo assim, a armazenagem do H_2 líquido ainda representará desvantagem em relação aos hidrocarbonetos (que podem ser armazenados na fase líquida a temperatura ambiente). A título de comparação, a mesma energia presente em um dado volume de querosene é obtida a partir de um volume quatro vezes maior de hidrogênio criogênico [26]. Outra desvantagem se deve aos custos de produção do hidrogênio – bem mais elevados quando comparados aos dos hidrocarbonetos [24], variando de U\$ 0,98 a U\$ 2,16 por quilograma de H_2 (dependendo do método de produção), enquanto para gás natural o custo chega a apenas U\$ 0,12/kg [28].

4. PRINCIPAIS ÁREAS DE PESQUISA

Todas as áreas de pesquisa relacionadas ao desenvolvimento de scramjets são essenciais. No presente trabalho, serão destacadas duas: sistemas de proteção térmica – responsável pelo estudo das altas cargas térmicas envolvidas em voos hipersônicos, e aspectos da combustão com escoamento supersônico – como mistura combustível – ar, ignição e estabilização da chama na câmara de combustão.

4.1. Sistemas de proteção térmica

Voos hipersônicos na atmosfera ocasionam aquecimento aerodinâmico extremo na superfície do veículo devido ao intenso atrito com o ar. Considerando-se o ponto de estagnação do escoamento em um veículo que

reentra na atmosfera, por exemplo, o aquecimento será proporcional ao cubo da velocidade. Além disso, a queima de combustível em um scramjet pode gerar temperaturas de até 3000 K na câmara de combustão, sendo esse um dos fatores que limitam acentuadamente os voos hipersônicos [20, 29].

Para proteger o veículo e sua carga útil das altas temperaturas, seja na reentrada ou mesmo durante a inserção em órbita, recorre-se a sistemas de proteção térmica (SPT), que podem ser classificados em passivos, semi-passivos e ativos. A escolha do SPT adequado a uma determinada aplicação requer considerações como sistema de propulsão do veículo, área e geometria da superfície e tempo de exposição [20, 29].

Em geral, os projetos nessa área apresentam elevado grau de complexibilidade – se o sistema de proteção for subdimensionado, a carga útil e o veículo sofrerão danos; se for superdimensionado, haverá acréscimo de peso e, conseqüentemente, maior massa estrutural, reduzindo a fração de carga útil disponível [30].

4.1.1. Métodos passivos

Os métodos passivos de resfriamento podem ser subdivididos em: *heat sink*, *hot structures* e *insulated structures*. O sistema *heat sink* é composto basicamente por um metal que possui alta capacidade de armazenamento de calor, elevados pontos de fusão e ebulição e alta condutividade térmica. São empregados para proteção térmica em situações de fluxo de calor moderado, absorvendo parte do calor e irradiando a outra parte. Não podem ser utilizados por longos períodos, pois a estrutura do veículo se superaquecerá devido à magnitude do calor absorvido [29, 31].

O sistema *hot structures* para proteção térmica consiste em usar materiais com alta emissividade. Diferentemente do *heat sink*, empregam-se materiais capazes de resistir a altas cargas térmicas por longos períodos, re-irradiando o calor quando chegam a uma determinada temperatura, podendo atingir estado estacionário [29, 31].

Insulated structures são sistemas que utilizam uma estrutura composta por camadas, onde a camada mais externa é responsável por irradiar grande parte do calor incidente, evitando a absorção de energia, enquanto as camadas mais internas reduzem o fluxo de calor por condução entre as camadas adjacentes anterior e posterior, sucessivamente, até chegar ao elemento mais interno, a ser protegida [29, 32]. Uma vez que a re-irradiação de calor ocorre em todas as direções, incluindo na direção do interior do veículo, as *insulated structures* podem ser aplicadas logo abaixo da superfície externa de *hot structures*, de modo a garantir o isolamento térmico dos módulos que devem ser protegidos [33].

4.1.2. Métodos semi-passivos

Entre os SPT semi-passivos, destacam-se tubos de calor e superfícies ablativas. Um tubo de calor é um dispositivo sem partes móveis que aproveita o efeito de tensão capilar para movimentar um fluido de trabalho que passa por mudança de fase durante a troca térmica. Ao absorver calor da região “quente” (a ser resfriada), o fluido muda de fase e se desloca à região “fria” do tubo, onde dissipa calor ao ambiente externo e muda de fase, condensando-se. Em seguida, por tensão capilar, retorna à região “quente”, reiniciando o processo [34].

Uma superfície ablativa é uma camada de proteção térmica que, a partir de processos físico-químicos (e.g., vaporização, reação química ou erosão), libera massa ao ambiente externo, dissipando junto energia térmica. Os processos físico-químicos envolvidos também criam uma barreira gasosa que reduz o fluxo de calor do ambiente externo à superfície ablativa. Em geral, são utilizadas para proteção de veículos que realizam reentrada atmosférica [35].

4.1.3. Métodos ativos

Os métodos ativos de proteção térmica são classificados em: resfriamento convectivo ou regenerativo, resfriamento por filme e resfriamento por transpiração. O método de resfriamento regenerativo consiste em injetar combustível líquido no interior das paredes da câmara de combustão ou das paredes externas do veículo antes da combustão [36]. Acredita-se que o método tenha sido desenvolvido por Wernher von Braun, na década de 1940, durante o projeto das bombas V-2.

O resfriamento por filme utiliza aberturas em pontos específicos da superfície do veículo para permitir a injeção de fluido refrigerante. Esse, além de formar um filme protetor contra o aquecimento excessivo, reduz os efeitos da camada limite sobre o veículo, reduzindo o arrasto [37].

No método de resfriamento por transpiração, o fluido refrigerante é injetado através de poros na parede do veículo, formando um filme contínuo. O filme absorve o calor que incide sobre o veículo, dissipando-o por meio de mudança de fase [38, 39].

Percebe-se que, em qualquer dos casos aqui abordados, o desenvolvimento de sistemas de proteção térmica depende fortemente de contribuições da área de ciências e engenharia de materiais.

4.2. Mistura combustível-ar e estabilização da chama na câmara de combustão

Em scramjets, como a combustão ocorre em velocidade supersônica, o tempo de residência do ar atmosférico e do combustível injetado no interior da câmara de combustão é muito curto – apenas alguns milissegundos. Portanto, questões referentes à mistura combustível – ar, tempo de ignição, estabilidade e sustentação da chama são de extrema importância para viabilidade do projeto [24].

Para garantir a sustentação da combustão supersônica é importante que haja geração de vórtices no escoamento, de modo a aumentar a turbulência e, desse modo, aumentar a mistura combustível-ar, resultando ainda em melhor estabilização da chama. Os vórtices podem ser gerados a partir da inserção de discontinuidades no caminho do escoamento, entre elas: tipos de injetores, struts, pylons, degraus, cavidades e rampas [6].

4.2.1. Injeção pela parede (wall injection)

Nesse método, o combustível é injetado na corrente de ar a partir de injetores localizados nas paredes da câmara de combustão. A interação entre o jato de combustível e a corrente de ar promove a formação de uma forte onda de choque, além de criar uma estrutura complexa de vórtices a montante do injetor [6]. O método pode ser combinado à inserção de cavidades ou rampas para otimizar a mistura combustível – ar [40]. Contudo, como a combustão normalmente ocorre próximo à parede, a eficiência da combustão pode ser afetada [41].

4.2.2. Injeção por struts e pylons

Doster et al. [42] definem *strut* como uma estrutura que cruza toda a largura ou altura da seção da câmara de combustão e que é fixada em duas paredes da câmara (Figura 5-a); enquanto *pylon* é uma estrutura que cruza parte da altura ou da largura da câmara de combustão e que é fixada em apenas uma superfície (Figura 5-b).

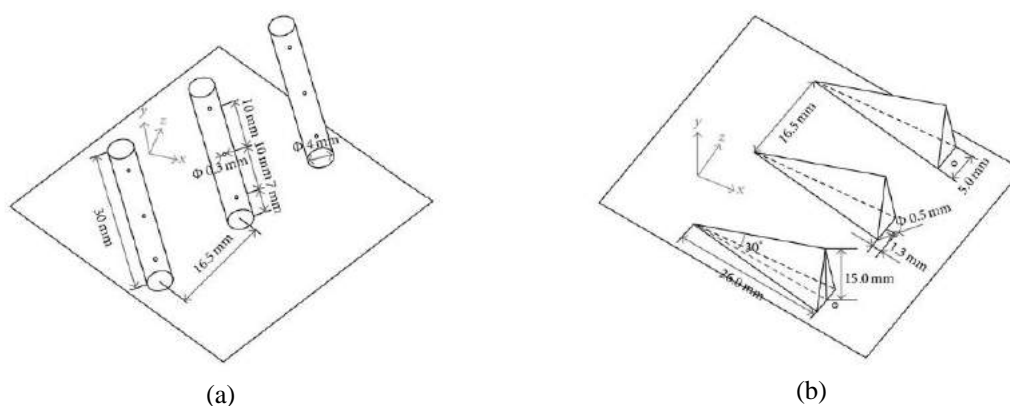


Figura 5: representação de (a) *struts* e (b) *pylons* [43].

Por meio de *struts*, o combustível é injetado de modo uniforme ao longo da câmara de combustão, permitindo uma mistura mais rápida entre o combustível e a corrente de ar, o que possibilita reduzir o comprimento da câmara de combustão e cria uma zona de estabilização da combustão próxima ao centro da câmara, reduzindo a carga térmica recebida pelas paredes [41]. Comparado à injeção pela parede, os *struts* apresentam alta perda de pressão total, maior arrasto e maior complexidade estrutural [40].

Pylons podem ser montados a frente dos injetores de combustível localizados na parede da câmara de combustão, permitindo aumentar a penetração do jato de combustível na corrente de ar. A penetração do jato é otimizada devido a geometria do *pylon*, que induz à expansão da corrente supersônica incidente, criando uma região de baixa pressão imediatamente após seu ponto de fixação [40, 44].

4.2.3. Degraus (steps)

A presença de um degrau no caminho do escoamento de ar no interior da câmara de combustão cria uma rápida expansão, induzindo a formação de vórtices à jusante do degrau responsável pela recirculação do

escoamento. Esta recirculação é capaz de otimizar o processo de mistura combustível – ar [6]. Para estabilização da chama, pode-se colocar os injetores de combustível após o degrau. Os gases “quentes” provenientes do escoamento principal de ar serão mantidos no interior da região de recirculação, gerando uma zona de ignição contínua [45], como pode ser visto na Figura 6.

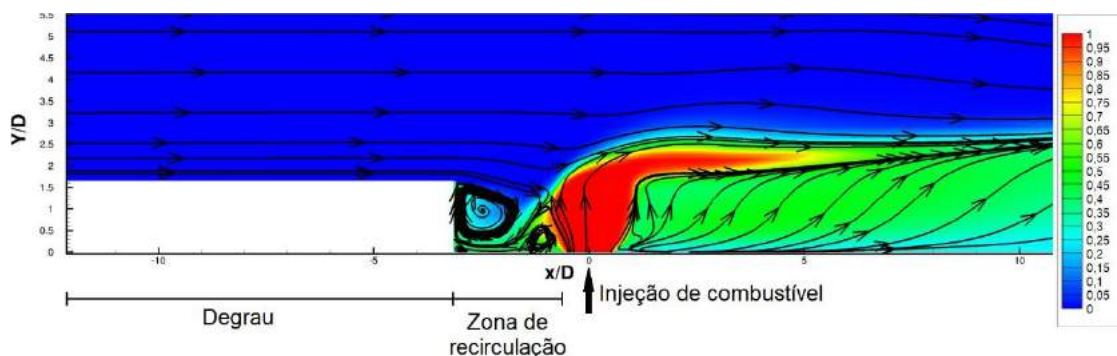


Figura 6: Efeito do degrau sobre o escoamento, mostrando curvas de contorno para concentração de hidrogênio. Adaptado de [45].

