

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XV



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

15^a ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

15ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2023

160 f.: il

DOI: 10.37423/2023.edcl779

ISBN: 978-65-5367-373-1

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2023.edcl779>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Wesley Pacheco Calixto

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

MSc Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

CAPÍTULO 1	6
CÁLCULO DE FADIGA DA ENGRENAGEM FRONTAL DE UMA FERRAMENTA DE APERTO DE PARAFUSOS DENOMINADA CROWFOOT	
Alaudio Ott	
Claiton Emilio do Amaral	
Custodio da Cunha Alves	
Emerson José Corazza	
Fábio Krug Rocha	
Flávio de Borba Prá	
Gilson João dos Santos	
Paulo Roberto Queiroz	
Renato Cristofolini	
Rosalvo Medeiros	
DOI 10.37423/230708043	
 CAPÍTULO 2	 39
EMULADOR FOTOVOLTAICO DE BAIXO CUSTO, A PARTIR DE UM CONVERSOR BUCK, EMPREGANDO REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO COM MPPT P E O	
Adjeferson Custodio Gomes	
LUIZ CARLOS CARDOZO MAGNO	
Taís Mirele Fernandes da Silva	
PATRICK LAURIENT CARDOSO SILVA	
Fábio Conceição Cruz	
Rafael Rodrigues de Queiroz Freitas	
DOI 10.37423/230808059	
 CAPÍTULO 3	 60
CERTIFICAÇÃO LEED PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS	
Welleson Feitosa Gazel	
DOI 10.37423/230808061	
 CAPÍTULO 4	 74
AVALIAÇÃO DE JATOS DESCAREPADORES UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	
Samyla Souza Dutra	
Odilon Correa Silva	
Cristóvão Nery Giacomini	
DOI 10.37423/230808075	

CAPÍTULO 5	89
MODELAGEM NO DOMÍNIO DO TEMPO, SOLUÇÃO VIA TRANSFORMADA DE LAPLACE E ANÁLISE DAS FORMAS DE ONDA DE CIRCUITO ELÉTRICO RLC CHAVEADO	
Otávio Amaro de Paula dos Santos	
Matheus dos Santos Bezerra	
Flávio Luiz Rossini	
DOI 10.37423/230808076	
CAPÍTULO 6	115
ADEQUAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA AUMENTO DE PRODUÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA – ETA	
Murilo Tavares Palos	
Marcos Vinícius Henrique da Silveira	
Valdinei de Oliveira	
Vinícios Gomes Dornel	
Cirillo Moreno Tavares Palos	
Nelma Paula Vieira Ramos	
Helena de Carvalho	
Fernando Henrique de Oliveira	
Caroline Luana Santos Fontellenne	
DOI 10.37423/230808078	
CAPÍTULO 7	120
MISTURAS DE BORRACHA NATURAL (NR)/COPOLÍMERO DE ESTIRENO E BUTADIENO (SBR):ANÁLISE TEÓRICA DAS FORMAS DE PROCESSAMENTO ATRAVÉS DA MODELAGEM MOLECULAR	
Helson Moreira da Costa	
Valéria Dutra Ramos	
DOI 10.37423/230808108	
CAPÍTULO 8	141
MODELAGEM MATEMÁTICA DE CINÉTICAS DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA DE PRODUTOS NATURAIS	
Ana Paula de Souza e Silva	
Jean Maurício Leão Pinheiro	
Flávia Cristina Seabra Pires	
Maria Caroline Rodrigues Ferreira	
Letícia Maria Martins Siqueira	
Eduardo Gama Ortiz Menezes	
Raul Nunes de Carvalho Junior	
DOI 10.37423/230808121	

CAPÍTULO 9 150

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DE SUCOS DE FRUTAS

Marcelo Bacci da Silva

Laura Vieira de Deus Oliveira

Nicoli Rodrigues Oliveira

DOI 10.37423/230808132

Capítulo 1



10.37423/230708043

CÁLCULO DE FADIGA DA ENGRENAGEM FRONTAL DE UMA FERRAMENTA DE APERTO DE PARAFUSOS DENOMINADA CROWFOOT

Alaudio Ott

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Claiton Emilio do Amaral

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Custodio da Cunha Alves

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Emerson José Corazza

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Fábio Krug Rocha

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Flávio de Borba Prá

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Gilson João dos Santos

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Paulo Roberto Queiroz

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Renato Cristofolini

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Rosalvo Medeiros

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE
– UNIVILLE

Resumo: Este artigo apresenta os conceitos principais para o dimensionamento de uma engrenagem de dentes retos de uma ferramenta de aperto de parafusos denominada *crowfoot*. Esse tipo de ferramenta é comumente usado nas indústrias de montagem, montadoras de automóveis, caminhões, tratores e máquinas em geral. Sua aplicação é necessária quando existem restrições de acesso, pontos de aperto de parafusos onde uma ferramenta pneumática ou eletrônica não atende sem a adaptação desse acessório. Para o dimensionamento da engrenagem utilizou-se a norma *ANSI/AGMA 2101-D04*, que é a versão métrica da norma *ANSI/AGMA 2001-D04*. Realiza-se o dimensionamento quanto a tensão de flexão no pé do dente e quanto a tensão ao crateramento na face do dente da engrenagem. O objetivo geral do dimensionamento da engrenagem de um caso real utilizando a norma *ANSI/AGMA* mostra-se eficiente para determinar a vida em fadiga de $5 \cdot 10^5$ ciclos da peça. Uma comparação específica dos resultados dos cálculos analíticos com a simulação do software de CAD *SolidWorks*, robustece ainda mais a eficácia da norma *ANSI/AGMA*, visto que os resultados diferem menos de 2%, quando compara-se os resultados do estudo estático do *SolidWorks* com os resultados da norma *ANSI/AGMA* sem os fatores concentradores de tensão.

Palavras-chave: Engrenagem; Fadiga; *SolidWorks*; *ANSI/AGMA 2101-D04*.

1.INTRODUÇÃO

Na engenharia mecânica, a engrenagem é um componente importante associado ao projeto de máquinas que transmitem rotação, torque e potência entre eixos, por meio do engrenamento dos dentes. Mudando os parâmetros das engrenagens, podem ser aumentadas as velocidades de rotação de um eixo e diminuir seu torque, manter a velocidade e o torque constantes, ou reduzir a velocidade de rotação e aumentar o torque (NUNEZ, 2022).

Para um produto ter um ciclo de vida aceitável, o projetista deve prever que a tensão máxima seja inferior ao limite de resistência do material com um fator de segurança adequado, para que, apesar das incertezas, as falhas sejam raras (BUDYNAS e NISBETT, 2011).

Na montagem de peças por parafusamento o uso de ferramentas especiais é importante para aumentar a produtividade. Por isso um estudo será necessário para que o projeto atenda o torque da operação e que seja confiável, e que opere pelo tempo e condições que foi projetado.

O objetivo geral deste trabalho, é o dimensionamento das resistências de flexão e de crateramento de uma engrenagem de dentes retos de uma ferramenta crowfoot para montagem em apertadeiras pneumáticas ou eletrônicas, para um cálculo de vida de $5 \cdot 10^5$ ciclos, utilizando a norma ANSI/AGMA 2101-D04. O objetivo específico é comparar os resultados dos cálculos analíticos das tensões de flexão e de crateramento, com o resultado das tensões da simulação computacional via *software SolidWorks*. O projeto dos demais componentes não serão abordados nesta análise.

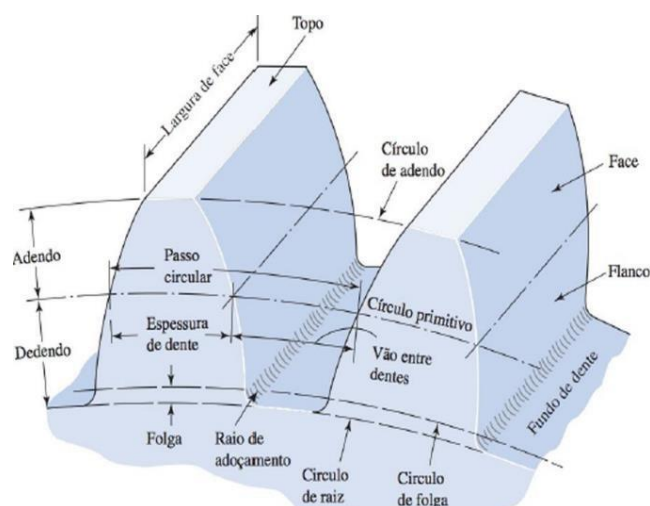
2.REFERENCIAL TEÓRICO

Se apresenta neste capítulo conceitos básicos e uma discussão sobre análises e cálculos desenvolvidos para engrenagens retas que até os dias de hoje é a base da metodologia corrente.

2.1. NOMENCLATURA ENGRENAGEM DE DENTES RETOS

Conforme Budynas e Nisbett (2011), os cálculos de engrenagens retas são baseados na circunferência primitiva, seu diâmetro d , é o diâmetro primitivo. Os círculos primitivos de um par de engrenagens em funcionamento são tangentes entre si.

De acordo com Collins, (2019), as engrenagens tem formação determinada por duas rodas dentadas, que geram o movimento, sendo a menor denominada de pinhão e a maior denominada de coroa. Os termos técnicos de dentes de engrenagens retas está ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Terminologia de dentes de engrenagem

Fonte: BUDYNAS E NISBETT, 2011.

2.2. ANÁLISE DE FORÇAS EM ENGRENAGEM DE DENTES RETOS

De acordo com Budynas e Nisbett (2011), na figura 2(a), as reações ocorrem ao longo da linha de pressão, ϕ . Na figura 2(b), o pinhão foi separado da coroa e o efeito dessas interações foi substituído por forças, F_{32} e F_{23} . Na figura 2(c), no diagrama de corpo livre do pinhão as forças foram resolvidas em componentes radial e tangencial, F_{32}

t e F_{32}

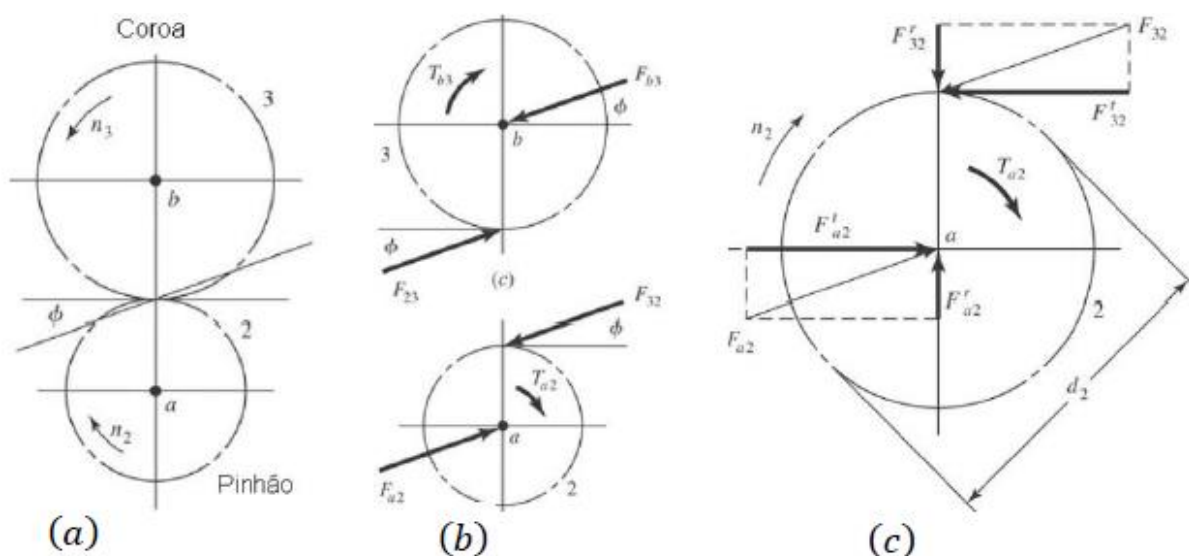
r . Definimos que $Wt = F_{32}$

t , como a carga transmitida, pois, $Wt = F_{32}$

r , não transmite potência. O torque aplicado e a carga transmitida estão relacionados pela equação 2.1, tem-se;

$$T = \frac{d}{2 \cdot 1000} \cdot W_t \text{ (Nm)} \quad \text{Eq. 2.1}$$

sendo: T = torque aplicado, (Nm); Wt = carga transmitida, (N); d = diâmetro da engrenagem, (mm). Em concordância com Budynas e Nisbett (2011), a potência H transmitida através da engrenagem em rotação pode ser obtida pela relação padrão de produto do torque T pela velocidade angular ω . Com a equação 2.2 no SI tem-se;

Figura 2 – Diagrama de corpo livre de um trem de engrenagem simples

Fonte: BUDYNAS E NISBETT, 2011.

$$W_t = \frac{60000 \cdot H}{\pi \cdot d \cdot n} \text{ (KN)} \quad \text{Eq. 2.2}$$

sendo: W_t = Carga transmitida, (KN); H = Potência, (KW); d = Diâmetro primitivo da engrenagem, (mm); n = rotação, (rev/min).

2.3.EQUAÇÃO DE FLEXÃO DE LEWIS

Conforme Budynas e Nisbett (2011), Wilfred Lewis elaborou a equação para calcular a tensão de flexão nos dentes de engrenagens onde a forma do dente entrava no desenvolvimento. Apresentada no ano de 1892, ainda hoje é a base para os cálculos de grande parte das engrenagens. A figura 3a é usada para fazer a demonstração da equação básica de Lewis, que mostra uma viga em balanço, e na figura 3b, tem-se que a tensão de flexão máxima ocorre no ponto a do dente de engrenagem.

Conforme demonstrado por Budynas e Nisbett (2011), a equação 2.3 é a fórmula de Lewis no sistema internacional (SI). O fator Y é chamado de fator de forma de Lewis.

$$\sigma = \frac{W_t}{F \cdot m \cdot Y} \text{ (MPa)}$$

Eq. 2.3

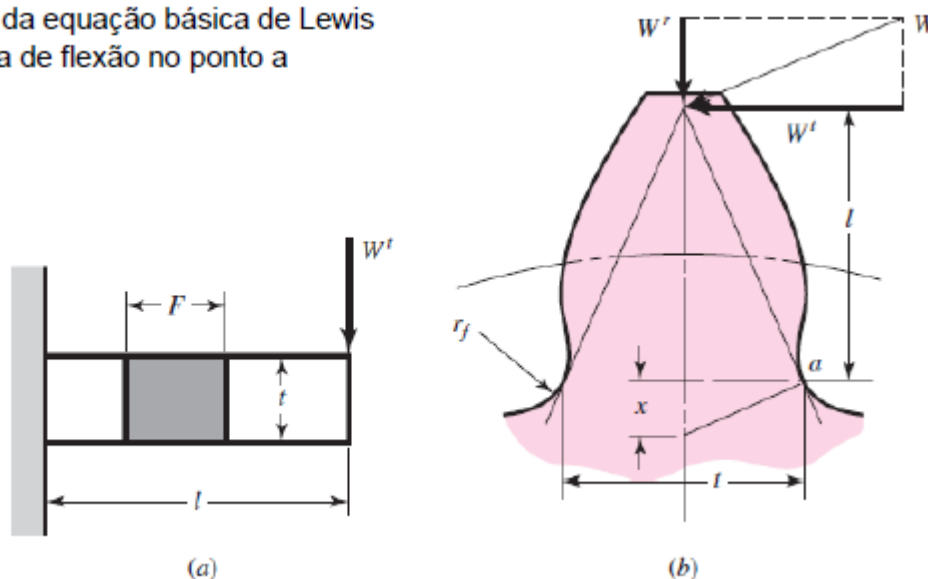
$$\text{Sendo que, } Y = \frac{2 \cdot x}{3 \cdot m}$$

Eq. 2.4

Em concordância com Budynas e Nisbett (2011), essa equação para determinar Y só leva em consideração a flexão do dente e desconsidera a compressão devido à força radial.

Figura 3 – Viga em balanço representando um dente de engrenagem

- a) Demonstração da equação básica de Lewis
 b) Tensão máxima de flexão no ponto a



Fonte: BUDYNAS E NISBETT, 2011.

2.4.EFEITOS DINÂMICOS

De acordo com Budynas e Nisbett (2011), pares de engrenagens se movendo em velocidade alta ou moderada produzem barulho, nessa condição estão presentes os efeitos dinâmicos.