4.2.4. Cavidades

As cavidades induzem recirculação da corrente de ar e dos gases da combustão no interior da câmara (Figura 7). A recirculação reduz a velocidade do escoamento, aumentando o tempo de residência do combustível e, conseqüentemente, promovendo a mistura e queima dos reagentes em uma curta distância [46, 47]. Cavidades também têm a capacidade de estabilizar a chama [47], pois a recirculação dos gases gera uma região de alta temperatura capaz de ignitar o combustível. Os radicais produzidos no interior da cavidade durante esse processo podem acelerar a ignição do escoamento principal fora da cavidade [48].

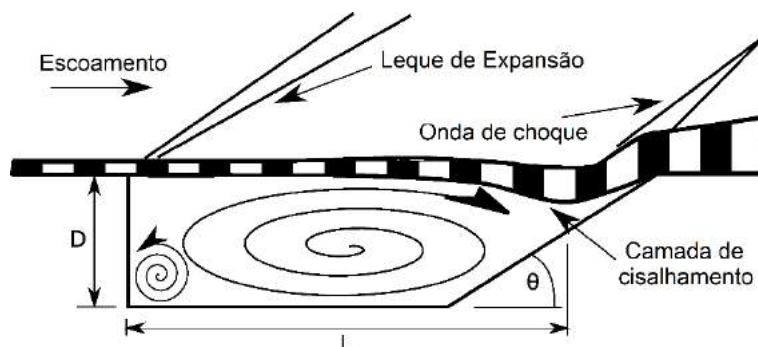


Figura 7: Representação de cavidade genérica e interação com o escoamento. Adaptado de [49].

A eficiência das cavidades quanto à capacidade de mistura e estabilização da chama depende, principalmente, da sua geometria e da posição dos injetores de combustível [46], podendo esses ser colocados antes, após ou no interior da cavidade [48]. Múltiplas cavidades também podem ser utilizadas, podendo ser dispostas em paralelo ou em tandem [50], como pode ser visto na Figura 8.

4.2.5. Rampas

Rampas podem ser introduzidas na câmara de combustão para otimizar a taxa de mistura combustível – ar. O escoamento supersônico de ar que entra na câmara de combustão induz a formação da onda de choque ao encontrar a rampa, gerando um gradiente de pressão no centro da rampa que desloca o escoamento até as partes laterais, criando um par de vórtices com eixos alinhados paralelamente ao escoamento e com sentidos de rotação contrários [51], como pode ser visto na Figura 9.

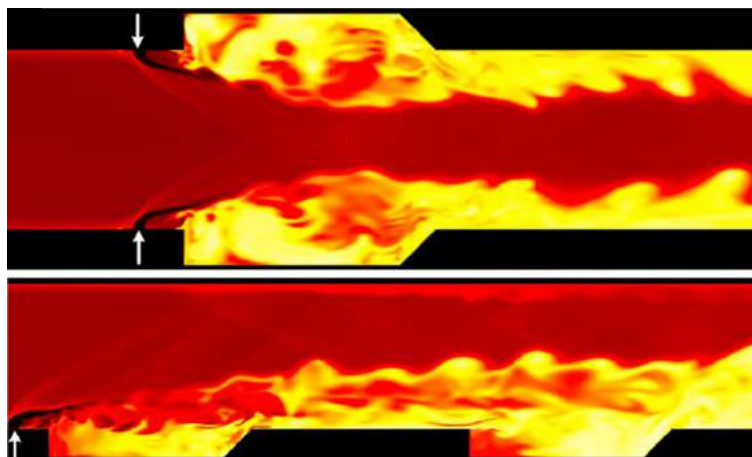


Figura 8: Cavidades postas em paralelo (imagem superior) e em tandem (imagem inferior). Contornos de temperatura obtidos por computação numérica. Adaptado de [50].

A estrutura de vórtices assim formada é capaz de aumentar a área de contato entre o combustível e o ar, promovendo uma mistura mais efetiva. Além disso, quando a injeção de combustível é realizada logo após a rampa, a capacidade de penetração do jato na corrente supersônica de ar é incrementada [52].

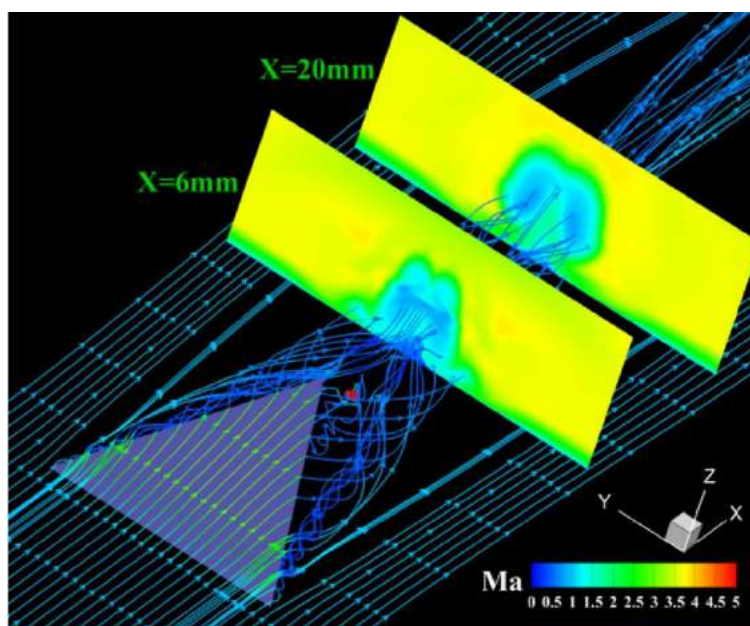


Figura 9: Representação da interação das linhas de corrente com a rampa, e formação de vórtices [52].

Li et al. [52] apontam que a influência das rampas no desempenho da combustão depende dos seguintes parâmetros: dimensões (largura, comprimento e altura), distância entre o injetor e a rampa e razão de pressão entre o jato de combustível e o escoamento principal. Desse modo, a combinação desses parâmetros e suas consequências no desempenho da combustão constitui um campo aberto para estudos teóricos e experimentais.

As considerações aqui apresentadas constituem apenas uma amostra (muito pequena) dos problemas que ocupam os pesquisadores da área de hipersônica. É um campo vasto, aberto a ideias provenientes das mais diversas áreas da engenharia.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho, de forma sucinta, foram apresentados: o conceito de sistema scramjet, seu princípio de funcionamento, possibilidades de aplicação e algumas técnicas para melhorar o processo de combustão. Destacou-se o aproveitamento do oxigênio atmosférico como vantagem na integração de veículos a scramjets visando o transporte civil e o acesso ao espaço. A possibilidade de uso de hidrogênio como combustível foi discutida e comparada aos hidrocarbonetos, tendo sido evidenciado sua vantagem quanto aos valores de impulso

específico, poder calorífico, alta velocidade de reação e menor geração de poluentes, todos superiores aos valores correspondentes aos hidrocarbonetos. Algumas áreas que constituem fronteira de pesquisa foram superficialmente abordadas, especificamente no que diz respeito aos problemas de aquecimento da estrutura externa (devido a interação com a corrente de ar) e interna (devido a combustão), e aos problemas de mistura combustível-ar e estabilização da chama na câmara de combustão, onde foram discutidas estratégias para intensificação do processo de mistura por incremento de turbulência.

Com promessas de viagens intercontinentais em uma fração do tempo atual e de aumento da capacidade de colocação de cargas em órbita da Terra, a tecnologia scramjet tem chances de avançar e, nas próximas décadas, atingir um nível de maturidade adequado para passar a integrar os veículos aeroespaciais do século XXI. Por enquanto, a associação entre Academia e Institutos (e.g., UFRN e IAEv) para desenvolvimento de pesquisas em torno da tecnologia scramjet tem se mostrado profícua no Brasil, formando mão de obra especializada (e.g., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial / UFRN) e desenvolvendo soluções inovadoras. Se o país conquistará condições para se inserir no mercado de veículos aeroespaciais como fabricante ou tornar-se-á mero comprador é uma incógnita que só o tempo elucidará. Isso dependerá não apenas de ações governamentais, mas, principalmente, da participação ativa da indústria nacional.

6. AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES / Brasil – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] ASEB – Aeronautics and Space Engineering Board. *Aeronautical Facilities: Assessing the National Plan for Aeronautical Ground Test Facilities* (1994). Washington, D.C., National Academy of Sciences, Appendix D: Aeronautical Speed Regimes and Test Parameters. 1994, p. 65.
- [2] Stillwell, W. H. X – 15 Research Results. Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Division. 1965, 128 p.
- [3] Urzay, J. Supersonic Combustion in Air-Breathing Propulsion Systems for Hypersonic Flight. *Annual Review of Fluid Mechanics*, [S.L.], v. 50, n. 1, p. 593-627, 5 jan. 2018. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045217>.
- [4] Musa, O.; Xiong, C.; Changsheng, Z. Combustion characteristics and turbulence modeling of swirling reacting flow in solid fuel ramjet. *Acta Astronautica*, [S.L.], v. 139, p. 1-17, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.06.023>.
- [5] RAM Effect. In: *Merriam-Webster.com Dictionary*. Merriam Webster, 2020. Disponível em: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/ram%20effect>. Acesso em: 4 nov. 2020.
- [6] Seleznev, R.K.; Surzhikov, S.T.; Shang, J.S. A review of the scramjet experimental data base. *Progress in Aerospace Sciences*, [S.L.], v. 106, p. 43-70, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.02.001>.
- [7] Choubey, G.; D, Y.; Huang, W.; Yan, L.; Babazadeh, H.; Pandey, K. M. Hydrogen fuel in scramjet engines - A brief review. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 45, n. 33, p. 16799-16815, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.086>.
- [8] Ren, Z.; Wang, B.; Xiang, G.; Zhao, D.; Zheng, L. Supersonic spray combustion subject to scramjets: progress and challenges. *Progress in Aerospace Sciences*, [S.L.], v. 105, p. 40-59, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.12.002>.
- [9] McClinton, C. R.; Rausch, V. L.; Nguyen, L. T.; Sitz, J. R. Preliminary X-43 flight test results. *Acta Astronautica*, [S.L.], v. 57, n. 2-8, p. 266-276, jul. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2005.03.060>.
- [10] Paull, A.; Alesi, H.; Anderson, S. The development of the HyShot flight program. *Shock Waves*, [S.L.], p. 31-48, 2005. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-27009-6_4.
- [11] Hank, J.; Murphy, J.; Mutzman, R. The X-51A Scramjet Engine Flight Demonstration Program. *15Th Aiaa International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, [S.L.], p. 1-13, 28 abr. 2008. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2008-2540>.

- [12] Schmisser, J. D. Hypersonics into the 21st century: a perspective on afosr-sponsored research in aerothermodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, [S.L.], v. 72, p. 3-16, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.09.009>.
- [13] Bykerk, T.; Verstraete, D.; Steelant, J. Low speed longitudinal dynamic stability analysis of a hypersonic waverider using unsteady Reynolds averaged Navier Stokes forced oscillation simulations. *Aerospace Science and Technology*, [S.L.], v. 103, p. 1-15, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2020.105883>.
- [14] Siddiqui, A. M.; Ahmed, G. M. S. Design and Analysis on Scramjet Engine Inlet. *International Journal of Scientific and Research Publications*, [S. L.], v. 3, n. 1, p. 192-203, jan. 2013.
- [15] Sen, D.; Pesyridis, A.; Lenton, A. A Scramjet Compression System for Hypersonic Air Transportation Vehicle Combined Cycle Engines. *Energies*, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 1568-1599, 14 jun. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en11061568>.
- [16] Toro, P. G. P.; Carneiro, R.; Araújo, J. W. S.; Marinho, G. S.; Borba, G. L.; Martos, J. F. A; Rêgo, I. S. Design of The Generic Scramjet Combustion Chamber. *ENCIT 2018*. 2018.
- [17] Segal, C. *The Scramjet Engine: processes and characteristics*. [s. L.]: Cambridge University Press, 2011. 270 p.
- [18] Im, S.; Do, H. Unstart phenomena induced by flow choking in scramjet inlet-isolators. *Progress in Aerospace Sciences*, [S.L.], v. 97, p. 1-21, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.12.001>.
- [19] Sziroczak, D.; Smith, H. A review of design issues specific to hypersonic flight vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, [S.L.], v. 84, p. 1-28, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.04.001>.
- [20] Zhu, Y.; Peng, W.; Xu, R.; Jiang, P. Review on active thermal protection and its heat transfer for airbreathing hypersonic vehicles. *Chinese Journal of Aeronautics*, [S.L.], v. 31, n. 10, p. 1929-1953, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2018.06.011>.
- [21] Heiser, H. W.; Pratt, D. T (with Daley, D. H. and Mehta, U. B.). *Hypersonic Airbreathing Propulsion*. Education Series. EUA. AIAA. 1994.
- [22] Fry, R. S. A Century of Ramjet Propulsion Technology Evolution. *Journal of Propulsion and Power*, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 27-58, jan. 2004. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). <http://dx.doi.org/10.2514/1.9178>.
- [23] Yang, Q.; Zong, Y.; Bao, W. Constant static-temperature heating for hydrogen fueled scramjet engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 2002-2010, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.014>.
- [24] Cecere, D.; Ingenito, A.; Giacomazzi, E.; Romagnosi, L.; Bruno, C. Hydrogen/air supersonic combustion for future hypersonic vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 36, n. 18, p. 11969-11984, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.051>.
- [25] Kummitha, O. R.; Pandey, K.M.; Gupta, R. Numerical analysis of hydrogen fueled scramjet combustor with innovative designs of strut injector. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 45, n. 25, p. 13659-13671, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.067>.
- [26] Cecere, D.; Giacomazzi, E.; Ingenito, A. A review on hydrogen industrial aerospace applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 39, n. 20, p. 10731-10747, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.126>.
- [27] Zhang, D.; Yang, S.; Zhang, S.; Qin, J.; Bao, W. Thermodynamic analysis on optimum performance of scramjet engine at high Mach numbers. *Energy*, [S.L.], v. 90, p. 1046-1054, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.017>.
- [28] Salkuyeh, Y. K.; Saville, B. A.; Maclean, H. L. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 42, n. 30, p. 18894-18909, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.219>.
- [29] Uyanna, O.; Najafi, H. Thermal protection systems for space vehicles: a review on technology development, current challenges and future prospects. *Acta Astronautica*, [S.L.], v. 176, p. 341-356, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.047>.
- [30] Damilano, J. G.; Machado, H. A.; Aguiar, D. S.; Almeida, F. E. De; Duarte, J. A. A.; Azevedo, J. L. F. de. Configuration Study of Structurally Integrated Thermal Protection Systems for a Sub-Orbital Platform.

- Journal of Aerospace Technology and Management*, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 209-218, 30 maio 2015. Institute of Aeronautics and Space. <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v7i2.425>.
- [31] Glass, D. Ceramic Matrix Composite (CMC) Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles. *15Th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, [S.L.], p. 1-36, 28 abr. 2008. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2008-2682>.
- [32] Le, V. T.; Ha, N. S.; Goo, N. S.; Kim, J. Y. Insulation System Using High-Temperature Fibrous Insulation Materials. *Heat Transfer Engineering*, [S.L.], v. 40, n. 17-18, p. 1523-1538, 18 jun. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01457632.2018.1474602>.
- [33] Langston, S. L.; Lang, C. G.; Samareh, J. A. Parametric Study of an Ablative TPS and Hot Structure Heatshield for a Mars Entry Capsule Vehicle. Hampton, p. 1-21, set. 2017.
- [34] Yang, X.; Yan, Y. Y.; Mullen, D. Recent developments of lightweight, high performance heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, [S.L.], v. 33-34, p. 1-14, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.006>.
- [35] Riccio, A.; Raimondo, F.; Sellitto, A.; Carandente, V.; Scigliano, R.; Tescione, D. Optimum design of ablative thermal protection systems for atmospheric entry vehicles. *Applied Thermal Engineering*, [S.L.], v. 119, p. 541-552, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.053>.
- [36] Zhang, S.; Feng, Y.; Zhang, D.; Jiang, Y.; Qin, J.; Bao, W. Parametric numerical analysis of regenerative cooling in hydrogen fueled scramjet engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 41, n. 25, p. 10942-10960, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.176>.
- [37] Zhang, S.; Li, X.; Zuo, J.; Qin, J.; Cheng, K.; Feng, Y.; Bao, W. Research progress on active thermal protection for hypersonic vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, [S.L.], v. 119, p. 1-34, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100646>.
- [38] Shen, L.; Wang, J.; Dong, W.; Pu, J.; Peng, J.; Qu, D.; Chen, L. An experimental investigation on transpiration cooling with phase change under supersonic condition. *Applied Thermal Engineering*, [S.L.], v. 105, p. 549-556, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.039>.
- [39] He, F.; Wu, N.; Ran, F.; Wang, J. Numerical investigation on the transpiration cooling of three-dimensional hypersonic inlet. *Aerospace Science and Technology*, [S.L.], v. 106, p. 1-12, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2020.106152>.
- [40] Oamjee, A.; Sadanandan, R. Fuel injection location studies on pylon-cavity aided jet in supersonic crossflow. *Aerospace Science and Technology*, [S.L.], v. 92, p. 869-880, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2019.07.021>.
- [41] Hu, J.; Chang, J.; Bao, W.; Yang, Q.; Wen, J. Experimental study of a flush wall scramjet combustor equipped with strut/wall fuel injection. *Acta Astronautica*, [S.L.], v. 104, n. 1, p. 84-90, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.07.012>.
- [42] Doster, J.; King, P.; Gruber, M.; Maple, R. Pylon Fuel Injector Design for a Scramjet Combustor. *43Rd Aiaa/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, [S.L.], p. 1-16, 8 jul. 2007. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2007-5404>.
- [43] Ouyang, H.; Liu, W.; Sun, M. Investigations on the Influence of the In-Stream Pylon and Strut on the Performance of a Scramjet Combustor. *The Scientific World Journal*, [S.L.], v. 2014, p. 1-10, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/309387>.
- [44] Liu, Y.; Sun, M.; Liang, C.; Yu, J.; Li, G. Flowfield structures of pylon-aided fuel injection into a supersonic crossflow. *Acta Astronautica*, [S.L.], v. 162, p. 306-313, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.06.022>.
- [45] Sharma, V.; Eswaran, V.; Chakraborty, D. Effect of location of a transverse sonic jet on shock augmented mixing in a SCRAMJET engine. *Aerospace Science and Technology*, [S.L.], v. 96, p. 1-15, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2019.105535>.
- [46] Ruan, J. L.; Domingo, P.; Ribert, G. Analysis of combustion modes in a cavity based scramjet. *Combustion and Flame*, [S.L.], v. 215, p. 238-251, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.034>.
- [47] Suneetha, L.; Randive, P.; Pandey, K.M. Implication of diamond shaped dual strut on combustion characteristics in a cavity-based scramjet combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 45, n. 35, p. 17562-17574, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.217>.

- [48] Roos, T.; Pudsey, A.; Bricalli, M.; Ogawa, H. Numerical investigation of upstream cavity enhanced fuel mixing in scramjet combustors. *Acta Astronautica*, [S.L.], v. 169, p. 50-65, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.033>.
- [49] Trudgian, M. A.; Landsberg, W. O.; Veeraragavan, A. Experimental investigation of inclining the upstream wall of a scramjet cavity. *Aerospace Science and Technology*, [S.L.], v. 99, p. 1-10, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2020.105767>.
- [50] Yang, Y.; Wang, Z.; Sun, M.; Wang, H. Numerical simulation on ignition transients of hydrogen flame in a supersonic combustor with dual-cavity. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 690-703, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.115>.
- [51] Fulton, J. A.; Edwards, J. R.; Cutler, A.; McDaniel, J.; Goynes, C. Turbulence/chemistry interactions in a ramp-stabilized supersonic hydrogen-air diffusion flame. *Combustion and Flame*, [S.L.], v. 174, p. 152-165, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.09.017>.
- [52] Li, L.; Huang, W.; Yan, L.; Du, Z.; Fang, M. Numerical investigation and optimization on the micro-ramp vortex generator within scramjet combustors with the transverse hydrogen jet. *Aerospace Science and Technology*, [S.L.], v. 84, p. 570-584, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2018.11.011>.



Artigo

Dimensionamento e Estudo sobre uma Bobina de Tesla

Iggor Bezerra da Silva ^[1], Cleudson A. de C. Nascimento ^[2], Nikolas I. F. de Oliveira ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; iggor.silva@ufersa.edu.br

^[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; cleudson.adller@ifce.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nikolas.oliveira@ufersa.edu.br

Recebido: 21/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: Esse artigo apresenta um projeto e análise dos parâmetros de construção de uma Bobina de Tesla (BT). A BT oferece uma apresentação de vários fenômenos físicos da eletrostática e eletrodinâmica, como o efeito corona e indutância induzida, isso faz dela um instrumento didático aplicável para acompanhamento de estudos práticos em instituições de ensino. O objetivo deste trabalho é descrever e relacionar as etapas de construção de um projeto de uma BT e fazer uma verificação da confiabilidade do método de cálculo convencional para determinação dos parâmetros da BT. É feita a comparação dos resultados obtido de maneira convencional com o gerado por um *software* computacional, WinTesla. Vale ressaltar que os fatores que são responsáveis pela diferença, entre os resultados dos dois métodos, são as limitações de arredondamentos dos parâmetros que o programa apresenta.

Palavras-chave: Bobina de Tesla; Instrumento didático; WinTesla.