No século XIX, Carl G. Barth escreveu pela primeira vez uma fórmula para o fator de velocidade, sendo V a velocidade do diâmetro primitivo em metros por segundo, a equação 2.5 é conhecida como equação de Barth, a equação 2.6 é modificada para dentes cortados ou fresados.

$$K_v = \frac{3,05 + V}{3,05} \text{ (SI)} \quad \text{Eq. 2.5}$$

(ferro / perfil fundido)

$$K_v = \frac{6,1 + V}{6,1} \text{ (SI)} \quad \text{Eq. 2.6}$$

(perfil cortado / fresado)

Introduzindo o fator de velocidade na equação 2.3 da tensão, tem-se a equação 2.7;

$$\sigma = \frac{K_v \cdot W^t}{F \cdot m \cdot Y} \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 2.7}$$

2.5. DURABILIDADE SUPERFICIAL

Conforme Budynas e Nisbett (2011), a falha nas faces dos dentes são conhecidas como desgaste. Fadiga superficial é conhecida como crateramento e acontece com muitas repetições de tensões

elevadas de contato. Para obter a expressão para a tensão de contato superficial, empregasse a teoria de Hertz. A tensão de contato entre dois cilindros é mostrado na equação 2.8 como;

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot b \cdot l} \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 2.8}$$

sendo: $P_{m\acute{a}x}$ = pressão superficial máxima, (MPa); F = força que comprime os cilindros, (N); l = comprimento dos cilindros, (mm); sendo a semilargura b , (mm) calculada pela equação 2.9;

$$b = \left\{ \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l} \cdot \frac{[(1 - \nu_1^2)/E_1] + [(1 - \nu_2^2)/E_2]}{(1/d_1) + (1/d_2)} \right\}^{1/2} \text{ (mm)} \quad \text{Eq. 2.9}$$

sendo: ν_1 e ν_2 , coeficientes de Poisson; E_1 e E_2 , módulo de elasticidade ou Young, (MPa ou GPa); e d_1 e d_2 ; (mm) são os diâmetros dos dois cilindros em contato.

Recorrendo à notação utilizada em engrenagens, vamos substituir $P_{m\acute{a}x}$ por σ_c , F por $Wt/\cos\phi$, d por $2r$ e l pela largura da face F . Agora, podemos substituir o valor de b da equação 2.9 na equação 2.8 da teoria de Hertziana, tendo-se assim a equação 2.10;

$$\sigma_c^2 = \frac{W^t}{\pi F \cos\phi} \cdot \frac{(1/r_1) + (1/r_2)}{[(1 - \nu_1^2)/E_1] + [(1 - \nu_2^2)/E_2]} \text{ (MPa}^2\text{)} \quad \text{Eq. 2.10}$$

em que r_1 e r_2 são os raios de curvatura nos perfis do dente do pinhão e coroa, (mm); respectivamente no ponto de contato.

Conforme Budynas e Nisbett (2011), a primeira evidência de desgaste ocorre próximo à linha primitiva. Os raios de curvatura dos perfis do dente no ponto primitivo são;

$$r_1 = \frac{d_p \sin\phi}{2} \text{ (mm)} \quad \text{Eq.2.11}$$

e

$$r_2 = \frac{d_g \sin\phi}{2} \text{ (mm)} \quad \text{Eq. 2.12}$$

em que ϕ é o ângulo de pressão, (°); e d_p e d_g são os diâmetros primitivos do pinhão e coroa, (mm); respectivamente.

Na equação 2.10 o denominador do segundo grupo possui quatro constantes elásticas, duas para o pinhão e duas para a coroa. Para tabular os resultados com combinações de materiais de pinhão e coroa, a AGMA define um coeficiente elástico C_p pelo uso da equação 2.13. Com essa simplificação e a adição de um fator de velocidade K_v , a equação da tensão pode ser escrita como mostrado na equação 2.14. O sinal é negativo porque σ_c é uma tensão de compressão;

$$C_p = \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{1 - \nu_P^2}{E_P} + \frac{1 - \nu_G^2}{E_G} \right)} \right]^{1/2} (\sqrt{MPa}) \quad \text{Eq. 2.13}$$

$$\sigma_c = -C_p \left[\frac{K_v W^t}{F \cos \phi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \right]^{1/2} (MPa) \quad \text{Eq. 2.14}$$

2.6. MODELAGEM COMPUTACIONAL E MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Conforme Souza (2001), o *software SolidWorks* usa o ambiente *part* para modelagem, ambiente *assembly* para montagem e ambiente *drawing* para representação bidimensional.

Segundo Verma (2016), o *SolidWorks* foi criado em 1993, pela *SolidWorks Corporation*. Os direitos comerciais foram adquiridos em 1997 pela empresa francesa *Dassault Systèmes*, onde, em 2017 aproximadamente 2 milhões de projetistas, representando mais de 182 mil empresas já utilizavam o programa.

De acordo com Norton (2013), o conceito da análise por elementos finitos (*FEA*) é muito simples, mas os cálculos que o acompanham são muito complexos, sendo que a utilização de *softwares* comerciais torna muito fácil obter resultados de análises pelo *FEA*, mas se o usuário não compreender de forma adequada os resultados existe uma grande possibilidade de ocorrência de resultados equivocados. Assim, torna-se importante que o profissional que ingressa na área de projetos mecânicos deve se especializar na teoria e aplicação do método.

2.7. EQUAÇÕES DE TENSÃO AGMA 2101-D04, 2004

Conforme Nunez (2022), a resistência à flexão nos dentes é um fenômeno de fadiga relacionado à resistência à fratura na região do raio de filete no fundo do dente da engrenagem.

Conforme Nunez (2022), a resistência ao crateramento avalia a vida útil da superfície do flanco e face do dente da engrenagem, devido ao desgaste gerado pelo escorregamento.

2.7.1. TENSÃO DE FLEXÃO AGMA, σ_F

Todos os fundamentos e cálculos para encontrar a tensão de flexão serão usando a norma *AGMA* de referência. A equação 2.15 é usada para encontrar a tensão de flexão;

$$\sigma_F = \frac{F_t \cdot K_O \cdot K_V \cdot K_S \cdot K_H \cdot K_B}{b \cdot m_n \cdot Y_J} (MPa) \quad \text{Eq. 2.15*}$$

2.7.2. TENSÃO DE CONTATO AGMA, σ_H

Todos os fundamentos e cálculos para encontrar a tensão de contato serão usando a norma AGMA de referência. Para o cálculo da tensão de contato deve ser usado a equação 2.16;

$$\sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{F_t \cdot K_O \cdot K_V \cdot K_S \cdot K_H \cdot Z_R}{D_P \cdot b \cdot Z_I}} \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 2.16*}$$

2.8. FATORES COMUNS TANTO PARA TENSÃO DE FLEXÃO E TENSÃO DE CONTATO AGMA, F_t , K_O , K_V , K_S , E K_H

Conforme Nunez (2022), a carga tangencial, F_t ; deve considerar os valores de potência e velocidade com os quais o equipamento será acionado. Assim a base de cálculo pode ser uma das apresentadas na equação 2.17, a velocidade é determinado pela equação 2.18;

$$F_t = \frac{P}{V} = \frac{1000 \cdot T}{r_p} = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot P}{\pi \cdot D_p \cdot \omega} \text{ (N)} \quad \text{Eq. 2.17*} \quad V = \frac{\pi \cdot \omega \cdot D_p}{60000} \text{ (m/s)} \quad \text{Eq.2.18*}$$

Segundo Budynas e Nisbett (2011), o fator de sobrecarga, K_O ; deve considerar todas cargas externas que excederem a carga tangencial nominal.

Segundo Budynas e Nisbett (2011), o fator dinâmico, K_V ; é usado para compensar as imprecisões na fabricação e engrazamento de dentes de engrenagem em operação.

Segundo Budynas e Nisbett (2011), o fator de tamanho, K_S ; depende das alterações das propriedades dos materiais resultantes da geometria e tamanho das peças.

Conforme Budynas e Nisbett (2011), o fator de distribuição de carga, K_H ; considera que o carregamento nem sempre é uniformemente distribuído ao longo da linha de contato da engrenagem. É recomendado quando possível posicionar a engrenagem no centro dos mancais.

2.9. FATORES ESPECÍFICOS PARA TENSÃO À FLEXÃO AGMA, K_B E Y_J

Conforme Budynas e Nisbett (2011), o fator de espessura de borda, K_B , corrige os cálculos de tensão à flexão em engrenagens com borda estreita. Gráfico detalhado conforme o anexo 11.

Segundo Nunez (2022), o fator de geometria Y_J , avalia o raio de filete do fundo do dente, e considera o fator de forma de Lewis modificado e a sua distribuição de carga. Ver anexo 12.

2.10. FATORES ESPECÍFICOS PARA TENSÃO AO CONTATO AGMA, Z_E , Z_R E Z_I

Conforme Nunez (2022), para calcular a tensão de contato, primeiramente se calcula o coeficiente de elasticidade, Z_E . O anexo 9 traz resultados para algumas combinações de materiais.

Conforme Budynas e Nisbett (2011), o fator de condição superficial, Z_R , depende do acabamento da superfície, rebarbação, lapidação, retífica e jateamento por granalha.

Segundo Nunez (2022), o fator geométrico da resistência superficial, Z_I , avalia a tensão de contato de Hertz no flanco do dente. É denominado pela AGMA como fator geométrico de resistência ao crateramento.

2.11. FATOR DE SEGURANÇA AGMA DE FLEXÃO, S_F ; E DE CONTATO, S_H

Segundo Mott (2006), é recomendado que o fator de segurança AGMA de flexão, e o fator de segurança AGMA de contato fique no intervalo de 1 a 1,5. A equação 2.19 é usada para calcular o fator de segurança que garante uma resistência à flexão de projeto, e, a equação 2.20 é usada para calcular o fator de segurança que garante uma resistência ao crateramento de projeto.

$$S_F = \frac{\sigma_{FP}}{\sigma_F} \cdot \frac{Y_N}{Y_\theta \cdot Y_Z} \quad \text{Fator de segurança para resistência de flexão} \quad \text{Eq. 2.19*}$$

$$S_H = \frac{\sigma_{HP}}{\sigma_H} \cdot \frac{Z_N \cdot Z_W}{Y_\theta \cdot Y_Z} \quad \text{Fator de segurança para resistência de crateramento} \quad \text{Eq. 2.20*}$$

2.12. CONSTANTES COMUNS PARA FATOR DE SEGURANÇA DE FLEXÃO E DE CONTATO AGMA, Y_Z E Y_θ

Conforme Budynas e Nisbett (2011), o fator de confiabilidade, Y_Z ; é responsável pelo efeito da distribuição estatística normal das falhas encontradas nos testes de materiais usados para engrenagens.

Segundo Nunez (2022), é usado o fator de temperatura, Y_θ ; de 1,0 quando as engrenagens ou a temperatura do óleo lubrificante opera com temperaturas abaixo de 120°C. Para temperaturas de operação abaixo de 0°C, deve-se fazer uma análise especial. Para temperaturas acima de 120°C, Y_θ deve ser maior que 1,0 mas, isso depende da experiência do engenheiro. Para temperaturas acima de 150° deve-se considerar a perda de dureza e consequentemente a resistência ao crateramento de alguns materiais.

2.13. CONSTANTES ESPECÍFICAS PARA O FATOR DE SEGURANÇA À FLEXÃO AGMA, Y_N E σ_{FP}

Conforme Budynas e Nisbett (2011), as resistências AGMA para fadiga flexional, são baseadas em 10^7 ciclos de carga aplicada num dente unidirecional com 99% de confiabilidade. O propósito dos fatores de ciclos de carga, Y_N ; é modificar a resistência da engrenagem para outras vidas além de 10^7 ciclos. Esses valores são dados no anexo 14. Para 10^7 ciclos $Y_N = 1$.

Conforme Budynas e Nisbett (2011), as tensões à flexão permitidas, σ_{FP} ; para aço, da norma AGMA, são encontrados no anexo 15 e são determinados a partir de testes experimentais. Esses valores são baseados no fator de sobrecarga de 10^7 ciclos de tensão, carga unidirecional e confiabilidade nos testes de 99%. O σ_{FP} é ajustado pelo fator de ciclagem de tensão Y_N .

2.14. CONSTANTES ESPECÍFICAS PARA O FATOR DE SEGURANÇA DE CONTATO AGMA, Z_N , Z_W E σ_{HP}

Conforme Budynas e Nisbett (2011), as resistências AGMA para fadiga de contato, são baseadas em 10^7 ciclos de carga aplicada num dente unidirecional com 99% de confiabilidade. O propósito dos fatores de ciclos de carga, Z_N ; é modificar a resistência da engrenagem para outras vidas além de 10^7 ciclos. Esses valores são dados no anexo 16. Do gráfico para 10^7 ciclos $Z_N = 1$.

Segundo Nunez (2022), o fator de razão de dureza, Z_W , depende do acabamento superficial dos dentes, da dureza superficial dos dentes e da relação de transmissão do pinhão e coroa.

Segundo Nunez (2022), os números de tensão permitidos, σ_{HP} ; para materiais de engrenagem variam de acordo com fatores como composição do material, microestrutura, qualidade do processo de manufatura, tensão residual e tipo de tratamento térmico.

3. METODOLOGIA

Como estratégia metodológica para desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dados de uma ferramenta real e desenvolvido todos os cálculos analíticos. O quadro 1 mostra as etapas na coleta das informações da ferramenta e o fluxograma da figura 4 mostra a descrição dos procedimentos e cálculos a serem seguidos utilizando a norma AGMA 2101-D04, 2004.

Quadro 1 – Coleta de informações da ferramenta.

ETAPAS	DATA INÍCIO	DATA CONCLUSÃO
Escolha da ferramenta do estudo de caso	06/06/2022	20/06/2022
Dados dimensionais da engrenagem	04/07/2022	18/07/2022
Dados de material e trat. térmico da engrenagem	08/08/2022	15/08/2022
Dados de vida útil esperado da engrenagem	22/08/2022	29/08/2022

Fonte: O autor, 2022.

3.1 PREMISSAS DO PROJETO

As premissas para o dimensionamento da engrenagem frontal com sextavado de 13mm foram coletadas na empresa onde o autor desenvolve as ferramentas. A engrenagem em análise faz parte de um *crowfoot*, acessório especial adaptado em uma ferramenta de aperto eletrônica utilizada no aperto de parafusos em locais de difícil acesso.

A engrenagem possui (z_1), 22 dentes, módulo normal (m_n) de 1,5mm e largura de face (b) de 13mm. O diâmetro primitivo (d) é de 33mm, o diâmetro externo [d_e] é de 36mm e o diâmetro interno (d_i) é de 29,5mm. O torque da aplicação (T) é de 28Nm. O material utilizado é o aço AISI 4320, a composição química do material pode ser consultada no manual de aços (GERDAU, 2003).

3.2 DIMENSIONAMENTO

Para o cálculo da tensão de flexão, tensão de contato e seus respectivos fatores de segurança é usado a norma AGMA 2101-D04, 2004. Será apresentado os procedimentos, fórmulas e gráficos aplicáveis a engrenagens de dentes retos.

3.2.1 CARGA TANGENCIAL, F_t

A carga tangencial é calculada com a divisão do torque pelo raio primitivo da engrenagem, os valores de diâmetro primitivo e torque são conhecidos sendo $D_p = 33mm$, e $T = 25Nm$.