Abstract: This paper presents a project and analysis of the construction parameters of a Tesla Coil (BT). The BT offers a presentation of several physical phenomena of electrostatics and electrodynamics, such as the corona effect and induced inductance, this makes it an applicable teaching tool for monitoring practical studies in educational institutions. The objective of this work is to describe and relate the construction stages of a BT project and to check the reliability of the conventional calculation method for determining BT parameters. The results obtained in a conventional way are compared with those generated by a computer software, WinTesla. It is worth mentioning that the factors that are responsible for the difference in results between the two methods are the limitations and rounding of the parameters that the program presents.

Key-words: Tesla Coil; Teaching tool; WinTesla.

1. INTRODUÇÃO

Nikola Tesla nasceu no dia 10 de julho de 1856 em uma aldeia sérvia, na antiga Áustria, hoje onde se localiza a Croácia e morreu no dia 07 de janeiro de 1943 nos E.U.A. Ele realizou muitas experiências com correntes alternadas com frequências acima dos 100kHz, onde ele procurava gerar e transmitir corrente elétrica a grandes distâncias eliminando as perdas pelo aquecimento do condutor, efeito Joule. Nesse intuito ele foi um dos pioneiros na criação dos alternadores [2].

Das inúmeras patentes de Nikola Tesla, a mais famosa foi o “aparato para transmitir energia elétrica”, um transformador elevador de alta frequência com núcleo de ar, apresentada no ano de 1914 na *Patent & Trademark Office* na União Soviética, na qual atualmente este aparato ficou conhecido como Bobina de Tesla [3].

As pesquisas de Tesla causaram um grande avanço na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, exemplo disso, patentes de transformadores, geradores e alternadores enfatizando a eletricidade como uma fonte de energia indispensável e ferramenta para o avanço da humanidade [2].

A BT é constituída de circuitos internos muito similares aos dispositivos wireless modernos. Ela se comporta como um rádio, transmitindo e recebendo sinais eletromagnéticos, tornando Tesla assim um dos pioneiros na área de telecomunicações e conexões sem fio (*wireless*), muito usada atualmente [3].

Os efeitos produzidos pelos altos níveis de tensão elétrica e altas frequências geradas pela Bobina de Tesla tem uma excelente aplicação didática em aulas de laboratório de Física ou de Engenharia Elétrica. Por meio da bobina desenvolvida seu funcionamento e dimensionamento também podem ser explicados em demonstrações educacionais de ensino, como em feira de ciências. Por meio dela são abrangidos fenômenos físicos como eletrodinâmica, eletrostática e eletromagnetismo [5].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da bobina de Tesla do presente trabalho se inicia com o cálculo manual dos parâmetros, para a obtenção de dados, e posteriormente aplicar esses dados no *software*, com objetivo de comparação das variáveis de saída utilizando as mesmas variáveis de entrada. O WinTesla foi escolhido para comparação de parâmetros finais com o cálculo manual. O *software* em questão apresenta, entretanto, algumas limitações, pois não aceita uma entrada de dados muito precisa, devido a limitação nas casas decimais após a vírgula.

2.1. Projeto de uma bobina de Tesla

Uma Bobina de Tesla pode começar a ser construída de duas formas: ou se projetar primeiro o sistema secundário primeiro e depois o primário, ou se projetar primeiro o primário e depois o secundário. A primeira escolha é feita quando se requer uma tensão de saída determinada ou determinado comprimento de arcos elétricos. A segunda escolha é feita quando não se tem disponível os componentes requeridos para o projeto. No presente trabalho foi adotada a primeira escolha, pois ao determinar a tensão de saída pode ocasionar em dificuldade na obtenção de materiais para a construção, sendo necessário, portanto, com se adequar o material disponível com a tensão de saída. Esse cálculo terá como base o trabalho de SILVA [3] como base nos parâmetros adotados por ele.

2.1.1. Obtenção da capacitância do capacitor do circuito primário

Para este projeto será utilizado um fuscador estático, na qual deverá ser calculada a capacitância do capacitor primário em função da frequência do transformador. Foi utilizado um transformador com tensão de entrada igual a 220V, frequência de 60Hz, tensão de saída 15kV, potência de 450W e corrente 30mA. Sendo assim, primeiramente, é calculada a impedância do transformador conforme Equação 1 [1].

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{15.000V}{0,03A} = 500k\Omega \quad (1)$$

Com a impedância obtida pode-se calcular a capacitância conforme Equação 2.

$$C = \frac{1}{2\pi fZ} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 500.000} = 5,305nF \quad (2)$$

2.1.2. Determinação do comprimento do fio e do número de espiras na bobina

Os parâmetros adotados para a bobina secundária são diâmetro externo de 11 cm e altura da bobina de 58,8 cm. Esses parâmetros são baseados em uma razão entre comprimento e diâmetro exterior com proporção de 4,8:1, que corresponde a proporção empírica ideal para o dimensionamento da Bobina de Tesla. Foi adotado um fio de bitola 24 AWG (0,20mm²). O fio 24 AWG tem bitola do fio igual a 0,57054 mm, portanto tem 17,52725 voltas para cada centímetro. Sendo assim, o comprimento é dado pela Equação 3 e o número de espiras é dado pela Equação 4.

$$C = \pi DAH = \pi \cdot 0,11 \cdot 1752,725 \cdot 0,528 = 319,3553 \text{ m} \quad (3)$$

$$N = AH = 1752,725 \cdot 0,528 = 924 \text{ espiras} \quad (4)$$

Na Equação 3 e Equação 4 se têm que:

- C = Comprimento do fio da bobina secundária (m);
- D = Diâmetro externo da bobina secundária (m);
- A = Número de voltas por metro (espira/m);
- H = Altura da bobina secundária (m);
- N = Número de espiras.

2.1.3. Cálculo da indutância da bobina secundária e a auto capacitância do indutor

A Equação 5 mostra o cálculo da indutância.

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} = \frac{(924 \cdot 2,165354)^2}{9 \cdot 2,165354 + 10 \cdot 20,7874} = 17606,92521\mu H \quad (5)$$

Onde se tem que:

- L_S = Indutância da bobina secundária (μH);
- N = Número de espiras;
- R = Raio da bobina secundária dada em polegadas (pol);
- H = Altura da bobina secundária dada em polegadas (pol).

Diante disso, a Equação 6 determina a auto capacitância da bobina secundária.

$$C_{ac} = 0,29H + 0,41R + 1,94 \sqrt{\frac{R^2}{H}} = 8,27194pF \quad (6)$$

2.1.4. Cálculo da frequência de ressonância do circuito

O cálculo da frequência de ressonância para um quarto do comprimento de onda pode ser dado pela Equação 7.

$$f_0 = \frac{186000 \cdot 5280}{4C} = \frac{18600 \cdot 5280}{4 \cdot 319,3553 \cdot 3,278} = 234391Hz \quad (7)$$

Onde:

- C = Comprimento do fio (pé);
- f_0 = frequência (Hz).

Com o valor obtido da frequência de ressonância para um quarto de comprimento de onda pode se obter a capacitância requerida na carga de topo, conforme mostra as Equação 8 e Equação 9.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}} = 234391 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,01760692521 \cdot C_S}} \quad (8)$$

$$C_S = 26,18634484 \cdot 10^{-12}F = 26,18634484pF \quad (9)$$

Diante disso, para se obter a capacitância final da carga de topo é necessário subtrair a auto capacitância da Equação 6 da capacitância do secundário da Equação 8, conforme pode ser visto pela Equação 10.

$$C_{SF} = C_S - C_{ac} = 26,18634484pF - 8,27194pF = 17,91440484pF \quad (10)$$

Onde:

- C_{SF} = Capacitância final da carga de topo (F);
- C_S = Capacitância do secundário (F);
- C_{ac} = Auto-capacitância da bobina secundária

Por meio da capacitância final da carga de topo se tem as dimensões de um capacitor toroidal para 17,92pF de capacitância. Sendo seu diâmetro externo $d_1 = 406\text{mm}$ e o diâmetro interno $d_2 = 127\text{mm}$. Diante disso, a capacitância toroidal em função dos diâmetros externos e internos é dada pela Equação 11.

$$C_{(d_1,d_2)} = \frac{2,8 \left(1,2781 - \frac{d_2}{d_1}\right) \sqrt{\frac{\pi}{4} (d_1 - d_2) d_2}}{25,4} \quad (11)$$

Por meio da Figura 1, é possível observar as dimensões do toróide conforme os diâmetros obtidos.

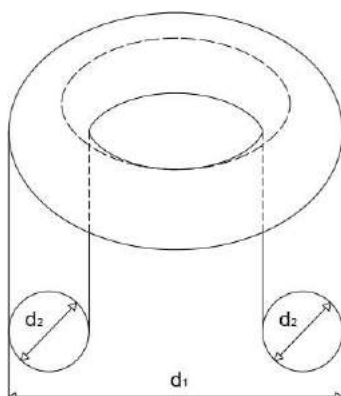


FIGURA 1. Dimensões do toróide. (Autoria Própria).

2.1.5. Cálculo da indutância da bobina primária

O cálculo da indutância da bobina primária é dado pela Equação 12.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = 234391 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_p \cdot 0,005305 \cdot 10^{-6}}} \quad (12)$$

$$L_p = 86,91065265\mu H$$

Diante disso se tem as seguintes especificações da bobina primária: diâmetro de tubo de cobre com 6,33mm; número de espiras igual a 16; distância entre espiras de 8mm; distância entre o primário e o secundário de 25mm; diâmetro interno da bobina primária de 16mm; diâmetro total de 60mm; indutância máxima na 15ª espira de 79,5 μH e tomada entre a 14ª e 15ª espira para obter indutância de 72,42 μH .

2.1.6. Cálculo da tensão elétrica de saída da BT

De acordo com os parâmetros calculados, pode-se então obter o valor de tensão elétrica gerada pela BT. A tensão de saída do secundário é calculada através da Equação (13), onde está em função da tensão do indutor primário, indutância do primário e indutância secundária, na qual já foram calculados.

$$V_S = V_P \sqrt{\frac{L_S}{L_P}} = 15000 V \sqrt{\frac{17606,92521 \mu H}{86,91065 \mu H}} = 213499,3284 V \quad (13)$$

Portanto a tensão de saída da BT projetada é de aproximadamente 213,5kV.

3. RESULTADOS

Os parâmetros de saída calculados de modo convencional foram comparados com os calculados pelo software WinTesla, utilizando a inserção dos mesmos parâmetros de entrada para ambos os métodos.

3.1. Parâmetros da bobina secundária

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos no WinTesla dos parâmetros de saída, para bobina secundária.