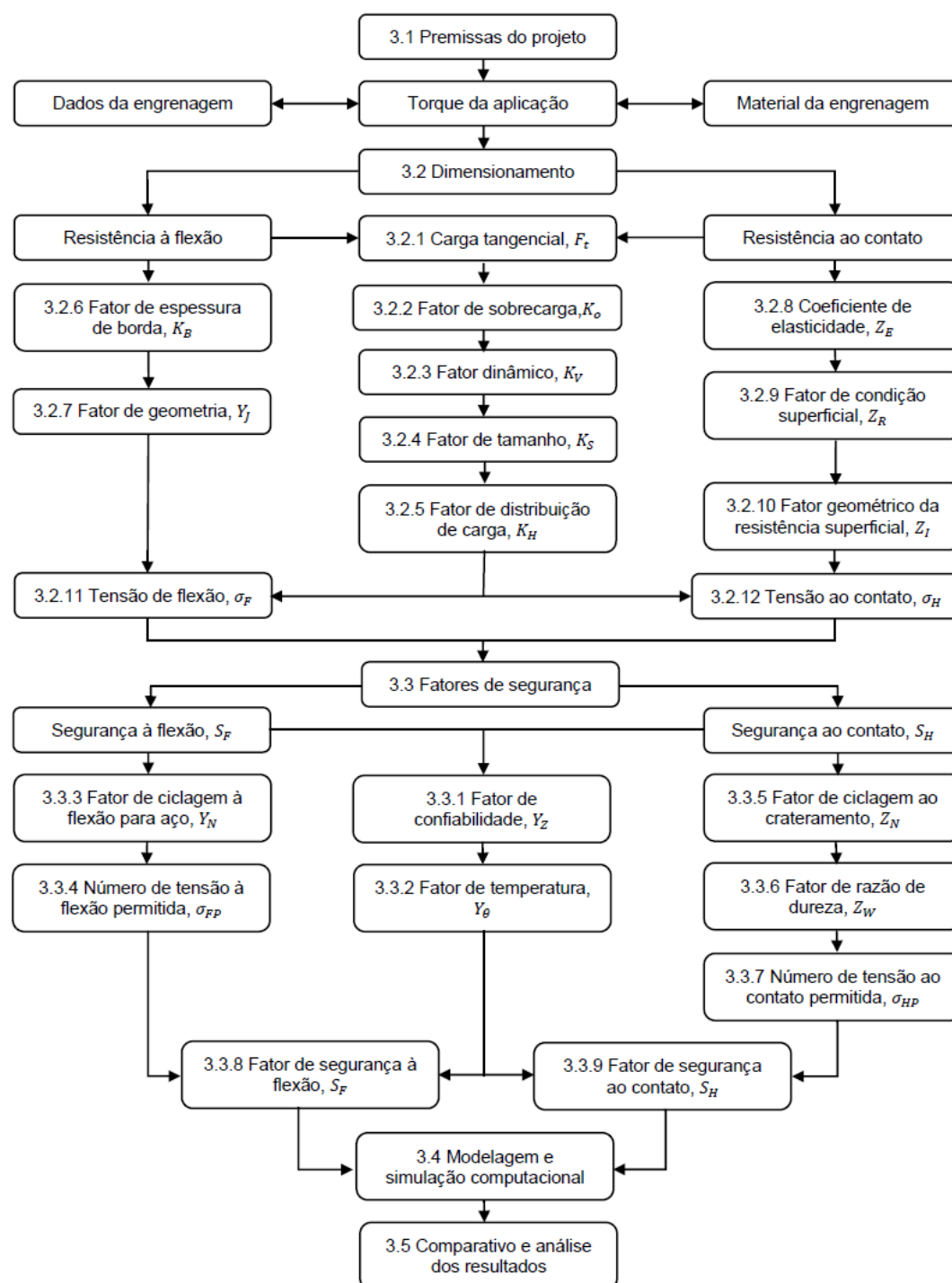
3.2.2 FATOR DE SOBRECARGA, K_o

O fator de sobrecarga K_o , considera os tipos de máquina acionada e os tipos de fonte de alimentação. A seleção do fator de sobrecarga é feito pela tabela 1, cruzando o tipo de máquina acionada com o tipo de fonte de alimentação. Os anexos 1 e 2 trazem informações do tipo de sobrecarga para máquina acionada e para fonte de alimentação respectivamente.

3.2.3 FATOR DINÂMICO, K_V

O fator dinâmico K_V , é para compensar imprecisões na fabricação dos dentes da engrenagem como também avaliar a velocidade de trabalho num determinado projeto. O anexo 4 apresenta uma relação de aplicações com os respectivos níveis de precisão A_V .

Figura 4 – Fluxograma para desenvolvimento dos cálculos.



Fonte: O autor, 2022.

3.2.4 FATOR DE TAMANHO, K_S

O fator de tamanho, K_S , depende do tipo de aço, do tratamento térmico, da camada e dureza da superfície dos dentes, sendo esses fatores controlados o fator de tamanho pode ser $K_S = 1,0$.

3.2.5 FATOR DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA, K_H

O Fator de distribuição de carga, K_H , considera que o carregamento nem sempre é uniformemente distribuído. Deve-se resolver primeiramente K_{Hmc} , K_{Hpf} , K_{Hpm} , K_{Hma} e K_{He} .

O fator de formato da face do dente, K_{Hmc} , para dentes com coroamento mantém a carga na direção mais próxima do centro do dente. Ilustração de coroamento no dente ver anexo 6.

O fator de proporção do pinhão, K_{Hpf} , considera que deflexões maiores ocorrem em engrenagens com larguras de face do dente maiores. Se, $(b/10 \cdot D_P) < 0,05$, manter o valor de 0,05.

O fator de carga de flexão, K_{Hpm} , modifica o fator de proporção do pinhão, K_{Hpf} , porque avalia o posicionamento do pinhão ao longo do eixo, conforme anexo 7.

O fator de alinhamento de engrenamento, K_{Hma} , mensura a influência do desalinhamento do eixo de transmissão e os danos gerados pela rotação das engrenagens, conforme anexo 9.

O fator de ajuste, K_{He} , é usado para alterar o fator de alinhamento de engrenamento. Os valores que devem ser adotados para o fator de ajuste estão no anexo 8.

3.2.6 FATOR DE ESPESSURA DE BORDA, K_B

Para o cálculo do fator de espessura de borda usa-se o gráfico do anexo 11, onde, t_R , é a espessura da borda abaixo do fundo do dente, e $ht = mn + (1,167 \cdot mn)$, é a altura total do dente.

3.2.7 FATOR DE GEOMETRIA, Y_J

Para encontrar o fator de geometria Y_J , se usa o gráfico do anexo 12. No eixo das abscissas marcar o número de dentes da engrenagem para qual o fator geométrico é procurado. No eixo das ordenadas usar a curva que mais se aproxima do número de dentes da engrenagem acoplante.

3.2.8 COEFICIENTE DE ELASTICIDADE, Z_E

O coeficiente de elasticidade, Z_E , para diferentes tipos de materiais é determinado usando a tabela do anexo 9, onde tem-se resultados para algumas combinações de materiais.

3.2.9 FATOR DE CONDIÇÃO SUPERFICIAL, Z_R

O fator de condição superficial, Z_R , depende do acabamento da superfície, rebarbação, lapidação, retífica e jateamento por granalha. Também depende da tensão residual e encruamento do material. Quando se observa um acabamento de superfície apropriado pode-se adotar $Z_R = 1$.

3.2.10 FATOR GEOMÉTRICO DA RESISTÊNCIA SUPERFICIAL, Z_I

O fator geométrico da resistência superficial, Z_I , avalia raios de curvatura do perfil do dente em contato. Esses raios são usados para avaliar a tensão de contato de Hertz no flanco do dente.

3.2.11 TENSÃO À FLEXÃO, σ_F

Os cálculos de tensão de flexão da AGMA considera a vida em fadiga de 10^7 ciclos. A figura 5 mostra uma engrenagem que falhou por flexão no pé do dente.

Figura 5 – Falha por flexão no pé do dente da engrenagem.

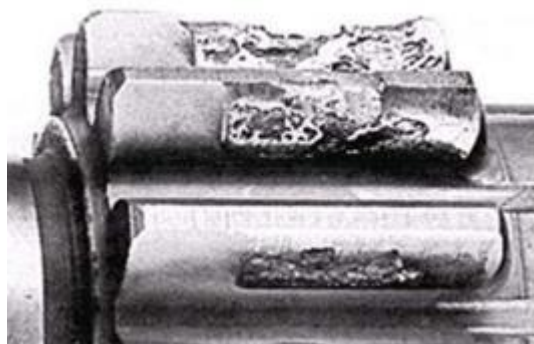


Fonte: <https://blog.acoplastbrasil.com.br>, 2022.

3.2.12 TENSÃO AO CONTATO, σ_H

Os cálculos da tensão de contato da AGMA considera a vida em fadiga de 10^7 ciclos. A figura 6 mostra uma engrenagem que falhou por contato no flanco e face dos dentes.

Figura 6 – Falha por crateramento no flanco e face dos dentes da engrenagem.



Fonte: Guedes, Phillippe R. C., 2018.

3.3 FATORES DE SEGURANÇA À FLEXÃO S_F E AO CONTATO S_H

É recomendado o fator de segurança *AGMA* à flexão, e ao contato no intervalo de 1 a 1,5.

3.3.1 FATOR DE CONFIABILIDADE, Y_Z

O fator de confiabilidade é determinado pelo anexo 13. Ele é responsável pelo efeito da distribuição estatística normal das falhas encontradas nos testes de materiais.

3.3.2 FATOR DE TEMPERATURA, Y_θ

Engrenagens que operam com temperaturas abaixo de 120°C, o fator de temperatura é 1,0.

Temperaturas abaixo de 0°C, fazer uma análise mais detalhada do material. Para temperaturas acima de 120°C, Y_θ deve ser maior que 1,0. Para temperaturas acima de 150°C deve-se considerar a perda de dureza e conseqüentemente a resistência ao crateramento de alguns materiais.

3.3.3 FATOR DE CICLAGEM À FLEXÃO PARA AÇO, Y_N

As resistências *AGMA* para fadiga de flexão são baseadas em 10^7 ciclos com 99% de confiabilidade, sendo nesse caso $Y_N = 1$. Para outras vidas diferentes é modificado o fator de ciclo de carga, Y_N , conforme gráfico do anexo 14.

3.3.4 NÚMERO DE TENSÃO À FLEXÃO PERMITIDA, σ_{FP}

As tensões permitidas para aço são determinadas em testes experimentais e encontrados no anexo 15. São baseadas no fator de sobrecarga de 10^7 ciclos de tensão, carga unidirecional e confiabilidade nos testes de 99%. O σ_{FP} é ajustado pelo fator de ciclagem de tensão Y_N .

3.3.5 FATOR DE CICLAGEM PARA RESISTÊNCIA AO CRATERAMENTO, Z_N

As resistências *AGMA* para fadiga de contato são baseadas em 10^7 ciclos com 99% de confiabilidade, sendo nesse caso $Z_N = 1$. Para outras vidas diferentes é modificado o fator de ciclo de carga, Z_N , conforme gráfico do anexo 16.

3.3.6 FATOR DE RAZÃO DE DUREZA, Z_W

O fator de razão de dureza, Z_W , depende do acabamento superficial das faces dos dentes, da dureza superficial dos dentes e da relação de transmissão do pinhão e coroa. Para o pinhão o valor de $Z_W = 1,0$. Para a coroa pode ser $Z_W = 1,0$ ou conforme o anexo 10.

3.3.7 TENSÃO DE CONTATO PERMITIDA, σ_{HP}

A tensão de contato permitida para materiais de engrenagem variam de acordo com fatores como composição do material, microestrutura, processo de manufatura, tensão residual, tipo de tratamento térmico e práticas de processamento. Para os aços deve ser usado o anexo 17.

3.3.8 FATOR DE SEGURANÇA À FLEXÃO, S_F

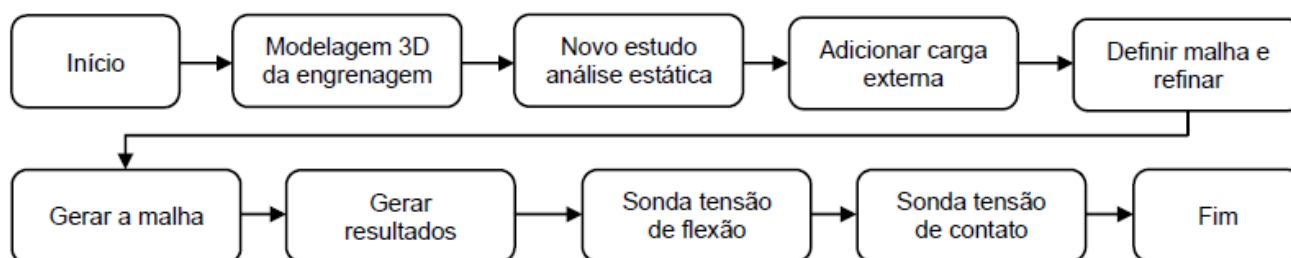
É recomendado que o fator de segurança *AGMA* à flexão fique no intervalo de 1 a 1,5.

3.3.9 FATOR DE SEGURANÇA AO CONTATO, S_H

É recomendado que o fator de segurança *AGMA* ao contato fique no intervalo de 1 a 1,5.

3.4. MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelagem e simulação computacional foi realizada em um computador da empresa Atlas Copco que possui licenças oficiais para o *Solidworks* 2022 SP 2.0, com o suplemento *Simulation* para análises estáticas. O fluxo de trabalho seguiu o fluxograma da figura 5.

Figura 5 – Fluxograma para modelagem e simulação computacional.

Fonte: O autor, 2022.

3.5. COMPARATIVO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comparara-se a tensão máxima de flexão e de contato real, encontrada analiticamente, com a encontrada via software de elementos finitos e os valores admissíveis de projeto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aborda-se o procedimento de cálculo AGMA para uma engrenagem de dentes retos.

Determina-se todas as constantes para os cálculos da tensão de flexão e de contato. Em seguida determina-se todas as constantes para os cálculos dos fatores de segurança à flexão e de contato.

4.1 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento da engrenagem foi realizado pela resistência à flexão na base do dente e pela tensão de contato na face do dente.

4.1.1 CARGA TANGENCIAL, F_t

O diâmetro primitivo e torque são conhecidos, onde $D_p = 33mm$, e $T = 28Nm$. Multiplica-se o torque por $1000mm$ para converter para Nmm , então, utilizando-se a equação 4.1 temos;

$$F_t = \frac{T}{r_p} = \frac{2 \cdot T}{D_p} (N) \qquad F_t = \frac{2 \cdot 28 \cdot 1000}{33} = 1696,97 N \qquad \text{Eq. 4.1}^*$$

4.1.2 FATOR DE SOBRECARGA, K_o

A fonte de alimentação é uma ferramenta eletrônica com motor elétrico. Conforme anexo 1 o tipo de sobrecarga é “uniforme”. O tipo de máquina acionada é uma ferramenta para aperto de parafusos trabalhando em baixa velocidade. Pelo anexo 2 o tipo de sobrecarga pode-se usar “choque leve”. Com

as informações usa-se a tabela 1, faz-se o cruzamento do tipo de máquina acionada com o tipo de fonte de alimentação, o resultado encontrado é $K_O = 1,25$.

Tabela 1 – Seleção do fator de sobrecarga, K_O

Fonte de alimentação	Tipo de máquina acionada			
	Uniforme	Choque leve	Choque moderado	Choque pesado
Uniforme	1,00	1,25	1,50	1,75
Choque leve	1,20	1,40	1,75	2,25
Choque moderado	1,30	1,70	2,00	2,75

Fonte: Mott, Robert L., 2006.

4.1.3 FATOR DINÂMICO K_V

A ferramenta trabalha na velocidade de 1090 rpm, equivale a 1,88 m/s. Do anexo 4 adotase o nível de precisão $A_V = 6$, pois os dentes são fabricados com rugosidade superficial $Ra = 0,8$.

Para o cálculo do fator dinâmico usa-se as equações 4.2, 4.3 e 4.4, tem-se:

$$B = 0,25 \cdot (A_V - 5,0)^{0,667} \quad B = 0,25 \cdot (6 - 5,0)^{0,667} = 0,25 \quad \text{Eq. 4.2*}$$

$$C = 50 + 56 \cdot (1,0 - B) \quad C = 50 + 56 \cdot (1,0 - 0,25) = 92 \quad \text{Eq. 4.3*}$$

$$K_V = \left(\frac{C}{C + \sqrt{196,85 \cdot V_t}} \right)^{-B} \quad K_V = \left(\frac{92}{92 + \sqrt{196,85 \cdot 1,88}} \right)^{-0,25} = 1,05 \quad \text{Eq. 4.4*}$$

4.1.4 FATOR DE TAMANHO, K_S

O fator de tamanho, K_S , é encontrado aplicando a equação 4.5. O fator de forma de Lewis do anexo 5 para 22 dentes é 0,331, assim tem-se $K_S = 0,96$. Adota-se $K_S = 1$.

$$K_S = 0,84325 \cdot (b \cdot m_n \cdot \sqrt{Y})^{0,0535} \quad K_S = 0,84325 \cdot (13 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{0,331})^{0,0535} = 0,96 \quad \text{Eq. 4.5*}$$

4.1.5 FATOR DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA, K_H

O fator de distribuição de carga, K_H , é calculado pela equação 4.8. Primeiramente deve-se calcular os fatores, K_{Hmc} , K_{Hpf} , K_{Hpm} , K_{Hma} e K_{He} . Conforme anexo 6, o fator de formato da face do dente $K_{Hmc} = 1$, para dente sem coroamento. Calcula-se pela equação 4.6 o fator de proporção do pinhão, K_{Hpf} , para $b \leq 25mm$. O fator de carga de flexão, $K_{Hpm} = 1$, pois conforme anexo 7, $(S1/S) < 0,175$, a engrenagem é posicionada no centro dos mancais. O fator de alinhamento, K_{Hma} , é calculado pela equação 4.7, com as constantes do fator de alinhamento A , B e C obtidos do anexo 3 da curva 3,

unidade de precisão. O fator de ajuste, $K_{He} = 1$, pois não é ajustada na montagem e nem lapidada, conforme anexo 8.

$$K_{Hpf} = (b/10 \cdot D_p) - 0,025 \quad K_{Hpf} = 0,01439 \text{ (manter o valor de 0,05)} \quad \text{Eq. 4.6}^*$$

$$K_{Hma} = A + B \cdot (b) + C \cdot (b)^2 \quad K_{Hma} = 0,07408 \quad \text{Eq. 4.7}^*$$

$$K_H = 1 + K_{Hmc}(K_{Hpf} \cdot K_{Hpm} + K_{Hma} \cdot K_{He}) \quad K_H = 1 + 1(0,05 \cdot 1 + 0,07408 \cdot 1) = 1,12 \quad \text{Eq. 4.8}^*$$

4.1.6 FATOR DE ESPESSURA DE BORDA, K_B

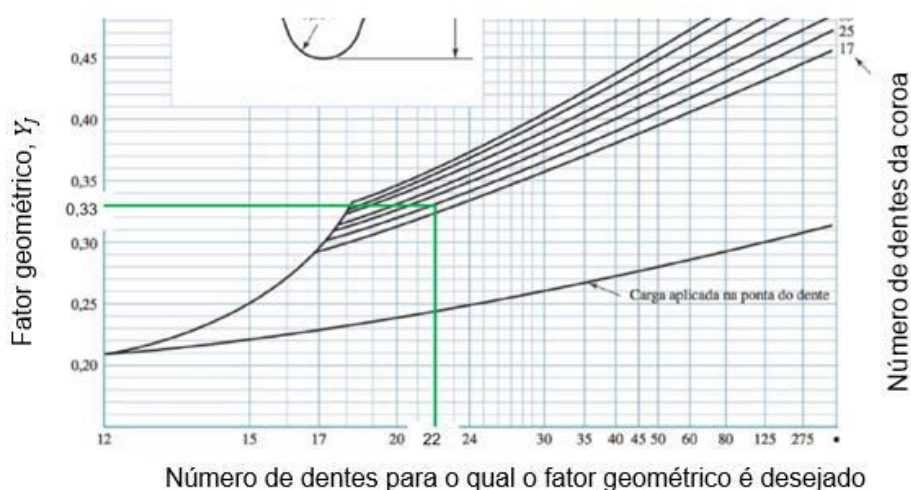
Para calcular o fator de espessura de borda, usa-se a equação 4.9, $ht = 1,5 + (1,167 \cdot 1,5) = 3,25\text{mm}$, então, $K_B = 1,0$ pois conforme o gráfico do anexo 11, $m_B \geq 1,2$.

$$m_B = \frac{t_R}{h_t} = (\text{mm/mm}) \quad m_B = \frac{4,0}{3,25} = 1,23(\text{mm/mm}) \quad \text{Eq. 4.9}^*$$

4.1.7 FATOR DE GEOMETRIA, Y_J

Com o gráfico do anexo 12 determina-se o fator de geometria, $Y_J = 0,33$.

Figura 6 – Determinação do fator de geometria Y_J .



Fonte: Adaptado de Budynas, Richard G., 2011.

4.1.8 COEFICIENTE DE ELASTICIDADE, Z_E

O coeficiente de elasticidade se escolhe usando a tabela do anexo 9. Para um par pinhão e coroa de aço, $Z_E = 191 [N/mm^2]^{0,5}$, Poisson é $\nu = 0,3$. Calculado o valor é de $Z_E = 189,35 [N/mm^2]^{0,5}$

4.1.9 FATOR DE CONDIÇÃO SUPERFICIAL, Z_R

Os dentes da engrenagem possuem rugosidade superficial $Ra = 0,8$; são rebarbados e jateados com microesferas de vidro. Adotou-se $Z_R = 1$.

4.1.10 FATOR GEOMÉTRICO AO CRATERAMENTO, Z_I

O fator geométrico ao crateramento é calculado usando a equação 4.10, assim temos;

$$Z_I = \frac{\cos\phi \cdot \sin\phi}{2 \cdot m_N} \cdot \frac{i}{i+1} \quad Z_I = \frac{\cos 20^\circ \cdot \sin 20^\circ}{2 \cdot 1} \cdot \frac{1}{1+1} = 0,08 \quad \text{Eq. 4.10}^*$$

4.1.11 TENSÃO DE FLEXÃO, σ_F

Para o cálculo da tensão de flexão usa-se a equação 2.15 da AGMA para 10^7 ciclos. Assim;

$$\sigma_F = \frac{1696,97 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1 \cdot 1,12 \cdot 1}{13 \cdot 1,5 \cdot 0,33} = 387,65 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 2.15}^*$$

4.1.12 TENSÃO DE CONTATO, σ_H

Para o cálculo da tensão de contato usa-se a equação 2.16 da AGMA para 10^7 ciclos. Assim:

$$\sigma_H = 189,35 \sqrt{\frac{1696,97 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 1 \cdot 1,12 \cdot 1}{33 \cdot 13 \cdot 0,08}} = 1614,31 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 2.16}^*$$

4.2 FATORES DE SEGURANÇA

O fator de segurança à flexão, S_F , e o fator de segurança ao contato, S_H , devem ficar no intervalo de 1 a 1,5.

4.2.1 FATOR DE CONFIABILIDADE, Y_Z

O fator de confiabilidade adotado é $Y_Z = 1$, com 99% de confiabilidade conforme anexo 13.

4.2.2 FATOR DE TEMPERATURA, Y_θ

$Y_\theta = 1$, temperatura de trabalho abaixo de 120°C .

4.2.3 FATOR DE CICLAGEM À FLEXÃO PARA AÇO, Y_N

Para aço cementado e ciclagem de $5 \cdot 10^5$ ciclos usa-se a equação do anexo 14 a seguir;

$$Y_N = 6,1514 \cdot n_L^{-0,1192} \quad Y_N = 6,1514 \cdot (5 \cdot 10^5)^{-0,1192} = 1,2872 \quad \text{Eq. 4.11}^*$$

4.2.4 TENSÃO DE FLEXÃO PERMITIDA, σ_{FP}

A tensão de flexão permitida é encontrado no anexo 15.

$$\sigma_{FP} = 450,0 \text{ MPa}$$

4.2.5 FATOR DE CICLAGEM DE TENSÃO PARA RESISTÊNCIA AO CRATERAMENTO, Z_N

Para aço cementado e ciclagem de $5 \cdot 10^5$ ciclos usa-se a equação do anexo 16 a seguir;

$$Z_N = 2,466 \cdot n_L^{-0,056} \quad Z_N = 2,466 \cdot (5 \cdot 10^5)^{-0,056} = 1,1826 \quad \text{Eq. 4.12}^*$$

4.2.6 FATOR DE RAZÃO DE DUREZA, Z_W

Para o pinhão, $Z_W = 1$.

4.2.7 TENSÃO DE CONTATO PERMITIDA, σ_{HP}

$\sigma_{HP} = 1550 \text{ MPa}$, de acordo com o anexo 17.

4.2.8 FATOR DE SEGURANÇA À FLEXÃO, S_F

A equação 2.19 é usada para calcular o fator de segurança à flexão.

$$S_F = \frac{450,0}{372,15} \cdot \frac{1,2872}{1 \cdot 1} = 1,56 \quad \text{Eq. 2.19}^*$$

4.2.9 FATOR DE SEGURANÇA AO CONTATO, S_H

A equação 2.20 é usada para calcular o fator de segurança ao contato.

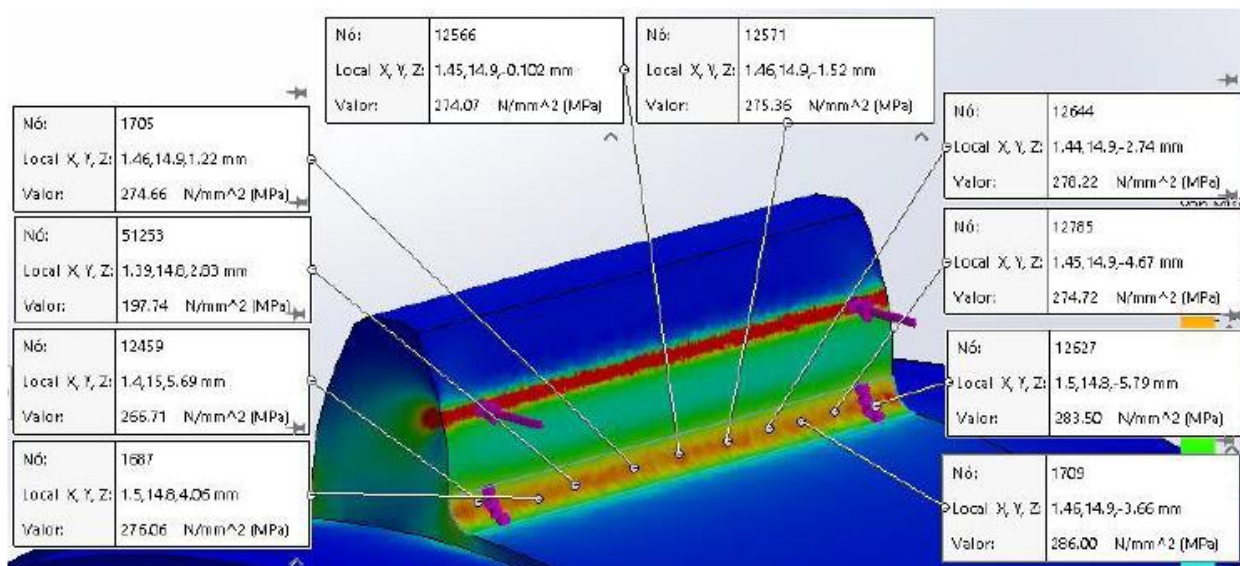
$$S_H = \frac{1550}{1581,70} \cdot \frac{1,1826 \cdot 1}{1 \cdot 1} = 1,16 \quad \text{Eq. 2.20}^*$$

4.3. SIMULAÇÃO EM SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Utilizando o *software Solidworks*, foi realizado a simulação para verificar a tensão máxima de flexão no pé do dente e tensão máxima de contato no flanco do dente. O primeiro valor analisado é a tensão de flexão no pé do dente, onde após a leitura de pontos na região do raio do fundo do dente a média é de $\sigma_F = 268,70 \text{ MPa}$, conforme resultado exibido na figura 7.

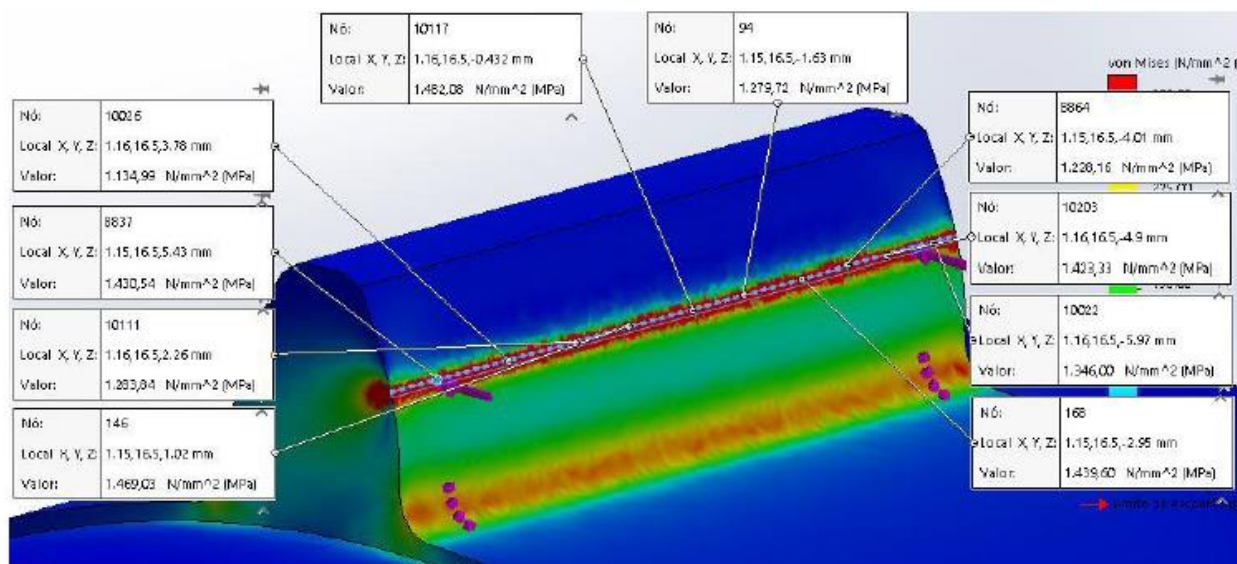
Na sequência analisou-se a tensão de contato no flanco do dente, onde após a leitura de pontos na região do diâmetro primitivo a média encontrada é de $\sigma_H = 1351,73 \text{ MPa}$, conforme resultado exibido na figura 8.

Figura 7 – Posicionamento da sonda para tensão de flexão no pé do dente.



Fonte: O autor, 2022.

Figura 8 – Posicionamento da sonda para tensão de contato no flanco do dente.



Fonte: O autor, 2022.

No quadro 2 apresenta-se os resultados encontrados através dos cálculos analíticos e os resultados encontrados através da simulação computacional. Observa-se que na simulação computacional foi feita a análise estática e não foram considerados na tensão de flexão os fatores, K_O , K_V , K_S , K_H e K_B .

Da mesma maneira não foram considerados na tensão de contato os fatores K_O , K_V , K_S , K_H e Z_R . As duas formas de análise são eficientes, porém com a simulação computacional na análise de uma engrenagem o tempo e a margem de erro são reduzidos drasticamente, mas vale a ressalva que são métodos que se complementam.

Quadro 2 – Comparação de resultados do cálculo analítico e da simulação computacional

Tensão de flexão	Resultados	Tensão de contato	Resultados
Cálculo analítico AGMA $\sigma_F = \frac{F_t \cdot K_O \cdot K_V \cdot K_S \cdot K_H \cdot K_B}{b \cdot m_n \cdot Y_j} \text{ (MPa)}$	387,65 MPa	Cálculo analítico AGMA $\sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{F_t \cdot K_O \cdot K_V \cdot K_S \cdot K_H \cdot Z_R}{D_P \cdot b \cdot Z_I}} \text{ (MPa)}$	1614,31 MPa
Cálculo analítico $\sigma_F = \frac{F_t}{b \cdot m_n \cdot Y_j} \text{ (MPa)}$	263,71 MPa	$\sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{F_t}{D_P \cdot b \cdot Z_I}} \text{ (MPa)}$	1331,46 MPa
Média simulação computacional	268,70 MPa	Média simulação computacional	1351,73 MPa
% analítico x simulação	+1,89%	% analítico x simulação	+1,52%

Fonte: O autor, 2022.

5. CONCLUSÃO

O objetivo principal de calcular a fadiga da engrenagem utilizando a norma *ANSI/AGMA 2101-D04* e a realização da simulação no *software SolidWorks* a fim de comparar os resultados dos cálculos analíticos com os resultados da simulação computacional foi alcançado e comparado.

No método analítico muitas vezes as análises são simplificadas e idealizadas através de ensaios devido à alta complexidade matemática de se analisar componentes complexos, entretanto é indispensável a utilização dos métodos analíticos a fim de obter-se resultados de acordo com as normas técnicas Brasileiras e Internacionais.

Os cálculos analíticos usando a norma *ANSI/AGMA 2101-D04* para unidades no SI, apresenta-se precisa e fácil de ser usada para cálculos à fadiga de tensão de flexão e tensão de contato, além de ser muito divulgada nas pesquisas científicas.

Os resultados obtidos no *software SolidWorks* como complemento do método analítico traz vantagens significativas, como por exemplo, a análise de geometrias complexas em tempo reduzido e com alta precisão. Também podemos ressaltar a vantagem da modelagem do *SolidWorks* de ser importado para outros *softwares* de simulação computacional como o *ANSYS*, *ABACUS* e outros disponíveis no mercado.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram usados dados reais de uma ferramenta conhecida pelo autor. Foram desenvolvidos os cálculos analíticos da engrenagem usando a norma

ANSI/AGMA para dentes retos, e comparou-se com resultados obtidos no *software SolidWorks* através da simulação computacional.

Comprovou-se que os resultados obtidos entre os dois métodos, de uma forma geral tem cenários semelhantes, e o uso de um ou outro método são eficientes no que se refere a obtenção dos resultados de tensão de flexão e contato. Os resultados encontrados nos dois métodos de análise apresentam diferenças pequenas, onde para a tensão de flexão a diferença encontrada de 1,89% é menor no cálculo analítico, e para a tensão de contato a diferença encontrada de 1,52% é menor no cálculo analítico. A diferença entre o cálculo analítico e a simulação computacional não comprometem o dimensionamento da engrenagem, pois os valores encontrados ainda ficam dentro do fator de segurança entre 1,0 e 1,5 (MOTT, 2006).