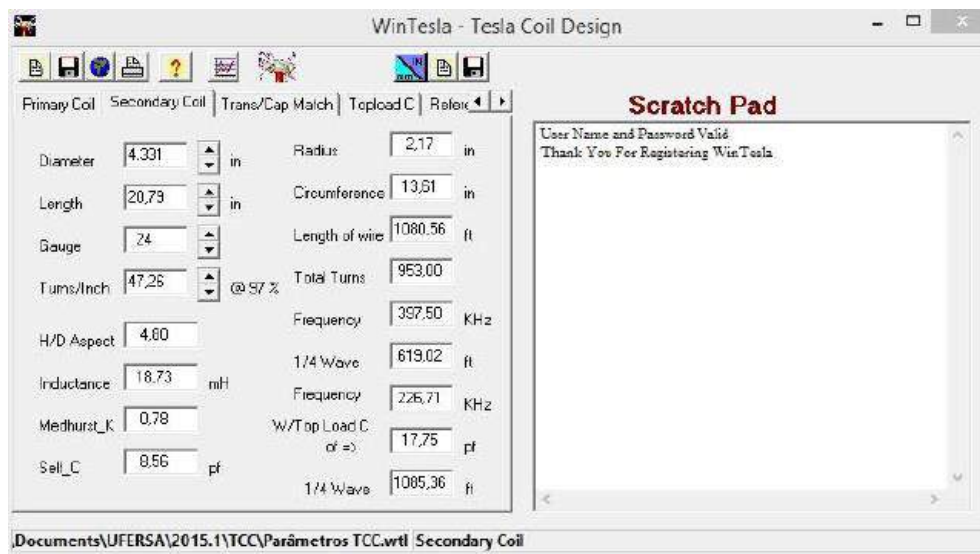


FIGURA 2. Parâmetros da bobina secundária. (Autoria Própria).

Diante disso se tem os parâmetros de saída do software: voltas por polegada igual a 47,26 espiras por polegada; indutância da bobina secundária igual a 18,73mH; comprimento do fio do indutor secundário igual a 329,44m e números de espiras igual a 953. Comparando com os valores calculados, se observa valores bem próximos: voltas por polegada igual a 44,51 espiras/polegada; indutância da bobina secundária igual a 17,60mH; comprimento do fio do indutor secundário igual a 319,35m.

3.2. Carga de topo toróide

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos no WinTesla dos parâmetros de saída, para a carga da bobina secundária.

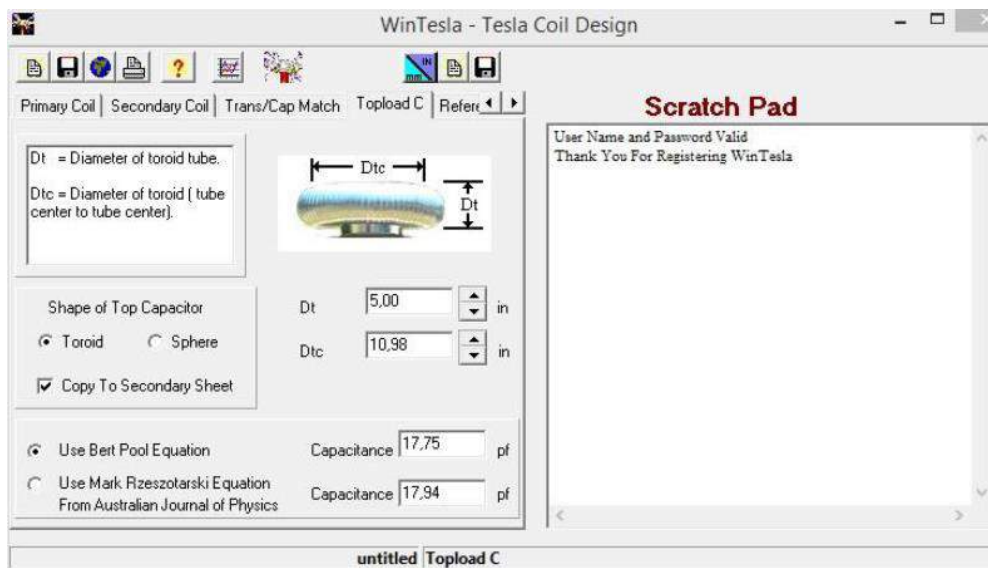


FIGURA 3. Parâmetros da carga da bobina secundária. (Autoria Própria).

Para os parâmetros de entrada: diâmetro externo do toróide igual a 406mm e diâmetro interno do toróide igual a 127 mm, foi obtido o parâmetro de saída do software de capacitância secundária igual a 17,75pF.

Comparando com o parâmetro de saída da carga de topo da bobina secundária obtido de forma convencional se tem que a capacitância secundária é igual a 17,91pF. Os resultados em ambos os métodos se mostram bem próximos.

3.3. Bobina primária

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos no WinTesla dos parâmetros de saída, para a bobina primária.

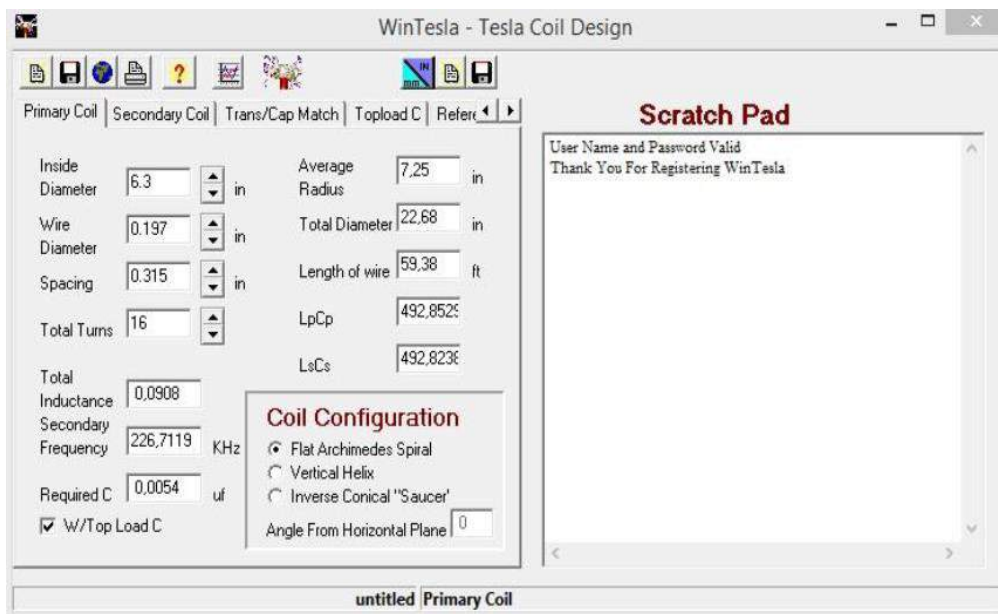


FIGURA 4. Parâmetros da bobina primária. (Autoria Própria).

Para os parâmetros de entrada: diâmetro interno da bobina primária igual a 160mm; diâmetro do fio igual a 5 mm; espaço entre as espiras igual a 8mm e número de espiras igual 16 espiras, Foram obtidos os parâmetros de saída do software: capacitância primária igual 0,0054 μ F; frequência de ressonância igual a 226,719kHz; indutância primária igual a 0,0908mH e diâmetro externo da bobina primária igual 57,6072cm. Sendo assim, comparando com os parâmetros de saída da bobina primária obtidos de forma convencional se tem que a capacitância primária é igual a 0,005305 μ F; a frequência de ressonância é igual a 234,391kHz; a indutância primária é igual 0,08691mH e o diâmetro externo da bobina primária é igual a 60cm. Os resultados se mantiveram próximos, não são exatamente iguais, pois o *software* não aceita uma entrada de dados muito precisa, com limitações nas casas decimais após a vírgula.

3.4. Bobina primária

A Figura 5 ilustra os parâmetros de entrada do transformador primário que devem ser inseridos para a finalização do cálculo da BT utilizando o WinTesla

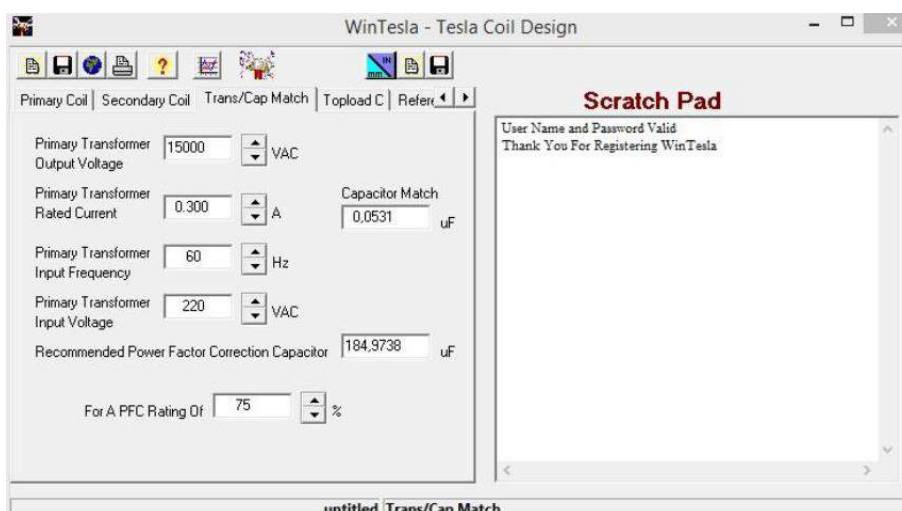


FIGURA 5. Parâmetros do transformador primário. (Autoria Própria).

3.5. Análise dos resultados

Os resultados obtidos foram satisfatórios, levando em conta que o *software* WinTesla não tem uma boa aproximação de valores por só admitir até duas casas decimais após a vírgula. Os dados finais apresentaram semelhança, onde já era esperado não ser exatamente igual, pode-se ver que nenhum dado deu diferença considerável. Através da Tabela (1), pode-se observar que os resultados e a comparação de ambos os métodos.

TABELA 1. Comparação dos resultados. (Autoria Própria).

Parâmetros	Método Convencional	Método Computacional	Erro Percentual
Volts da bobina secundária (esp/pol)	44,5192	47,2600	5,80
Indutância da bobina secundária (mH)	17,6069	18,7300	6,00
Comprimento do fio do indutor secundário (m)	319,3553	329,4411	3,06
Número de espiras da bobina secundária	924,0000	953,0000	3,04
Capacitância secundária (pF)	17,9144	17,7500	0,92
Capacitância primária (uF)	0,0053	0,0054	1,76
Frequência de ressonância (kHz)	234,3910	226,7190	3,27
Indutância primária (mH)	0,0869	0,0908	4,28
Diâmetro interno da bobina primária (cm)	60,0000	57,6072	3,99

Os valores do número de espiras secundário, comprimento do fio do indutor secundário, diâmetro externo da bobina primária e de volts por polegada da bobina secundária, calculados pelo *software* são valores obtidos por ele de maneira aproximada. Foi necessária, então, a apresentação e comparação desses valores do método computacional, onde isso é mais um dos fatores que faz com que apareça um erro entre os valores dos dois métodos comparados.

Os principais parâmetros que são analisados para um projeto de uma BT são, as indutâncias e capacitâncias das bobinas primárias e secundárias. Esses parâmetros são primordiais, que para obtenção deles, são utilizados o número de espiras do indutor, comprimento do indutor e a frequência de ressonância. Portanto esses parâmetros são o maior foco da análise dos resultados.

Como é visto na Tabela (1), a diferença dos resultados, ou erros percentuais, são inferiores a 6%, é um erro não muito significativo. Porém os erros percentuais foram superiores a 0.92%, não se obteve nenhum valor igual comparado por ambos os métodos. Essa margem de erro é admissível, já que existem vários fatores que contribuem para a divergências entre resultados, como, por exemplo, a limitação do programa no acréscimo de casas decimais.