Para futuros estudos e análises, a sugestão é analisar em outros *softwares* de simulação computacional com módulos específicos para a análise de engrenagem, onde se tem a disponibilidade da seleção dos fatores concentradores de tensão de flexão e os fatores concentradores de tensão de contato, não disponíveis no *SolidWorks*.

REFERÊNCIAS

- ANSI/AGMA 2101-D04. Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, USA, 2004.
- BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. Elementos de Máquinas de Shigley. 8º ed., Porto Alegre, Amgh, 2011.
- COLLINS, J. A. Projeto mecânico de elementos de máquinas. 2º ed., Rio de Janeiro, LTC, 2019.
- JUVINALL, R. C. Fundamentos do projeto de componentes de máquinas. 4º ed., Rio de Janeiro, LTC, 2013.
- GERDAU, Manual de produtos Gerdau, São Paulo, 2003.
- MAZZO, N. Engrenagens cilíndricas: da concepção à fabricação. 1º ed., Blucher, 2013.
- MELCONIAN, S. Elementos de máquinas. 9º ed., São Paulo, Érica, 2009.
- MOTT, R. L. Projeto de elementos de máquinas. 4º ed., São Paulo, Pearson, 2006.
- NORTON, R. L. Projeto de máquinas. 4º ed., Porto Alegre, Bookman, 2013.
- NUNEZ, D. L. Análise da resistência à flexão e ao crateramento de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e helicoidais: avaliação da eficácia da norma ANSI/AGMA 2101-D04. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Universidade de Tecnologia Federal. Paraná, 2022.
- SOUZA, A. C. et al. SolidWorks – Guia prático para modelagem sólida. Florianópolis, Visual Books Editora, 2001.
- VERMA, G., WEBER, M. Solidworks 2014 Back Book. 4º ed. New York, CAD/CAM/CAE Works, 2016.
- WEINFURTER, D. V. Customização para acrescentar atributos em sólidos do SolidWorks. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciências da Computação). Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2003.
- KUROWSKI, P. M. Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013. SDCpublicatios, 2013.
- ALVES FILHO, Avelino: Elementos Finitos, A base da Tecnologia CAE/ 6 ed./Editora Erica. São Paulo – 2013.
- AZEVEDO, A. F. M. Método dos elementos finitos. 1º ed., Porto, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – LISTA DE SIMBOLOS.

b é a largura da face, mm ;	S_1 : é o desloc. pinhão em relação ao centro, mm ;
D_P é o diâmetro primitivo da engrenagem, mm ;	S_F é o fator de segurança AGMA à flexão;
E_1 e E_2 é o módulo de elast. pinhão e coroa, Gpa ;	S_H é o fator de segurança AGMA ao contato;
F_t é a carga tangencial transmitida, N ;	T é o torque transmitido, $N \cdot m$;
h_t é a altura total do dente, mm ;	t_R é a esp. borda abaixo do fundo do dente, mm ;
i = relação de transmissão;	V é a velocidade linear, m/s ;
K_B é o fator de espessura de aro;	Y_J é o fator geométrico para resistência à flexão;
K_H é o fator de distribuição de carga;	Y_N é o fator de ciclagem para resistência à flexão;
K_{He} é o fator de ajuste.	Y_Z é o fator de confiabilidade;
K_{Hma} é o fator de alinhamento de engrenamento;	Y_θ é o fator de temperatura.
K_{Hmc} é o fator de formato da face do dente;	Z_E é o coeficiente de elasticidade, $[N/mm^2]^{0.5}$;
K_{Hpf} é o fator de proporção do pinhão;	Z_R é o fator de condição de superfície;
K_{Hpm} é o fator de carga de deflexão;	Z_I é o fator geométrico p/ res. ao crateramento;
K_O é o fator de sobrecarga;	Z_N fator ciclagem de tensão ao crateramento;
K_V é o fator dinâmico;	Z_W fator de razão de dureza ao crateramento;
K_S é o fator de tamanho;	σ_F é a tensão de flexão, N/mm^2 ;
m é o módulo, mm ;	σ_H é a tensão de contato, N/mm^2 ;
m_n é o módulo métrico normal, mm ;	σ_{FP} é a tensão à flexão permitida AGMA, N/mm^2 ;
m_t é o módulo métrico transversal, mm ;	σ_{HP} tensão de contato permitido AGMA, N/mm^2 ;
$m_n = m_t \cdot \cos\beta$; p/ engre. de dente helicoidal;	β é o ângulo helicoidal do dente;
N é o número de dentes;	ω é a rotação da engrenagem, rpm ;
P é a potência transmitida, W ;	ν_1 e ν_2 é o coef. de <i>Poisson</i> do pinhão e coroa;
r_p é o raio primitivo da engrenagem, mm ;	ϕ , é o ângulo de pressão da engrenagem;
S : é a abertura entre mancais, mm ;	

ANEXOS

Anexo 1 – Tipo de sobrecarga para fonte de alimentação.

Fonte de alimentação	
Uniforme	Motor elétrico, turbina a gás com velocidade constante.
Choque leve	Turbina hidráulica, impulsor de velocidade variável.
Choque moderado	Motor de combustão multi cilindros.

Fonte: Mott, Robert L., 2006.

Anexo 2 – Tipo de sobrecarga para máquina acionada.

Máquina acionada	
Uniforme	Geradores contínuos, rebobinadores de papel e filme, mecanismo de computador
Choque leve	Bombas e ventiladores centrífugos de baixa velocidade, misturadores, transportadores sob carregamento uniforme, bombas de deslocamento positivo, processamento de tiras metálicas.
Choque moderado	Bomba centrífuga de alta velocidade, bomba e compressor alternativo, transportador de carga pesada, betoneira, máquina têxtil, moedor de carne, serras, elevadores de caçamba.
Choque pesado	Triturador de rocha, acionadores de prensas, perfuradoras, máquinas puncionadeiras, pulverizador, moinho, moinhos martelo, peneira vibratória, tambor rotativo.

Fonte: Adaptado de Mott, Robert L., 2006.

Anexo 3 – Valores das constantes do fator de alinhamento.

Curve	A	B	C
Curve 1 Open gearing	$2.47 \cdot 10^{-1}$	$0.657 \cdot 10^{-3}$	$-1.186 \cdot 10^{-7}$
Curve 2 Commercial enclosed gear units	$1.27 \cdot 10^{-1}$	$0.622 \cdot 10^{-3}$	$-1.69 \cdot 10^{-7}$
Curve 3 Precision enclosed gear units	$0.675 \cdot 10^{-1}$	$0.504 \cdot 10^{-3}$	$-1.44 \cdot 10^{-7}$
Curve 4 Extra precision enclosed gear units	$0.380 \cdot 10^{-1}$	$0.402 \cdot 10^{-3}$	$-1.27 \cdot 10^{-7}$

Fonte: ANSI/AGMA 2101-D04, 2004.

Anexo 4 – Máquinas e suas aplicações x nível de precisão (A_v).

Aplicação	A_v	Aplicação	A_v
Acionador do tambor do misturador de cimento	A11	Furadeira de baixa potência	A9
Forno de cimento	A11	Máquina têxtil	A8
Colheitadeira / Selecionador de milho	A10	Máquina de lavar roupas	A8
Guindaste / Bomba centrífuga	A10	Prensa de impressão	A7
Prensa de esmagamento	A10	Mecanismo de computador	A6
Esteira de mineração	A10	Transmissão de automóveis	A6
Serra industrial	A10	Acionador de antena de radar	A5
Máquina de fabricação de papel	A9	Acionador de propulsor marítimo	A5
Mecanismos do medidor de gás	A9	Acionador de motor de avião	A4
Fresadora	A9	Giroscópio	A2

Fonte: Mott, Robert L., 2006.

Anexo 5 – Fator de forma de Lewis para engrenagens com ângulo de pressão de 20°.

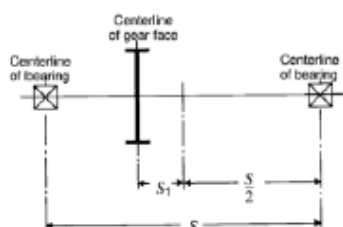
N° de dentes	Y	N° de dentes	Y	N° de dentes	Y
20	0.322	21	0.328	22	0.331

Fonte: Adaptado de Budynas e Nisbett, 2011.

Anexo 6 – Coroamento da face dos dentes.

$$K_{Hmc} \begin{cases} 1,0 & \text{para dente sem coroamento} \\ 0,8 & \text{para dente coroadado ou com correção de desvio} \end{cases}$$

Fonte: Nunez D. L. 2022.

Anexo 7 – Definição das distâncias S e S_1 .

$$K_{Hpm} \begin{cases} 1,0 & \text{para pinhão montado com } (S_1/S) < 0,175 \\ 1,1 & \text{para pinhão montado com } (S_1/S) \geq 0,175 \end{cases}$$

Fonte: ANSI/AGMA 2101-D04, 2004.

Anexo 8 – Fator de ajuste K_{He} .

$$K_{He} = \begin{cases} 0,8 & \text{quando a engrenagem é ajustada na montagem} \\ 0,8 & \text{quando a compatibilidade da engrenagem é melhorada lapidando} \\ 1,0 & \text{para todos os outros casos} \end{cases}$$

Fonte: ANSI/AGMA 2101-D04, 2004.

Anexo 9 – Coeficiente de elasticidade para combinação de alguns materiais.

Material do pinhão	Módulo de elasticidade do pinhão $E_p, (MPa)$	Material da coroa e módulo de elasticidade $E_g, (MPa)$					
		Aço ($2 \cdot 10^5$)	Ferro maleável ($1,7 \cdot 10^5$)	Ferro nodular ($1,7 \cdot 10^5$)	Ferro fundido ($1,5 \cdot 10^5$)	Bronze alumínio ($1,2 \cdot 10^5$)	Bronze estanho ($1,1 \cdot 10^5$)
Aço	($2 \cdot 10^5$)	(191)	(181)	(179)	(174)	(162)	(158)

Razão de Poisson = 0,30

Fonte: Adaptado de (Budynas, Richard G., 2011).

Anexo 10 – Fator de razão de dureza Z_W .

$$Z_W = 1,0 + A \cdot (i - 1,0)$$

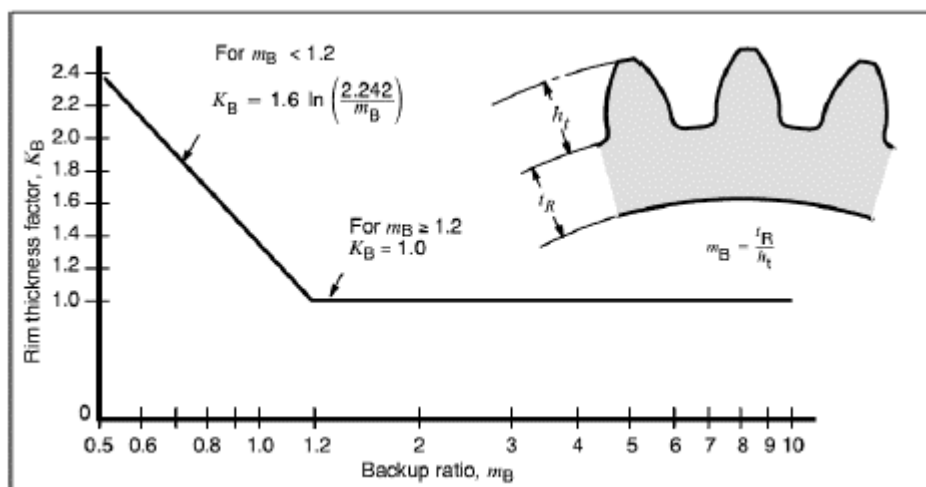
$$\text{Se } \frac{H_{B1}}{H_{B2}} < 1,2 \text{ então } A = 0$$

$$\text{Se } 1,2 \leq \frac{H_{B1}}{H_{B2}} \leq 1,7 \text{ então } A = 0,00898 \cdot \left(\frac{H_{B1}}{H_{B2}} \right) - 0,00829$$

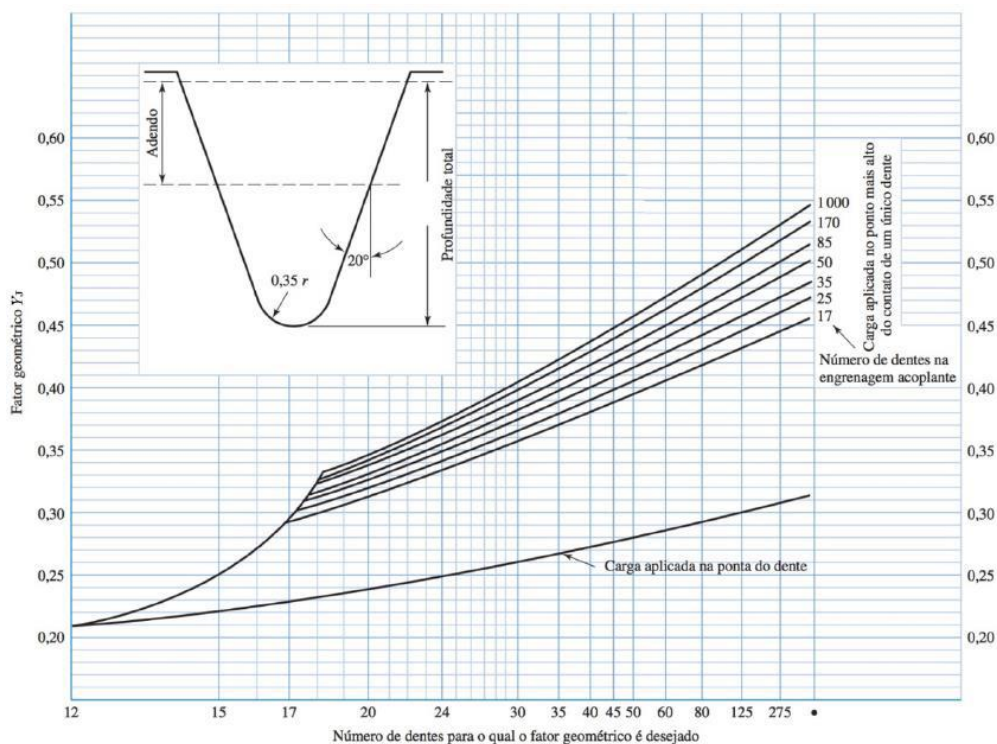
$$\text{Se } \frac{H_{B1}}{H_{B2}} > 1,7 \text{ então } A = 0,00698$$

Onde, H_{B1} e H_{B2} são a dureza Brinell do pinhão e da coroa, e, i é a relação de transmissão.

Fonte: ANSI/AGMA 2101-D04, 2004.

Anexo 11 – Fator de espessura de borda.

Fonte: ANSI/AGMA 2101-D04, 2004.

Anexo 12 – Fator geométrico para engrenagem com ângulo de pressão 20°.

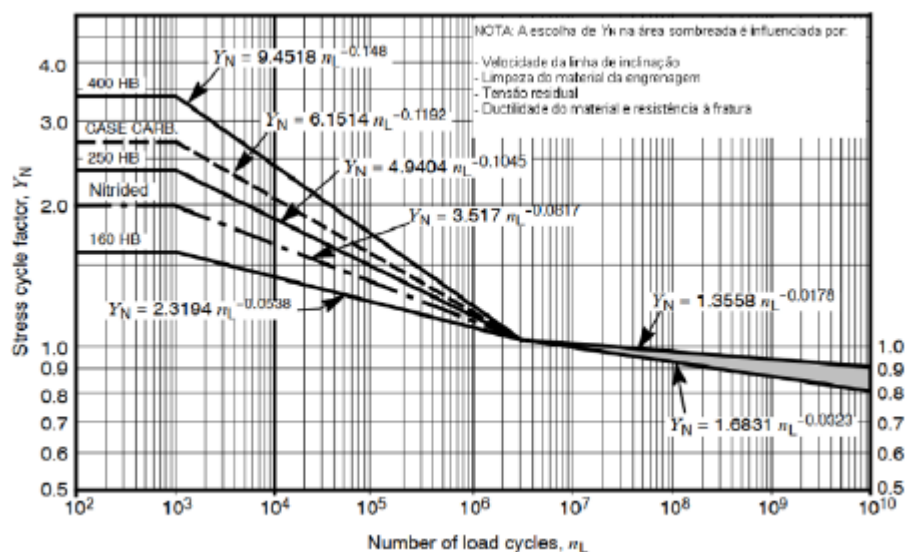
Fonte: Budynas, Richard G., 2011.

Anexo 13 – Fatores de confiabilidade.

Confiabilidade	0,50	0,90	0,99	0,999	0,9999
(Y_2)	0,70	0,85	1,00	1,25	1,50

Fonte: Adaptado de Budynas, Richard G., 2011.

Anexo 14 – Fator de ciclagem de tensão Y_N para a resistência de flexão sob carregamento repetido.



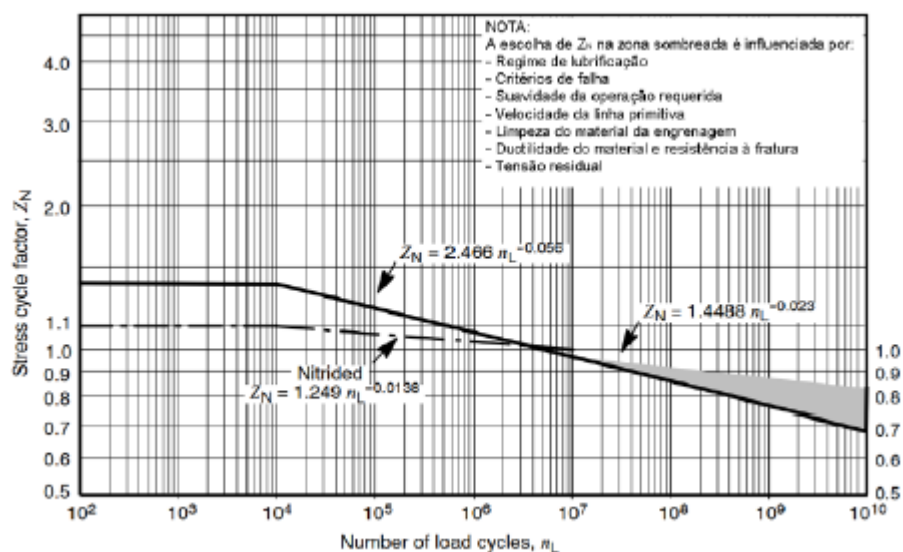
Fonte: Budynas, Richard G., 2011.

Anexo 15 – Número de tensão à flexão permitida.

Material designation	Heat treatment	Minimum surface hardness ¹⁾	Allowable bending stress number ¹⁾ , $\sigma_{FP} (N/mm^2)$		
			Grade 1	Grade 2	Grade 3
Steel ¹⁾	Carburized & hardened ¹⁾	See ANSI/AGMA 2101-D04	380	450 or 485 ⁶⁾	515

¹⁾ See ANSI/AGMA 2101-D04

Fonte: Adaptado de Budynas, Richard G., 2011.

Anexo 16 – Fator de ciclagem de tensão para a resistência ao crateramento.

Fonte: Budynas, Richard G., 2011.

Anexo 17 – Número de tensão permitida ao contato, para aço.

Material designation	Heat treatment	Minimum surface hardness ¹⁾	Allowable contact stress number ¹⁾ , σ_{HP} (N/mm ²)		
			Grade 1	Grade 2	Grade 3
Steel ¹⁾	Carburized & hardened ¹⁾	See ANSI/AGMA 2101-D04	1240	1550	1895

¹⁾ See ANSI/AGMA 2101-D04

Fonte: Adaptado de Budynas, Richard G., 2011.

Capítulo 2



10.37423/230808059

EMULADOR FOTOVOLTAICO DE BAIXO CUSTO, A PARTIR DE UM CONVERSOR BUCK, EMPREGANDO REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO COM MPPT P E O

Adjeferson Custodio Gomes

Universidade Estadual de Santa Cruz

LUIZ CARLOS CARDOZO MAGNO

Universidade Estadual de Santa Cruz

Taís Mirele Fernandes da Silva

Universidade Estadual de Santa Cruz

PATRICK LAURIENT CARDOSO SILVA

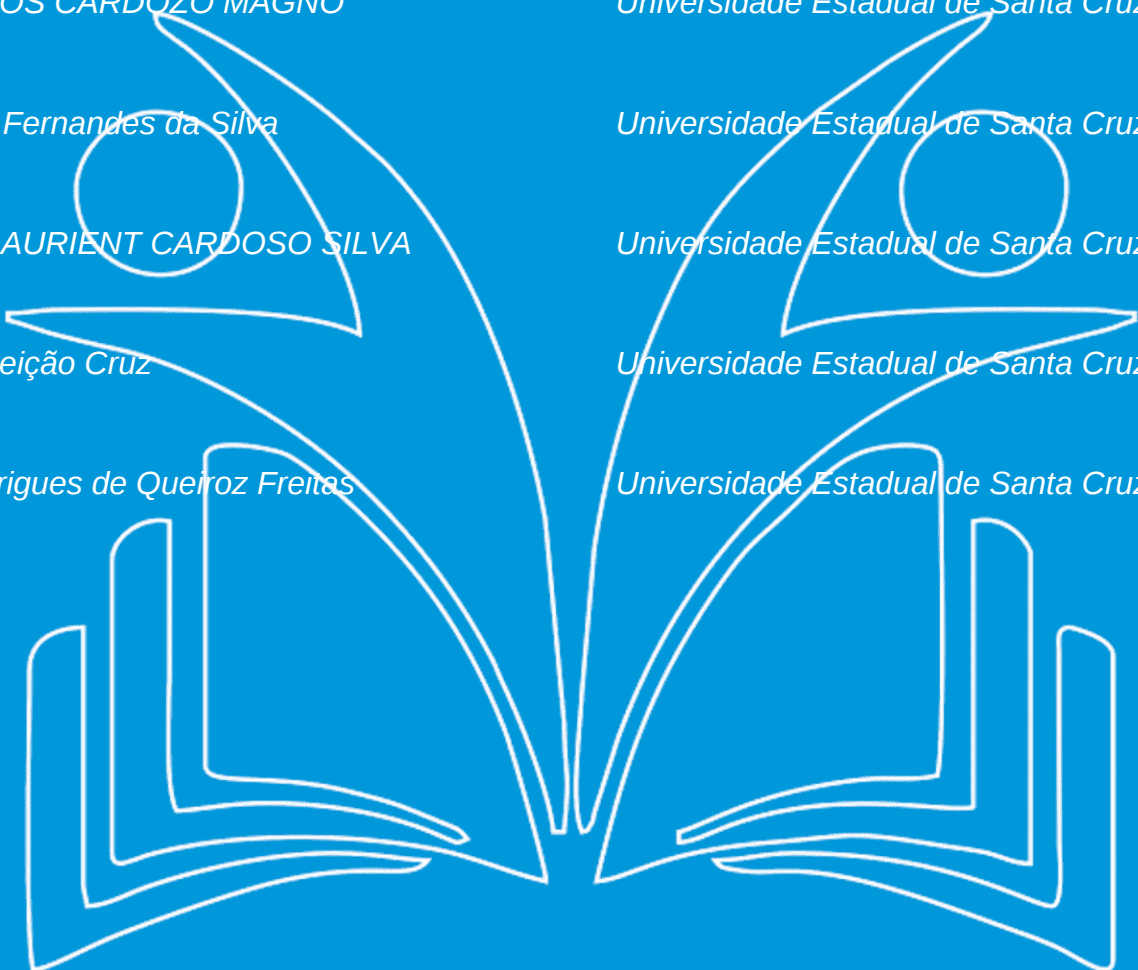
Universidade Estadual de Santa Cruz

Fábio Conceição Cruz

Universidade Estadual de Santa Cruz

Rafael Rodrigues de Queiroz Freitas

Universidade Estadual de Santa Cruz



Resumo: Apesar de ser considerado um tipo de energia limpa, os custos de implantação de um sistema fotovoltaico (PV), ainda são altos. No meio acadêmico, em função da escassez de recursos financeiros para desenvolvimento de pesquisas, impulsionou a busca por modelos físicos capazes de emular fidedignamente as características de uma planta real de sistemas fotovoltaicos. Sabe-se, que a principal característica de um sistema PV é que sua saída depende da irradiância solar e temperatura. Desta maneira o controle destas variáveis tornam as pesquisas, dispendiosas. Neste sentido, surge a proposta de um dispositivo que emule as características de um painel fotovoltaico com controle sobre as variáveis de entrada, irradiância e temperatura e otimize a potência gerada pelo mesmo. O emulador é composto por um conversor CC/CC Buck, controlado para seguir a referência imposta pelo modelo matemático, através do algoritmo Perturbe&Observe (P&O). Para validar a proposta, é comparado o painel PV do software *Simulink/Matlab*[®] com o emulador utilizando dois tipos de compensadores: compensador PI, mais utilizado na literatura e o controlador ótimo LQR, proposto no trabalho.

Palavras-chave: Emulador de painel fotovoltaico, PI, LQR, Controle do conversor Buck, MPPT P&O.

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia penere e limpa, impulsionou investimentos financeiros e desenvolvimento de políticas energéticas sustentáveis na última década (Moçambique, 2012). Dentre as fontes alternativas de energia, as que mais se destacaram foram a eólica e a solar (Villalva et al., 2009).

A energia eólica tem o entrave de necessitar de áreas relativamente extensas para implantação dos parques de geração e um estudo detalhado do comportamento das correntes de ar na região que será implementando o projeto.

A energia solar vem se destacando por ser viável em praticamente todos os lugares que chegue irradiância solar e sua implantação ser mais simples, podendo ser instalada em pequenas áreas, por exemplo, o telhado de uma residência. No entanto, para converter a energia solar em energia elétrica, é necessário o uso de painéis fotovoltaicos.

Painéis fotovoltaicos reais, possuem curva característica $V \times I$ dependente de fatores externos como: Irradiância e temperatura. Desta maneira, pesquisas em geração de energia fotovoltaica (Cantor, 2017), juntamente com o desenvolvimento de métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT) para melhorar a eficiência do sistema, tornam-se dispendiosos, pois nem sempre há irradiância suficiente, (De Brito et al., 2013), (Gomes, 2014). Além disso nebulosidade é um fator que afeta instantaneamente a irradiância incidente no painel (Cantor, 2017).

Assim, propõem-se um dispositivo capaz de emular o comportamento de arranjos fotovoltaicos, reproduzindo as características reais de corrente e tensão de saída, determinadas pelas entradas de temperatura e irradiância. Para isso, utiliza-se a modelagem matemática dos módulos fotovoltaicos para reproduzir as curvas características.

O método mais utilizado para projeto de emuladores de módulos fotovoltaicos, é através do conversor CC/CC Buck controlado por corrente através de um compensador proporcional e integral (*Proportional and Integral* - PI) seguindo a referência de corrente imposta pelo modelo matemático (Chariag and Sbita, 2017), (Cupertino, 2014) e (Netalianne, 2016).

Neste sentido, esse trabalho propõe um novo projeto de controle para o emulador, baseando-se no controle ótimo por realimentação de estados, através do Regulador Linear Quadrático (*Linear Quadratic Regulator* - LQR).

Ao utilizar o LQR, espera-se obter tempo de resposta e oscilações inferiores ao emulador baseado no compensador PI. Dessa maneira, pode-se obter melhor eficiência no MPPT e consequentemente, maximização na geração do sistema fotovoltaico (PV).

2 MODELAGEM DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Na literatura, existem diversos modelos para representação da curva $V \times I$ de placas fotovoltaicas, (Casaro and Martins, 2008), (Chariag and Sbita, 2017), (Cupertino, 2014), (Netalianne, 2016) e (De Soto et al., 2006).

O modelo mais utilizado é mostrado na Figura 1, chamado de modelo de 1 (um) diodo, possui resistência, R_S , que representa as perdas internas e quedas de tensão, e R_{SH} , dependente de características da junção semicondutora, (Beltrão, 2008).

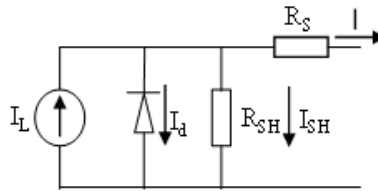


Figura 1. Circuito equivalente da célula solar.

A Equação (1), representa as correntes do circuito mostrado na Figura 1,

$$I = I_L - I_d - I_{SH} \quad (1)$$

onde a corrente no diodo, I_d , é modelada usando a Equação de Shockley para um diodo ideal (Chariag and Sbita, 2017) e determinada pela Equação (2).

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{q(V + I R_S)}{A k T_c}} - 1 \right] \quad (2)$$

A corrente no resistor shunt é determinada através da Equação (3).

$$I_{SH} = \frac{V + I R_S}{R_{SH}} \quad (3)$$

Substituindo as Equações (2) e (3) a Equação (1) pode ser reescrita conforme a Equação (4).

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V + I R_S)}{A k T_c}} - 1 \right] - \frac{V + I R_S}{R_{SH}} \quad (4)$$

Onde,

I_L – Fotocorrente (A);

I_0 – Corrente reversa de saturação do diodo (A);

q – Carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}V$);

V – É a tensão de saída da célula PV (V);

I – Corrente de saída da célula PV (A);

A – Fator de idealidade do diodo;

k – Constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \left(\frac{J}{K}\right)$);

T_c – Temperatura da célula (K);

R_S – Resistência série da célula (Ω);

R_{SH} – Resistência paralela da célula (Ω).

A Equação (4), determina a corrente, I , em uma célula fotovoltaica para determinada tensão de saída V , onde I_L é a fotocorrente e é determinada pela Equação 5.

$$I_L = \left[I_{cstc} + \alpha (T_c - T_r) \right] \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (5)$$

Onde,

I_{cstc} – corrente de curto-circuito em condição de teste padrão (A);

α – coeficiente de temperatura da tensão (V/°C);

G – Irradiância solar (W/m²);

G_{ref} – Irradiância solar de referência (W/m²);

T_r – Temperatura de referência (298K).

A corrente de curto, I_{cstc} , e α , o coeficiente de temperatura da tensão, são fornecidas pelo fabricante do painel solar em sua folha de dados para uma irradiância solar de referência, G_{ref} .

I_0 é a corrrrente reversa de saturação do diodo e é determinada pela Equação (6).

$$I_0 = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} \quad (6)$$

I_{rr} – Corrente de saturação reversa de referência;

E_g – Energia da banda proibida (1.12V).

Aplicando a condição de circuito aberto, $I = 0$ e $V = V_{oc}$, à Equação (1), considerando as condições de Referência, onde $T = T_r$, é possível obter a Equação (7), conforme demonstrado em (Casaro and Martins, 2008),

$$I_{rr} = \frac{I_{cstc} - \left(\frac{V_{oc}}{R_p} \right)}{e^{\left(\frac{qV_{oc}}{A.k.T_r} \right)} - 1} \quad (7)$$

onde, V_{oc} , é tensão de circuito aberto do painel solar e é fornecida na folha de dados do fabricante.

Observa-se que ainda existe duas incógnitas no sistema para solução da Equação (4), R_s e R_{SH} . Em (Villalva et al., 2009) é proposto um algoritmo iterativo para determinar estes parâmetros.

Para determinar os valores de R_s e R_{SH} , o modelo do painel fotovoltaico escolhido é o *YL170P-23b*, da marca *Yingli Energy*. As características do modelo são representadas na Tabela 1.

Tabela 1. Catálogo do painel solar, YL170P-23b.

Parâmetros	Condição de teste padrão (STC) (1000W/m ² 25°C)
Máxima Potência [W]	170
Tensão de MPPT [V]	23
Corrente de MPPT [A]	7.4
Tensão V_{oc} [V]	29
Corrente de I_{sc} [A]	8.1
Coeficiente β [A/°C]	0.003611
Coeficiente α [V/°C]	-0.00329

Baseando-se no modelo escolhido e através do algoritmo iterativo para determinar R_s e R_{SH} , os respectivos valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do circuito equivalente

$R_s (\Omega)$	$R_{SH} (\Omega)$
0.0059	32.3887

De posse de R_s e R_{SH} , e levando-se em consideração que a Equação (4) é não linear, utiliza-se o método iterativo de Newton-Raphson, mostrado na Equação (8) para resolver a Equação (4),

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (8)$$

onde,

$$(I) = I_L - I - I_0 \left(e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{A.k.T_c} \right)} - 1 \right) \dots - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (9)$$

$$f'(I) = -1 - I_0 e^{\left(\frac{V + IR_S}{AkT_c}\right)} \left(\frac{qR_S}{AkT_c} \right) - \frac{R_S}{R_{SH}} \quad (10)$$

Aplicando as Equações (9) e (10) ao método iterativo representado pela Equação (8), obtêm-se a solução da Equação (4).

3 EMULADOR

Assim como foi obtido os parâmetros necessários para solução da Equação 4, por meio da folha de dados indicada e da metodologia proposta, pode-se realizar a modelagem matemática de qualquer outro modelo de painel fotovoltaico.