A BT é um transformador de núcleo de ar, ela se comporta como um transformador elevador, mas diferentemente do transformador convencional com entreferro, seu ganho de tensão não depende unicamente das tensões elétricas das bobinas e seus números de espiras. A tensão elétrica de saída da BT projetada foi aproximadamente 213,5kV, tomando como base o cálculo descrito neste trabalho. Tomando a BT como um

transformador com núcleo de ferro, pode-se calcular a tensão elétrica de saída através da Equação (14), e analisar a evidente diferença entre as tensões de saída.

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \therefore V_S = V_P \frac{N_S}{N_P} \quad (14)$$

$$V_S = V_P \frac{N_S}{N_P} = 1500 \cdot \frac{924}{16} = 866250 \text{ V}$$

Essa tensão de saída para um transformador com núcleo de ferro não leva em consideração fatores importantes que influenciam na perda e interação do sistema como espaçamento entre espiras, formato da bobina, espaçamento entre as bobinas. Onde todos esses interferem na indutância do conjunto, como por exemplo o espaçamento entre as espiras da bobina primária do projeto que é bastante elevado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A BT é um equipamento que apesar de ter sua estrutura simples e não ser muito conhecido, ofereceu à ciência um considerado salto no ramo de estudo da telecomunicação, além de ser um exemplo prático para os fenômenos eletromagnéticos como as faíscas geradas pela tal, geralmente com potencial elétrico de mais de 100kV, conhecidas como efeito corona.

Neste trabalho foi possível ver que para o projeto determinado conseguiu-se tensões elétricas de quase 1 milhão de volts com uma BT de médio porte, onde na prática seria suficiente para evidenciar os efeitos eletrostáticos. Os dados utilizados para o desenvolvimento desse projeto foram comparados com os dados gerados computacionalmente, onde apresentaram resultados próximos, validando assim o método de cálculo convencional para desenvolver projetos.

A teoria descrita neste trabalho permite que sejam feitos mais estudos sobre a BT e sua aplicabilidade e criar, a partir deste, estudos mais aprofundados sobre transferência de energia. O princípio de transferência de energia da BT, o *wireless*, foi de fundamental importância para a o avanço na telecomunicação com o rádio e ainda está sendo, hoje o com *wifi*. A transferência de energia elétrica via *wireless* é datada de mais de 100 anos passados, onde Nikola Tesla já conseguia acender lâmpadas fluorescentes através da indutância eletrodinâmica. Hoje já estão sendo feitos estudos e aplicações sobre a utilização da energia elétrica sem fio nas residências, o que enfatiza cada vez mais a importância da pesquisa e aplicação da utilização da indução elétrica no cotidiano.

REFERÊNCIAS

- [1] BOYLESTAD, Robert L. Análise de Circuitos. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2004.
- [2] CHIQUITO, Adenilson J.; LANCIOTTI JUNIOR, Francesco. Bobina de Tesla: dos Circuitos Ressonantes LC aos princípios das Telecomunicações. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1999.
- [3] GEREKOS, Christopher. The Tesla Coil. Bruxelles: Université Libre de Bruxelles. 2012.
- [4] SILVA, Domingos Sávio de Souza e. A versatilidade da Bobina de Tesla na prática docente do ensino do eletromagnetismo. 2012. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2012.
- [5] SUOMALAINEN, Harri. Tesla coil theory and applications. New York: Haba, 1993.



Artigo

Estudo de caso da tarifa branca considerando a implementação de técnicas de GLD e uso de aquecedor solar de água

Isabel Cristina Pinheiro de Gois ^[1], Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; isbcris2@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; fkv@ufersa.edu.br

Recebido: 31/10/2020;

Aceito: 24/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: Uma das maneiras modernas de conter a expansão do consumo sem comprometer o desenvolvimento econômico é o estímulo do uso eficiente de energia. Dessa forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL estabeleceu uma nova modalidade tarifária denominada Tarifa Branca que visa incentivar a redução do consumo de energia em horários de maior demanda. Entretanto, para que se torne viável ao consumidor, é necessário que haja deslocamento de carga para o período de menor demanda, já que neste horário, o valor da tarifa será menor. Sendo assim, o presente artigo tem como objetivo analisar o impacto técnico e econômico da aplicação de técnicas de Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) considerando a implementação da tarifa branca e a substituição do chuveiro elétrico por um sistema de aquecedor solar de água (SAS) em uma unidade residencial de baixa tensão. As técnicas de GLD aplicadas foram: deslocamento de carga e redução de pico. Para analisar a viabilidade da tarifa branca foram realizadas simulações no *software HOMER PRO*. Os resultados obtidos mostraram que a combinação das estratégias de GLD com a substituição do chuveiro elétrico pelo SAS viabilizam o uso da tarifa branca já que reduzem o custo de energia da unidade consumidora.

Palavras-chave: Tarifa Branca; GLD; Chuveiro Elétrico; Aquecedor Solar de Água

Abstract: One of the modern ways to contain the expansion of consumption without compromising or economic development is to encourage the efficient use of energy. Regarding this scenario, the National Electric Energy Agency - ANEEL established a new tariff modality called the White Rate, which aims to encourage the reduction of energy consumption during times of greater demand. However, in order to make it viable to the consumer, it is necessary to relocate the charge for the period of least demand since at this time the tariff value will be lower. Therefore, this article aims to analyse a study of technical and economic impact of Demand Side Management (GLD) techniques considering the implementation of the white tariff and the replacement of the electric shower with a solar water heater system (SAS) in a low voltage residential unit. The applied GLD techniques were: load displacement and peak reduction. To analyze the feasibility of the white tariff modality, simulations were performed using the HOMER PRO software. The results showed that combination of GLD strategies and replacement of the electric shower by the SAS makes the use of the white tariff feasible since they reduce the energy cost of the consumer unit.

Key-words: White Tariff; GLD; Electric Shower; Solar Water Heater.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com suprimento energético fez com que aumentasse o interesse da sociedade pela gestão de energia. Diante deste cenário foi criado o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) que, segundo [1], é um programa que envolve ações das concessionárias para produzir alterações nas curvas de carga dos consumidores e, como forma de incentivo, foram criadas tarifas diferenciadas de acordo com o horário do dia.

Atualmente no Brasil vigora a Tarifa Branca, aprovada em 2016 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), esta modalidade tarifária possui três postos tarifários: ponta, intermediário e fora de ponta e, para que se torne uma opção viável ao consumidor necessita de alterações nos seus hábitos de consumo, além de ações de eficiência energética, a exemplo, a substituição do chuveiro elétrico por sistemas de aquecimento solar de água.

Segundo [2] o aquecimento de água corresponde a 24% do total da energia consumida considerando apenas o setor residencial. Logo, estimar o uso de aquecedor solar de água configura-se como uma alternativa de eficiência de energia, e, apesar do custo inicial elevado, iniciativas como aplicação de técnicas de GLD podem colaborar com a maior disseminação desse tipo de sistema.

A problemática deste trabalho consiste em analisar através de simulações feitas no *software Homer PRO* a viabilidade técnica e econômica da aplicação de técnicas de GLD deslocamento de carga e redução de pico, assim como a substituição do chuveiro elétrico pelo sistema de aquecedor solar em uma residência de baixa tensão com consumo médio mensal de aproximadamente 280 kWh. Diante dos resultados obtidos, será possível definir a alternativa mais econômica e que seja capaz de suprir à demanda energética da unidade consumidora.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Gerenciamento pelo Lado da Demanda

De acordo com [3] o gerenciamento pelo lado da demanda envolve planejamento, análise e implementação de atividades que influenciam os consumidores a mudar a configuração do seu perfil de consumo.

As estratégias de GLD podem ser utilizadas individualmente ou combinadas para remodelar a curva de carga. Dentre elas, destacam-se: a conservação energética, crescimento estratégico da carga, curva de carga flexível, deslocamento de carga, preenchimento de vales e redução de pico [1]. Neste trabalho serão aplicadas duas destas estratégias, a redução de pico e deslocamento de carga, ambas com o objetivo de manipular a carga no horário de ponta.

A técnica de redução de pico, segundo Campos [3] é definida como a redução da carga de ponta, conseguida geralmente através do controle direto, pela empresa de energia, de um aparelho de uso final. Já a técnica de deslocamento de carga, de acordo com Braga [1], incentiva os consumidores a deslocarem o consumo de energia elétrica do horário de ponta para o horário fora de ponta e, neste caso, possui um motivador financeiro, já que impõe tarifas mais caras no horário de ponta e tarifas mais baratas no horário fora de ponta. [4].

2.2. Tarifa Branca

A tarifa horária branca foi aprovada a partir da Resolução Normativa nº 733/2016 da ANEEL [5] e a partir de janeiro de 2020 poderá ser exercida por todos os titulares atendidos em baixa tensão, excetos as unidades consumidoras da subclasse baixa renda da classe residencial.

Ao oferecer essa nova estrutura tarifária, o objetivo da ANEEL é incentivar o uso mais eficiente do sistema elétrico, tendo a sinalização de preços como mecanismo indutor da modulação de carga, cobrando-se mais caro para o uso da energia em horário nos quais esta é mais demandada [6]. Logo, como resultado da inserção da tarifa branca, espera-se que os benefícios financeiros concedidos, referente à energia mais barata consumida no horário fora de ponta, sejam compensados pela menor demanda nos horários de ponta e, conseqüentemente, a postergação dos investimentos na infraestrutura de transmissão e distribuição de energia elétrica [7].

Os postos tarifários são definidos por distribuidora no processo de revisão tarifária de acordo com a Resolução Normativa nº 414/2010 [8]. Na tarifa branca aplicam-se três postos tarifários: ponta, intermediário e fora de ponta. O horário de ponta é um período diário de 3 horas consecutivas, com exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais; o horário intermediário é um período de horas conjugadas ao horário de ponta, podendo variar de 1h à 1h30min antes e depois do horário de ponta; e o horário fora de ponta é o período diário composto pelas horas consecutivas e complementares ao horário de ponta e intermediário.

Diferente da tarifa branca, a convencional apresenta uma tarifa única de consumo, independente das horas de utilização do dia. Antes de optar pela adoção da tarifa branca, o consumidor deve avaliar o seu perfil de consumo e traçar um comparativo entre a tarifa convencional e a tarifa horária branca, sendo esta última vantajosa apenas para os consumidores que podem deslocar o consumo de energia elétrica do horário de ponta para o intermediário ou, preferivelmente, para o horário fora de ponta [9]. Caso isto não seja possível, à adesão à tarifa branca pode ocasionar um aumento indesejável na fatura de energia sendo, portanto, mais indicado permanecer na tarifa convencional.

2.3. Sistema de Aquecimento Solar de Água

O aquecimento de água para utilização doméstica, especialmente para o banho, está presente na maior parte das residências do Brasil e dentre as várias alternativas para se aquecer a água a mais utilizada é o chuveiro elétrico. De acordo com a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo (PPH) – Ano base 2005 – dos 80,9% dos domicílios brasileiros que aquecem a água para banho, 73,5% utilizam energia elétrica como fonte de aquecimento e apenas 0,4% usam aquecedor solar [10].