De posse dos valores de R_S e R_{SH} , aplicando valores de entrada dados pela irradiância, G , e temperatura do módulo, T , na Equação (4), resolvida pelo método proposto, é possível obter um valor de referência de corrente. Dessa maneira, o emulador deve ser capaz de seguir a corrente de referência imposta. Para isso, utiliza-se um conversor, CC/CC Buck, de modo que um controlador o fará seguir a referência de corrente imposta pelo modelo, como mostrado na Figura 2, onde I^* , é a corrente de referência.

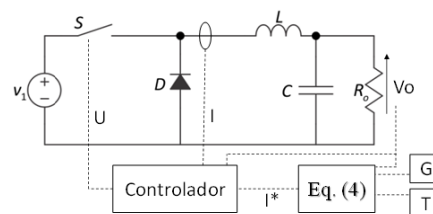


Figura 2. Esquema para controle de corrente.

Um arranjo de 4 painéis fotovoltaicos, ligados em série, resulta nos parâmetros mostrados na Tabela 3. Os parâmetros são obtidos resolvendo a Equação (4), considerando quatro painéis em série, $N_s = 4$, para obter a curva $T \times C$ e $T \times P$ e extrair o ponto de máxima potência (MPP), a partir dos dados do módulo fotovoltaico representado pela Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros para arranjo de 4 painéis fotovoltaicos ($G=1000 \text{ W/m}^2$ e $T=25^\circ\text{C}$).

N_s	$P_{mp} \text{ (W)}$	$V_{mp} \text{ (V)}$	$I_{mp} \text{ (A)}$
4	680	92	7.39

4 CONVERSOR CC/CC BUCK

A depender do arranjo fotovoltaico proposto, uma ampla faixa de valores de tensão deverá ser percorrida. Para satisfazer essa faixa de valores de tensão será proposto um conversor Buck que é capaz de reduzir a tensão de entrada, (Barbi and Martins, 2000).

O conversor é alimentado por uma tensão de entrada, $V_{in} = 180V$. O projeto do conversor foi concebido considerando uma tensão média de saída de $V_{out} = V_{mp} = 92V$. A Tabela 4, mostra as especificações para o projeto do conversor.

Tabela 4. Especificações do conversor CC/CC Buck.

F_s	Δi_L	Δv_C
20kHz	5%	0.5%

Onde,

F_s – Frequência de chaveamento do conversor;

Δi_L – Ripple de corrente no indutor;

Δv_C – Ripple de tensão no capacitor.

É possível obter os valores de indutância e capacitância do conversor pelas Equações (11) e (12).

$$L = \frac{D(V_{in} - V_{out})}{F_s \Delta i_L} \quad (11)$$

$$C \approx \frac{\Delta i_L}{8F_s \Delta v_C} \quad (12)$$

Onde,

L – Indutância do conversor;

C – Capacitância do conversor.

O ganho no conversor Buck é dado por:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D \quad (13)$$

D – Razão cíclica de chaveamento do conversor.

A Tabela 5 mostra os parâmetros obtidos para dimensionamento do conversor CC/CC Buck.

Tabela 5. Parâmetros do conversor CC/CC

$L[mH]$	$C[\mu H]$	D
180.9	250	0.511

Em razão do conversor Buck ter características não lineares que podem ser representadas por modelos lineares, serão considerados dois modelos lineares, ou seja, um para cada estado do interruptor. Através da linearização, objetiva-se modelar matematicamente o conversor para aplicação das estratégias de controle. A primeira linearização do conversor é obtida com a modelagem em espaço de estados médio que é representada pela Equação (14), (Barbi, 2015),

$$\begin{aligned} \dot{\bar{X}} = & [A_1 D + A_2 (1-D)] \bar{X} + \dots \\ & + [B_1 D + B_2 (1-D)] U \end{aligned} \quad (14)$$

onde A_1 e A_2 são obtidos com a chave ligada e desligada, respectivamente. O análogo acontece com B_1 e B_2 .

A segunda linearização é obtida aplicando pequenas variações nos estados, $\tilde{x}$, e na razão cíclica de entrada, $\tilde{d}$, em torno do ponto de operação, Equação (15).

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} = & [A_1 D + A_2 (1-D)] \tilde{x} + \dots \\ & \dots + (A_1 - A_2) X \tilde{d} + (B_1 - B_2) U \tilde{d} \end{aligned} \quad (15)$$

A Equação (15), descreve o comportamento do conversor para pequenas variações em torno do ponto de operação, definidas por $\tilde{x}$ e $\tilde{d}$ (Barbi, 2015). Para um conversor ideal, tem-se a Equação (16).

$$\begin{aligned} A_1 = A_2 = & \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_0} \end{bmatrix} \\ B_2 = & 0 \\ B_1 = & \begin{bmatrix} \frac{V_1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

R_L e R_0 , é a resistência do indutor e a resistência de carga, respectivamente. Assim o modelo linearizado em torno do ponto de operação utilizado é dado pela Equação (18).

$$\dot{\tilde{x}} = [A_1] \tilde{x} + [B_1] U \tilde{d} \quad (17)$$

Se $A = A_1$ e $B = B_1$

$$\dot{\tilde{x}} = [A]\tilde{x} + [BU]\tilde{d} \quad (18)$$

A Equação (18) representa o modelo que será utilizado no projeto do controlador.

5 CONTROLADOR

5.1 CONTROLADOR PI

A função de transferência para a malha de corrente do conversor Buck ideal que relaciona pequenas variações na razão cíclica e pequenas variações na corrente de saída, (Barbi, 2015), é representado pela Equação (19).

$$\frac{\tilde{i}_L}{\tilde{d}} = -\frac{V_0}{sL} \quad (19)$$

A partir da Equação (19) projetou-se o controlador PI para obter uma resposta rápida e com erro nulo em regime permanente. Os parâmetros do controlador PI, ajustado, são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros do controlador PI

K_p	K_i
0.4737	15

5.2 CONTROLADOR LQR

Em projetos de controlador por espaço de estados, para garantir o erro nulo, é necessário um estado definido pela integral do erro. Para isso um novo estado será adicionado ao espaço de estados do conversor representado pela Equação (18).

A equação de erro do sistema é representada pela Equação (20),

$$e = r - y = r - Cx \quad (20)$$

onde, r , é o sinal de referência, y , o sinal de saída e, C , a matriz de saída. Assim a integral é calculada através da Equação (21).

$$\int e dt = \int r - Cx \quad (21)$$

Da Equação (18), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_C \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + [BU]\tilde{d} \quad (22)$$

O modelo aumentado, ou espaço extendido do sistema é representando pela Equação (23) e $u = \tilde{d}$.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{i}_L \\ \int edt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \\ \int edt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BU \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (23)$$

O controlador LQR é projetado para evitar a saturação do controlador em condições distantes do ponto de MPPT. O projeto deve minimizar o índice de desempenho calculado através da Equação (24):

$$J = \int (y^T Q y + u^T R u) dt \quad (24)$$

sendo que R é escalar e a matriz Q é definida por:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

A matriz Q_1 representa o peso definido para o erro do estado referente à corrente no indutor, Q_2 é o peso para o erro na tensão no capacitor, Q_3 é o peso para o erro na integral do erro. Os valores presentes na matriz Q são definidos de modo que o controlador priorize os estados referentes à corrente no indutor e a integral do erro. Quanto maior o valor de R, menos energia o controlador gastará no esforço de controle, reduzindo a chance de saturação do controlador. A Tabela 7 mostra os valores definidos.

Tabela 7. Parâmetros do projeto de controlador LQR.

Q_1	Q_2	Q_3	R
600	5	18000	10000

O problema de otimização, dado pela Equação (21), é resolvido com apoio da função *LQR* presente na ferramenta *Control System Toolbox* no software Matlab. Foram obtidos os seguintes ganhos para os estados.

Tabela 8. Ganhos referentes aos estados.

K_1	K_2	K_3
7.07	-0.0045	-22.36

Onde K_1 , K_2 e K_3 , são os ganhos referentes aos estados da corrente no indutor, tensão no capacitor e integral o erro, respectivamente. Esses ganhos são os ganhos ótimos para minimizar o índice de desempenho definido na Equação (24) e na Tabela 8.

6 CONTROLADOR PI VS. CONTROLADOR LQR

6.1. VARIAÇÃO DE IRRADIÂNCIA

Percebe-se, que em função da simplicidade da implementação do controlador PI, sua utilização é mais comum (Chariag and Sbita, 2017), (Netalianne, 2016) e (De Soto et al., 2006). Em contra partida, observa-se a utilização da estrutura em avanço e atraso (Cupertino, 2014), porém essas estruturas não levam em consideração a saturação do controlador. Como alternativa, este artigo propõe a estratégia de controle baseado no controlador ótimo, LQR.

Neste sentido, é realizada a comparação entre a resposta dos controladores PI e LQR, a fim de selecionar a resposta mais rápida. A Figura 3 e a Figura 4, mostram as respostas dos controladores PI e LQR respectivamente, referente às variações no sinal de referência realizadas de acordo com a Tabela 9.

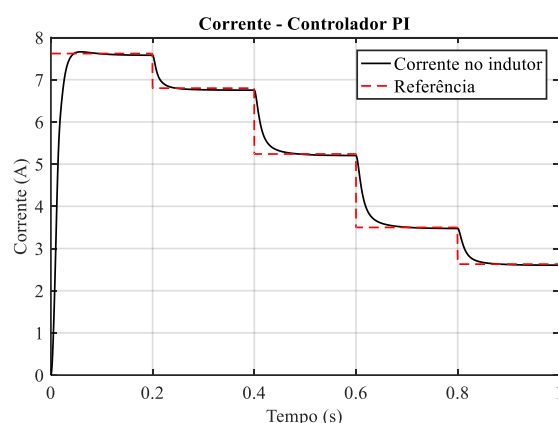


Figura 3. Resposta do emulador, controlado por compensador PI, à variação na irradiância.

Tabela 9. Variação de irradiância no tempo

Tempo (s)	0	0.2	0.4	0.6	0.8
Irradiância (W/m ²)	1000	800	600	400	300

Observando a Figura 3 e a Figura 4, percebe-se que a resposta do emulador controlado pelo LQR possui tempo inferior à resposta do emulador controlado pelo compensador PI. Embora o LQR apresente overshoot maior, o tempo de acomodação da resposta em relação as variações da irradiância é menor que no PI. Essa característica torna-se mais evidente ao analisar a resposta de ambos controladores e a referência do sistema (irradiância).

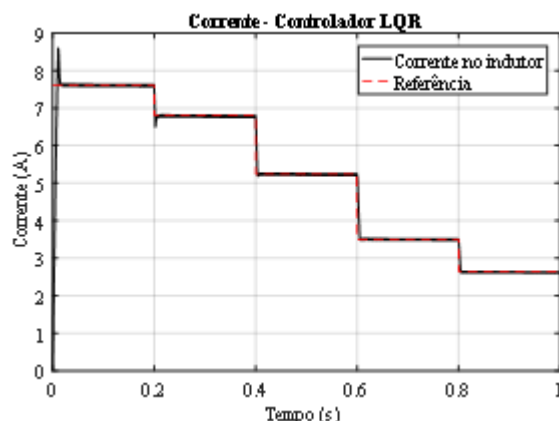


Figura 4. Resposta do emulador, controlado por LQR, à variação na irradiância.

6.2. VARIAÇÃO DE CARGA.

Da mesma forma que o módulo fotovoltaico, o emulador também está sujeito a diferentes valores de cargas. Dessa maneira, é necessário analisar a resposta dos controladores quanto às variações em seus pontos de operação. Na Figura 5 e Figura 6, analisou-se a resposta do controlador LQR e PI, para as variações de carga listada na Tabela 10.

Tabela 10. Variação de carga no tempo.

Tempo (s)	0	0.2	0.4	0.6
Resistência (Ω)	6.215	8.28	12.43	24.86
% da carga nominal	200	166	100	50

Ao analisar a resposta do controlador PI as variações de carga, Figura 5, percebe-se que a resposta dinâmica é mais lenta comparada ao LQR, Figura 6, mas o PI apresenta a vantagem de ter uma resposta dinâmica suave e sem overshoot nos momentos de variações bruscas de carga.

A resposta do LQR apresenta menor tempo de acomodação, mas nas variações bruscas de carga, por exemplo, no instante de 0.6s, onde a carga praticamente dobrou em relação ao instante de 0.4s, o LQR apresentou resposta rápida, acompanhada de overshoot.

Neste sentido, é importante salientar que, para sistemas onde pretende-se grande velocidade de acomodação, mas não se preocupa com a suavidade da resposta, o LQR é uma boa opção, mas em sistemas que são sensíveis a respostas com overshoot, o compensador PI seria mais indicado.

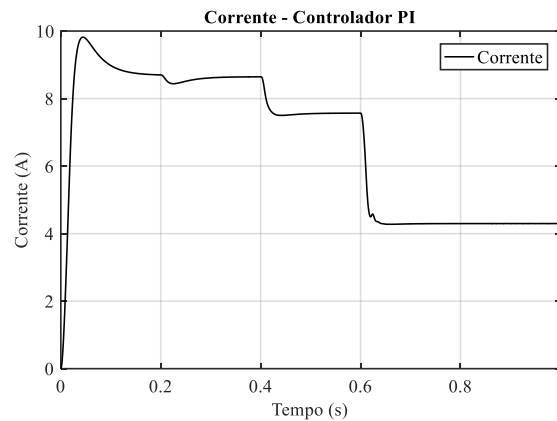


Figura 5. Resposta do emulador controlado por PI à variação na resistência de carga.

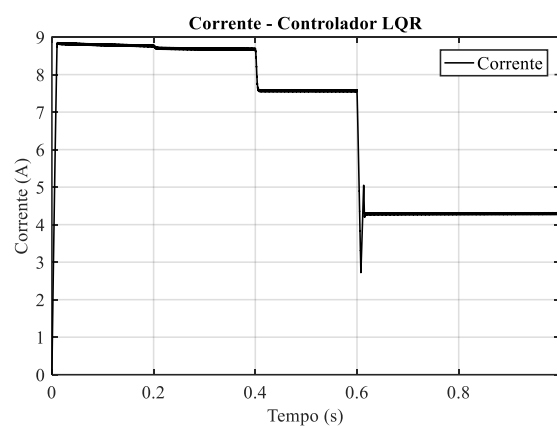


Figura 6. Resposta do emulador controlado por LQR à variação na resistência de carga

Para esse trabalho, não existe a preocupação quanto a suavidade da resposta e sim com o tempo, portanto, para a proposta em estudo o LQR se destaca pela sua velocidade na resposta as variações.

7 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validação do modelo utilizado, é necessária a comparação com um modelo consolidado. Neste sentido, utiliza-se o modelo de placa fotovoltaica presente no ambiente *Simulink/Matlab*® como referência. Para obtenção da curva característica, $T \times C$. Utiliza-se também, a metodologia proposta por (Cupertino, 2014), que aplica uma rampa de tensão à saída do emulador e obtem-se os valores de corrente referente a cada tensão aplicada.

A Figura 7 e a Figura 8, mostram as curvas $V \times I$ e $V \times P$, respectivamente, em condições diferentes de irradiância, em comparação com as curvas de referência.

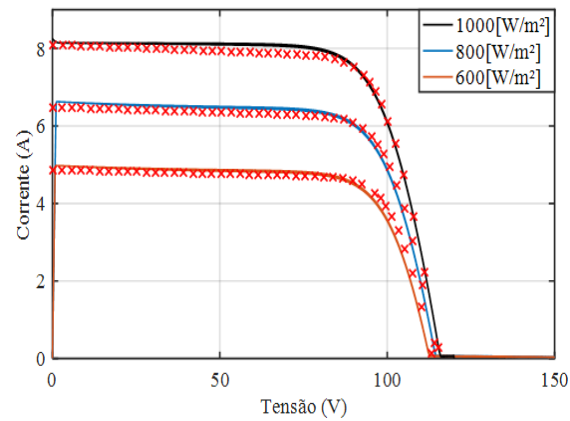


Figura 7. Curva V-I do modelo adotado, linha contínua, e do Simulink, em cruz, para $G=1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, $G=800 \text{ [W/m}^2\text{]}$ e $G=600 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

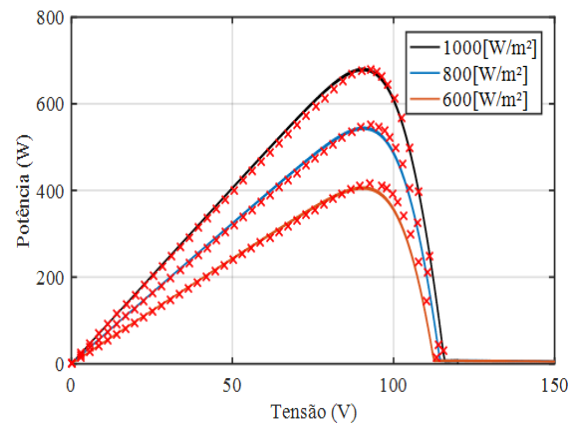


Figura 8. Curva P-V do modelo adotado, linha contínua, e do Simulink, em cruz, para $G=1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, $G=800 \text{ [W/m}^2\text{]}$ e $G=600 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

A comparação entre os modelos representados na Figura 7 e Figura 8, mostram que o modelo utilizado está bem próximo à referência, principalmente na região próxima aos MPP.