Conforme [11] apesar de ser um equipamento com baixo custo de aquisição, simplicidade na instalação e complexidade tanto para operação quanto para manutenção, o chuveiro elétrico possui alto custo de utilização, pois é um equipamento de alta potência. Segundo [12] para o consumidor isto resulta no aumento da conta de energia e, para as concessionárias, este equipamento apresenta características indesejáveis como baixo fator de potência que contribui para a degradação da qualidade da energia e, além disso, devido às características de demanda concentrada em curtos espaços de tempo, ocorre a formação de picos de consumo.

Diante deste cenário, a utilização da energia solar térmica é uma alternativa que gera uma série de benefícios, já que há o aproveitamento da energia solar que é uma fonte gratuita de energia, abundante e não poluente; promove a contribuição para preservação do meio ambiente por conservar a energia elétrica; contribui para a redução das dificuldades para o suprimento de energia e de potência que eventualmente venham ocorrer no sistema elétrico nacional; cria empregos locais diretos e indiretos [7].

Os sistemas de aquecimento solar são compostos por coletores solares, reservatório de fluido (boiler), fonte auxiliar de energia e um sistema de distribuição de fluido aquecido, sendo o coletor solar o componente mais importante do sistema de aquecimento solar, já que é responsável pela conversão da energia solar em energia térmica [13].

Existem dois tipos de sistema para aquecimento solar de água, o sistema ativo (sistema de fluxo forçado) e o sistema passivo. Os sistemas ativos usam uma bomba para circular a água do coletor para o boiler, já o sistema passivo utiliza a convecção natural em razão das diferenças de densidade. Tem-se ainda que o abastecimento de água quente do coletor solar pode ser feito de forma direta, quando a água do reservatório é obtida diretamente do aquecedor, ou de forma indireta, quando é inserido um trocador de calor no interior do reservatório e o líquido de trabalho é um fluido refrigerante [14].

Para aplicações em residências, a forma mais utilizada é a passiva direta, pois apresenta um custo menor devido ao fato de não fazer uso de bombas, entretanto, em regiões mais frias o emprego do sistema ativo indireto é indicado devido a possibilidade de congelamento da água nas tubulações. Termossifão e sistema integrado

são exemplos de sistemas passivos e são amplamente utilizados [15], sendo neste trabalho, o SAS proposto a ser implementado.

Termossifão ocorre quando a água no coletor se expande, tornando-se menos densa à medida que o calor é adicionado pela energia solar e sobe por meio do coletor para o topo do tanque de armazenamento que é “acoplado” e montado horizontalmente acima dos coletores solares no telhado. Assim, a água de temperatura mais baixa no tanque se move para baixo até o tubo de entrada do coletor por conta de sua maior densidade [16]. A Figura 1 demonstra um sistema Termossifão.

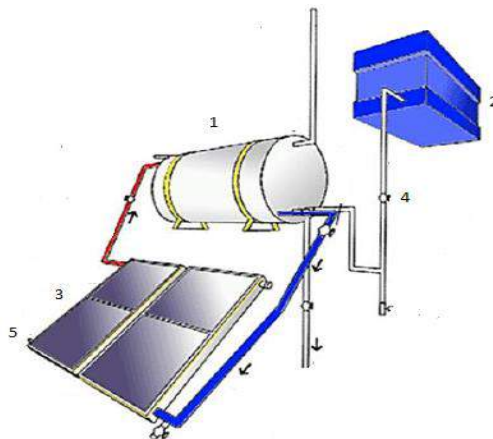


FIGURA 1. Sistema de Aquecimento Solar de Água. 1. Boiler (reservatório térmico); 2. Caixa d'água; 3. Coletores Solares; 4. Registro; 5. Válvula anticongelamento. Fonte: [17].

Um dos principais problemas relacionados à difusão da implementação da tecnologia de aquecimento solar de água é o custo de aquisição dos equipamentos e sua instalação, particularmente para as residências de baixa renda [18]. Dessa forma, para que se torne uma alternativa democrática e eficiente para a população brasileira, deve-se definir ações efetivas de modo a vencer as barreiras tecnológicas e comerciais.

É importante ressaltar que a efetiva implementação de sistemas de coletores solares representa para a concessionária uma das alternativas para se aplicar o Gerenciamento pelo Lado da Demanda, já que um dos objetivos é minimizar a carga na ponta, reduzindo-a ou deslocando-a para outro horário, fazendo com que os consumidores finais sejam estimulados a transferir seus horários de consumo de energia [19]. Logo, é uma alternativa para quem não pretende mudar o perfil de consumo mas quer desfrutar dos benefícios da Tarifa Branca.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os casos estudados foram divididos em dois cenários: um considera a utilização do chuveiro elétrico na residência e o outro considera a substituição do chuveiro elétrico pelo sistema de aquecimento solar de água. Dentro de cada cenário foram realizadas simulações combinando a tarifa convencional e a tarifa branca com a implementação da combinação das técnicas de GLD gerenciamento de carga e redução de pico. A estrutura dos cenários simulados pode ser visualizada na Figura 2.

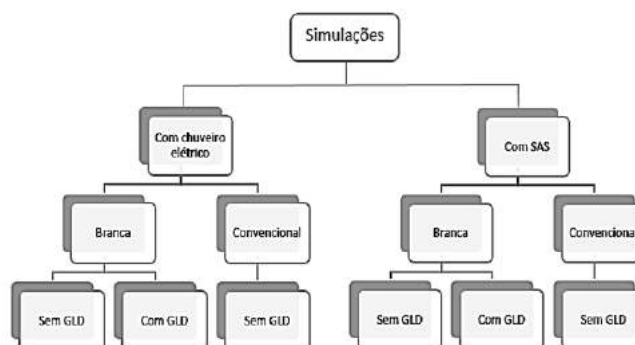


FIGURA 2. Fluxograma das simulações realizadas. Fonte: [20].

Como pode ser visto na Figura 2, foram realizadas 6 simulações e, diante dos resultados apresentados, serão realizadas análises comparativas para que, dessa forma, seja verificada a situação que apresenta maior viabilidade técnica e econômica para a unidade consumidora em questão.

As simulações foram feitas utilizando o *Homer Pro*, que é um *software* pago desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* mas que disponibiliza uma versão gratuita por 3 meses. O *Homer Pro* caracteriza-se como um modelo de otimização de sistemas híbridos de energia, tendo como objetivo prever a configuração de sistemas descentralizados, avaliando um grande número de alternativas na busca da melhor solução [21]. Logo, o objetivo é identificar o sistema de menor custo, capaz de suprir a demanda de energia de uma determinada carga.

Para isso, um processo de otimização realizado por este programa computacional necessita, dentre outros, dos seguintes dados: curva de carga da unidade consumidora, modalidade tarifária, valores de tarifa de energia para os postos tarifários e características dos componentes que farão parte do sistema em análise que, no caso deste trabalho, é o sistema de aquecimento solar de água, assim, deverá ser estipulado um valor necessário de capital de investimento.

A unidade consumidora em estudo está localizada na cidade de Mossoró-RN, se enquadrada no grupo B1 residencial e possui uma média anual de consumo mensal de aproximadamente 280 kWh. Para a realização das simulações, conforme mencionado, o *Homer Pro* considera a curva de carga da UC, para isto, foi feito um levantamento de cargas e de consumo da residência em estudo e a curva de carga fornecida pelo *software* é indicada na Figura 3.

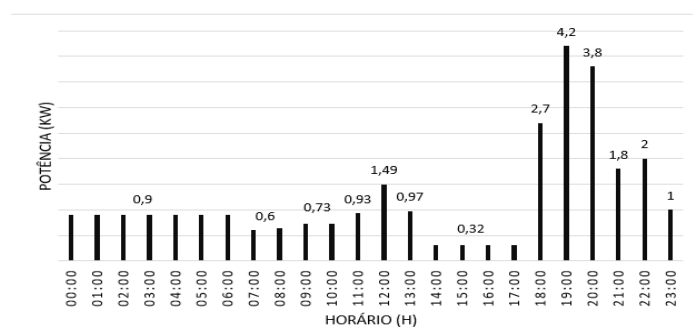


GRÁFICO 1. Curva de Carga da UC. Fonte: [20].

Também foi implementada no *Homer Pro* a localização da UC, de modo que os resultados sejam mais precisos, já que será levada em consideração a radiação solar local onde será instalado o sistema de aquecimento solar de água. Em seguida, foi montado o diagrama com os componentes que serão necessários para a realização das simulações, que, neste caso, será a rede elétrica e a carga, conforme pode ser visto na Figura 3.

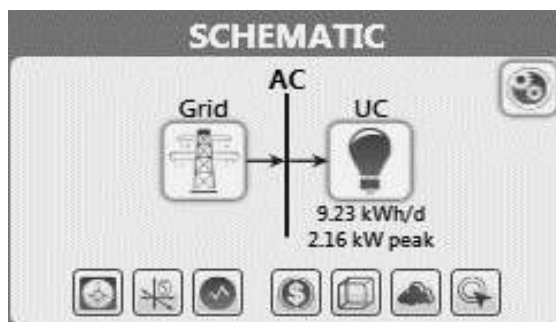


FIGURA 3. Curva de Carga da UC. Fonte: [20].

Em cada simulação será necessário especificar no *software* a modalidade tarifária que está sendo utilizada no sistema, bem como o valor da tarifa de energia para os postos tarifários. O *Homer Pro*, após o processo de otimização, classifica os resultados encontrados por meio do custo final de energia (do inglês *cost of energy* – COE). O COE é a média do custo por kWh consumido, seja este produzido pelo sistema de geração ou comprado da rede. O programa usa vários fatores para se calcular o custo anual total de energia, tais como a base do kWh, fatores financeiros diversos (inflação, taxa de desconto), entre outros. Outro parâmetro que também é levado em consideração na avaliação dos resultados é o NPC – custo atual líquido (net present cost) – que representa a diferença entre o valor respectivo a todos os custos do sistema (custo de capital, de substituição, de compra de energia, entre outros), e o valor total da receita gerada ao longo da vida útil. A vida útil adotada para o sistema foi de 25 anos.

4. RESULTADOS

Conforme mencionado anteriormente foi realizado neste trabalho um estudo de caso acerca da implementação de técnicas de GLD, duas diferentes modalidades tarifárias e a substituição do chuveiro elétrico pelo sistema de aquecimento solar de água em uma UC localizada em Mossoró-RN e enquadrada no grupo B1 residencial por meio do *software Homer Pro*.

Cada simulação contém características diferentes de modalidade tarifária, preço das tarifas, modificação na curva de carga, dentre outras. Portanto, a partir dos resultados será possível eleger a opção mais vantajosa para o estudo em caso.

4.1. Análise com a tarifa convencional utilizando chuveiro elétrico

A primeira simulação considera a situação atual da unidade consumidora, em que a modalidade tarifária adotada é a convencional. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 1. Simulação com a tarifa convencional e utilizando chuveiro elétrico. Fonte: [20].

<i>NPC (R\$)</i>	<i>COE (R\$)</i>	<i>Custo de Operação (R\$/ano)</i>	<i>Capital Inicial (R\$)</i>
27694	0,666	2142	0

Uma vez que a simulação está considerando a situação presente da UC, não há exigências de investimentos iniciais, logo, o capital inicial é nulo.

4.2. Análise com a tarifa branca utilizando chuveiro elétrico

A segunda simulação considerou a situação em que a UC adere à tarifa branca sem realizar nenhuma alteração na curva de carga. Com a mudança da modalidade tarifária, deverá ser inserido no *software* os valores referentes aos três postos tarifários: ponta, intermediário e fora de ponta, bem como os horários que estes são aplicados de acordo com a concessionária local COSERN. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos nesta simulação.

TABELA 2. Simulação com a tarifa branca e utilizando chuveiro elétrico. Fonte [20].

<i>NPC (R\$)</i>	<i>COE (R\$)</i>	<i>Custo de Operação (R\$/ano)</i>	<i>Capital Inicial (R\$)</i>
30470	0,742	2272	0

Nesta simulação houve apenas a adesão à modalidade tarifária branca, logo, assim como na primeira, não houve exigência de investimentos iniciais, portanto, o capital inicial é zero.

Comparando as simulações 4.1 e 4.2, nota-se que é mais viável para a UC manter-se na modalidade tarifária convencional, uma vez que a segunda simulação mostrou que o custo de operação, NPC e COE são maiores quando adota-se a tarifa branca.

4.3. Análise com a tarifa branca utilizando chuveiro elétrico e implementando técnicas de GLD

Nesta simulação foi considerada a implementação da combinação das técnicas de GLD deslocamento de carga e redução de pico, ou seja, foi reduzido, quando possível, o consumo de algumas cargas de energia no horário de ponta e outras foram deslocadas para horário de menor demanda de energia. Desta forma, haverá modificação na curva de carga da unidade consumidora, como pode ser visto no Gráfico 2. Os resultados obtidos na análise da simulação podem ser vistos na Tabela 3.

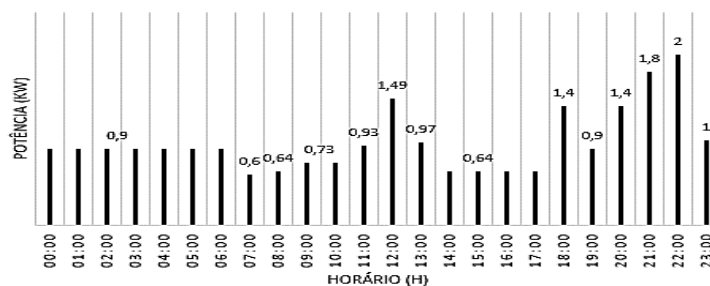


GRÁFICO 2. Curva de Carga da UC quando aplicadas as técnicas de GLD. Fonte: [20].

TABELA 3. Simulação com a tarifa branca, utilizando chuveiro elétrico e aplicando as técnicas de GLD. Fonte: [20].

<i>NPC (R\$)</i>	<i>COE (R\$)</i>	<i>Custo de Operação (R\$/ano)</i>	<i>Capital Inicial (R\$)</i>
26528	0,652	2052	0

Fazendo uma análise comparativa entre as simulações 4.1, 4.2 e 4.3, é possível constatar que com a implementação das técnicas de GLD haverá maior viabilidade para adesão à tarifa branca, devido as alterações na curva de carga. Assim esta simulação é a mais atrativa até o presente momento pois apresenta menores valores de COE e NPC.

4.4. Análise da tarifa convencional utilizando o SAS

Esta simulação considera a implementação do sistema de aquecimento solar de água e a retirada do chuveiro elétrico. A modalidade tarifária utilizada é a convencional. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 4.

TABELA 4. Simulação da UC com a tarifa convencional e SAS. Fonte: [20].

<i>NPC (R\$)</i>	<i>COE (R\$)</i>	<i>Custo de Operação (R\$/ano)</i>	<i>Capital Inicial (R\$)</i>
30694	0,73	2342	2500

Nesta simulação, devido a implementação do SAS é exigido um investimento inicial, conforme pode ser visto na Tabela 4. Este valor foi baseado na necessidade do consumidor em utilizar um SAS para uma caixa d'água de 300 litros, assim, foram pesquisados os valores dos componentes do sistema e levado em consideração o custo de sua montagem. Os resultados obtidos mostram que o valor do custo de operação e NPC são maiores quando comparado às simulações anteriores, devido a instalação do SAS. Entretanto, o COE apresentou vantagem com relação a simulação 4.2, pois apresenta um valor inferior.

4.5. Análise com a tarifa branca utilizando o SAS

Para esta simulação foi feita a mudança da modalidade tarifária convencional para a tarifa branca e a substituição do chuveiro elétrico pelo SAS. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 5. Simulação da UC com a tarifa branca e SAS. Fonte: [20].

<i>NPC (R\$)</i>	<i>COE (R\$)</i>	<i>Custo de Operação (R\$/ano)</i>	<i>Capital Inicial (R\$)</i>
31698	0,767	2420	2500

Conforme apresentado na Tabela 5 e comparando com as simulações anteriores, não é viável para a UC fazer a substituição do chuveiro elétrico pelo SAS e a mudança tarifária de convencional para branca, pois o valor de COE apresentado foi o maior com relação às outras simulações, bem como o NPC e custo de operação.

4.6. Análise com a tarifa branca utilizando o SAS e implementando técnicas de GLD

Nesta última simulação foi feita a implementação das técnicas de GLD deslocamento de carga e redução de pico, logo a curva de carga é a mesma apresentada no Gráfico 2, e é feita a substituição do chuveiro elétrico pelo SAS. A modalidade tarifária utilizada é a tarifa branca. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6.

TABELA 6. Simulação da UC com a tarifa branca utilizando o SAS e implementando as técnicas de GLD. Fonte: [20].

<i>NPC (R\$)</i>	<i>COE (R\$)</i>	<i>Custo de Operação (R\$/ano)</i>	<i>Capital Inicial (R\$)</i>
28134	0,643	2060	2500

Os resultados da simulação visualizados na Tabela 6 mostram-se mais atrativos que todas as simulações anteriores. Quando comparado à simulação 4.5, por exemplo, devido à aplicação das técnicas de GLD que modifica a curva de carga do consumidor, há redução dos custos de energia.

Quando se compara a simulação 4.6 com 4.3, percebe-se que apesar dos custos de operação e NPC serem maiores, devido ao custo de investimento do SAS, o custo de energia (COE) é menor, logo, o estudo mostra que é viável para a UC fazer a substituição do chuveiro elétrico pelo SAS e aderir à tarifa branca, desde que seja feita a implementação do gerenciamento de carga.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através das simulações realizadas no *software Homer Pro* foram bastante satisfatórios, pois mostram que com a implementação das técnicas de GLD a adesão da tarifa branca torna-se viável ao consumidor, uma vez que ao deslocar o consumo do período de ponta para o período fora de ponta, obtém-se economia na conta de energia elétrica.

Assim, pôde-se verificar que a maior viabilidade para esta UC é a substituição do chuveiro elétrico pelo Sistema de Aquecimento Solar de Água, a adesão à modalidade tarifária branca e a implementação de técnicas

de GLD. É possível observar nestas simulações o impacto negativo que a não implementação das técnicas de GLD causa sobre o consumidor, conforme pode ser visto nas simulações 4.2 e 4.5, portanto, para a efetiva realização da economia oferecida pela tarifa branca, é fundamental o comprometimento do consumidor em aplicar as técnicas de GLD, uma vez que não aplicadas, o impacto negativo pode ser muito grande.

REFERÊNCIAS

- [1] Braga, Nina Bordini. Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Áreas Residenciais. UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- [2] ANEEL. Atlas da Energia Elétrica do Brasil. São José dos Campos, SP. 2ª edição – 2017. Disponível em <[http://www.absolar.org.br/atlas-brasileiro-de-energia-solar-2ª-edicao.html](http://www.absolar.org.br/atlas-brasileiro-de-energia-solar-2a-edicao.html)> Acesso em 3 de outubro de 2019.
- [3] Campos, Alexandre de. Gerenciamento Pelo Lado da Demanda: Um Estudo de Caso. 2004. 95f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, USP, São Paulo, 2004.
- [4] Cunha, Murilo V. da; Bernardon, Daniel P.; Ramos, Diego B. Técnicas de GLD Aplicadas ao Consumidor de BT Considerando a Tarifa Branca e a Geração Distribuída. UFSM, Santa Maria, 2015.
- [5] ANEEL. Postos Tarifários. Disponível em <<https://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios>>. Acesso em 13 de nov. 2019.
- [6] LIMBERGUER, Marcos Alexandre. Estudo da tarifa branca para a classe residencial pela medição de consumo de energia e de pesquisa de posses e hábitos. 162 f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.
- [7] BAPTISTA, Danilo Febroni. Estrutura da tarifa branca de energia elétrica no Brasil: Análise crítica e proposição metodológica. 129 f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.
- [8] ANEEL. Tarifas Consumidores. Disponível em < https://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/zNaRBjCLDgBE/content/modalidade/654800>. Acesso em 15 de nov. 2019.
- [9] Silva, Rodrigo V.; Affonso, Carolina M. Gerenciamento pelo Lado da Demanda de um Sistema Residencial Utilizando Recozimento Simulado. UFPA, Pará, 2015.
- [10] ELETROBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano base 2005 - Disponível em <<http://www.procel.gov.br/main.asp?View={4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480}>> Acesso em 04 dez 2019.
- [11] Tomé, M. C. Análise do Impacto do Chuveiro Elétrico em Redes de Distribuição no Contexto da Tarifa Horossazonal. 2014. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- [12] Napolini, Helena Flávia. Agregação da Energia Solar Térmica ao Aquecimento da Água para o Banho na Moradia Popular no Brasil. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.
- [13] SIQUEIRA, A. M. O. Desenvolvimento de um programa de simulação computacional de sistemas de aquecimento solar para água. 131 p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.
- [14] DIAS, Lucilene Silva. Estudo Prospectivo e Econômico da Substituição do Chuveiro Elétrico pelo Aquecedor Solar na Cidade de Uberlândia-MG. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2005.
- [15] CRUZ, Talita Borges. Análise do Potencial de Inserção de Energia Solar Térmica para Aquecimento de Água em Residências Unifamiliares no Brasil. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- [16] SANTOS, Daisy Regina dos. Avaliação Técnica-Econômica Comparativa de Sistemas de Aquecimento de Água Utilizando diferentes Fontes Energéticas (elétrica, solar e GLP). Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Paraná, 2019.
- [17] SOLETROL. Como Funciona o Aquecedor Solar de Água Soletrol. Disponível em <<https://www.soletrol.com.br/extras/como-funciona-o-aquecedor-solar-soletrol/>>. Acesso em 2 de dez 2020.

- [18] SÁLES, Isolda Cíntia Ferreira de. Análise da substituição do chuveiro elétrico por aquecedor solar: uma contribuição ao setor elétrico na conservação de energia. 158 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2008.
- [19] CHADE, J. F. Estudo do Sistema Gerenciamento pelo Lado da Demanda para Consumidores e Distribuidores de Energia Elétrica. São Paulo, 2004.
- [20] GOIS, Isabel Cristina P. de. Análise da Tarifa Branca em uma unidade residencial considerando a implementação de técnicas de GLD e uso de aquecedor solar de água. Trabalho de Conclusão de Curso - Ufersa.2020.
- [21] ALMEIDA, S. C. A.; FREIRE, R. L. Geração de Energia Elétrica através de Sistema Híbrido Diesel-Eólico para um Hospital. Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural (AGRENER GD), 2008.