A Figura 9 e Figura 10, mostram as curvas características em diferentes temperaturas. Observa-se que na região próxima ao ponto de máxima potência (Maximum Power Point – MPP) e também para uma tensão maior que a tensão de MPP, há grande precisão.

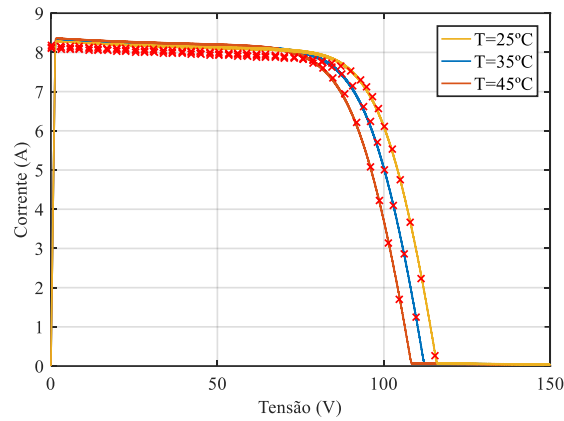


Figura 9. Curva I-V do modelo adotado e do Simulink, em cruz, para T=25°C, T=35°C, T=45°C.

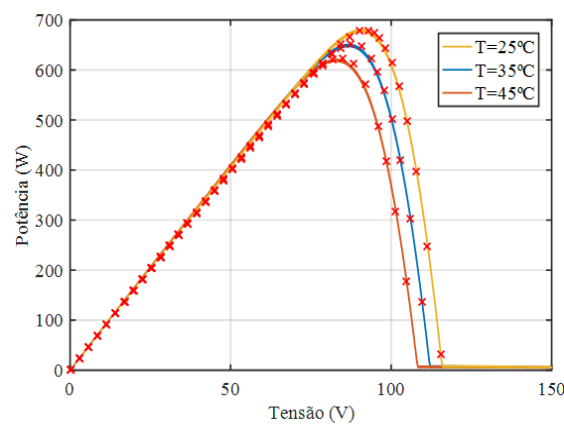


Figura 10. Curva P-V do modelo adotado e do Simulink, em cruz, para T=25°C, T=35°C, T=45°C.

O Erro Absoluto Médio (MAE), é utilizado para realizar a medida do erro entre a corrente de referência e a corrente observada no emulador. A medida do erro é obtida pela Equação 26:

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - x_i|}{n} = \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (27)$$

Onde,

y_i - Corrente de referência;

x_i - Corrente observada pelo modelo adotado;

n - Número de amostras.

A Tabelas 11 e Tabela 12, representam o MAE, das curvas da Figura 7 e Figura 9.

Tabela 11. Erro absoluto médio presente nas medidas mostradas na Figura 7.

Irradiância (W/m^2 - $T=25^\circ\text{C}$)	MAE
1000	0.0868
800	0.1481
600	0.2034

Tabela 12. Erro absoluto médio presente nas medidas mostradas na Figura 9.

Temperatura ($^\circ\text{C}$ - $G=1000\text{W/m}^2$)	MAE
25	0.1459
35	0.1357
45	0.1422

A Tabelas 11 e Tabela 12, mostram que o erro absoluto médio mantém-se dentro de uma faixa satisfatória, mesmo com variações na irradiância e temperatura.

8 MPPT APLICADO AO MODELO PROPOSTO

As técnicas MPPT, são utilizadas para extrair a máxima potência que uma placa fotovoltaica pode gerar. Dessa forma, o emulador fotovoltaico projetado surge como excelente plataforma para testes de estratégias de MPPT, pois nele é possível ter controle sobre a tensão e corrente de saída a partir de valores definidos de irradiância e temperatura.

Para analisar a resposta do emulador à variações na corrente e tensão em busca do MPP, utilizou-se a técnica de MPPT conhecida por Perturbe&Observe (P&O), por apresentar boa resposta e ser mais difundida. O rastreador MPPT P&O, tem como característica oscilar a potência de saída em torno do ponto de máxima.

A Figura 11 e Figura 12, representam a resposta do emulador controlado pelo algoritmo de MPPT P&O, diante das variações na irradiância de entrada indicadas na Tabela 13.

Tabela 13. Variação na Irradiância para teste de MPPT.

Tempo (s)	0	3	6
Irradiância (W/m^2)	1000	800	600

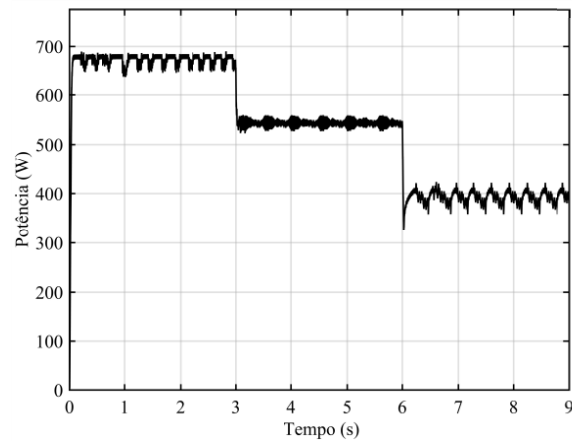


Figura 11. Resposta MPPT do emulador controlado por LQR.

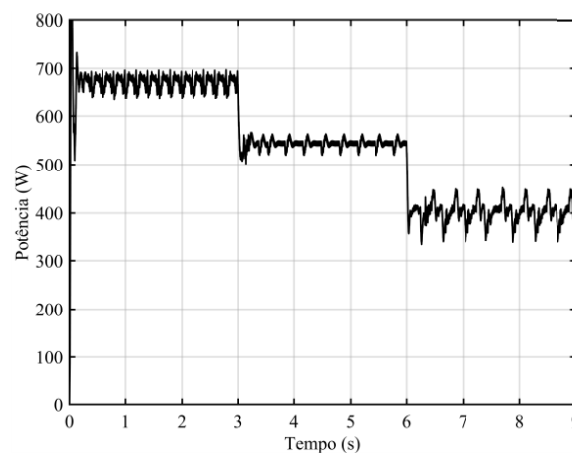


Figura 12. Resposta MPPT do Emulador controlado por compensador PI.

Apesar do algoritmo de MPPT utilizado nos compensadores PI e LQR ser o mesmo, a resposta do sistema apresentou-se com velocidade e suavidade diferente. Ao analisar a Figura 11, percebe-se que a resposta do sistema controlado pelo LQR apresenta maior velocidade e em termos de potência, as variações em regime permanente são menos bruscas que a resposta do sistema controlado pelo compensador PI da Figura 12.

Nos instantes onde percebe-se uma grande transição de carga, por exemplo, em 6s, onde houve variação brusca da carga, a resposta dinâmica do LQR apresenta maior velocidade, mas é menos suave, apresentando transitório de maior amplitude, essa seria uma desvantagem comparada ao PI.

Em contra partida, o compensador PI apresenta oscilações maiores em torno da referência, ou seja, mesmo que o PI apresente menor velocidade na resposta, com menor pico de transitório, percebe-se oscilações maiores na resposta em regime permanente.

Para fins de comparação com a Figura 11 e Figura 12, na Figura 13 é representada a resposta do painel fotovoltaico presente no ambiente *Simulink/Matlab*®, utilizando o algoritmo de MPPT P&O.

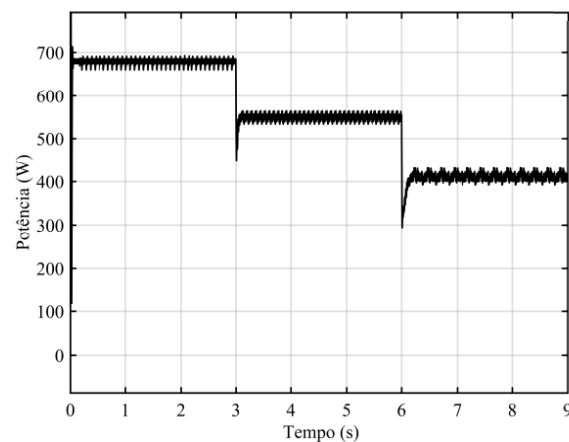


Figura 13. Resposta à aplicação do MPPT no painel fotovoltaico presente no Simulink.

Na Figura 13, a estratégia de MPPT empregada mostra resultado satisfatório em regime permanente, acompanhando as perturbações do MPPT com pouca variação em relação a irradiância incidente no módulo fotovoltaico simulado. No entanto, percebe-se nos instantes de variações que o transitório é curto, mas apresenta picos que prejudicam o desempenho do sistema.

Comparando a resposta do LQR e do PI ao sistema simulado no ambiente *Simulink/Matlab*®, percebe-se que o LQR apresenta a resposta mais próxima do modelo simulado. Isso se deve a melhor resposta dinâmica que o LQR apresenta, comparado ao PI.

9.CONCLUSÃO

A modelagem matemática do painel fotovoltaico, foi capaz de reproduzir com precisão satisfatória as características das curvas $T \times C$ e $T \times P$, tornando o modelo capaz de produzir uma referência de corrente precisa e coerente.

Pelo fato dos pontos de operação de um painel fotovoltaico, sofrerem variações constantemente, o emulador deve ser capaz de reproduzir essa operação para uma larga faixa de valores. O controlador LQR, foi capaz de reproduzir as variações no ponto de operação com elevada rapidez e estabilidade, enquanto o controlador PI obteve uma resposta mais lenta e menos precisa comparada a referência do sistema, tornando o controlado LQR mais vantajoso para esta aplicação.

As respostas dos compensadores, PI e LQR, juntamente com o algoritmo de MPPT P&O como estratégia de controle para o conversor Buck, mostraram-se satisfatórias. Merecendo destaque o

emulador controlado por LQR, demonstrando ser capaz de representar melhor o modelo simulado no ambiente *Simulink/Matlab*®.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBI, I. 2015. Modelagem de Conversores CC-CC Empregando Modelo Médio em Espaços de Estados.
- BARBI, I. & MARTINS, D. C. 2000. Conversores CC-CC básicos não isolados. *Edição dos autores. Florianópolis.*
- BELTRÃO, R. E. D. A. 2008. Efeito da temperatura na geração de energia de módulos fotovoltaicos submetidos a condições climáticas distintas. Estudo de caso para as localidades de Recife e Araripina.
- CANTOR, G. A. R. 2017. *INFLUÊNCIA DOS FATORES CLIMÁTICOS NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL*. Mestrado Dissertação, Universidade Federal da Paraíba.
- CASARO, M. M. & MARTINS, D. C. 2008. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. *Eletrônica de Potência*, 13, 141-146.
- CHARIAG, D. & SBITA, L. Design and simulation of photovoltaic emulator. Green Energy Conversion Systems (GECS), 2017 International Conference on, 2017. IEEE, 1-6.
- CUPERTINO, A. F. M. V. F. A. S., R. S. 2014. Cupertino, A. F.; Mendes V. F. and Silva, R. S. (2014). Modelagem e Controle de um Simulador de Painéis Fotovoltaicos. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática* 8.
- DE BRITO, M. A. G., GALOTTO, L., SAMPAIO, L. P., E MELO, G. D. A. & CANESIN, C. A. 2013. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. *IEEE transactions on industrial electronics*, 60, 1156-1167.
- DE SOTO, W., KLEIN, S. & BECKMAN, W. 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar energy*, 80, 78-88.
- GOMES, A. C. 2014. *Análise, projeto e implementação de um conversor Boost com técnica de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos*. Mestrado Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia.
- MOÇAMBIQUE, N. E. M. 2012. *Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos*. Universidade de São Paulo.
- NETALIANNE, M. F. H. S. R. S. A. D. S. L. S. 2016. AVALIAÇÃO DE MODELO SIMPLIFICADO DE PAINEL SOLAR COMO REFERÊNCIA PARA FONTE EMULADORA *XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA2016*. UFES, Vitória - ES.
- VILLALVA, M. G., GAZOLI, J. R. & RUPPERT FILHO, E. 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, 24, 1198-1208.

Capítulo 3

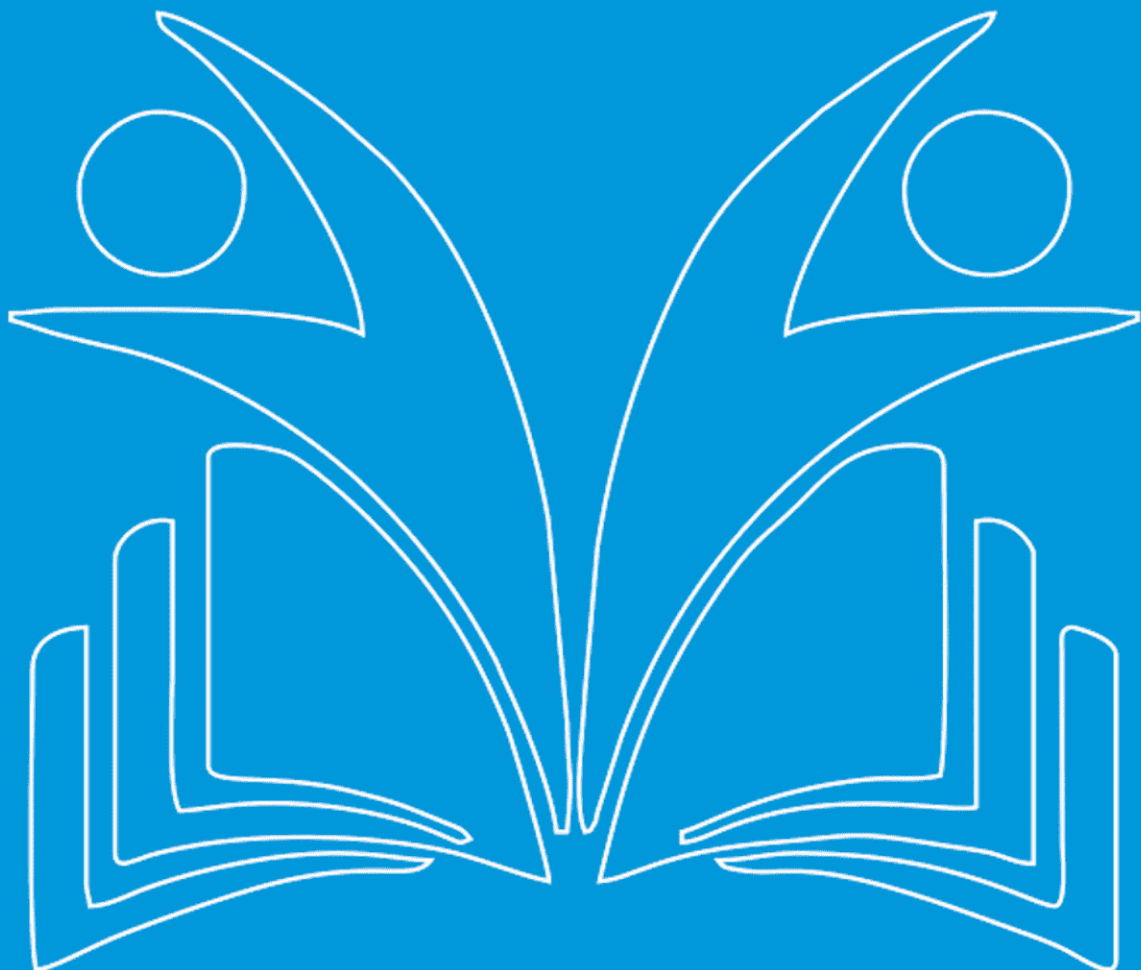


10.37423/230808061

CERTIFICAÇÃO LEED PARA CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS

Welleson Feitosa Gazel

Faculdade SESI



Resumo: O presente trabalho trata sobre a sustentabilidade na construção civil e tem o objetivo de demonstrar a utilização de dois certificados ambientais utilizados no Brasil, o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e o Processo AQUA (Alta Qualidade Ambiental). Será escrito uma breve história sobre o emprego da sustentabilidade na construção civil, a utilização dos selos ambientais na construção civil, as etapas dos dois selos e uma comparação entre eles com o objetivo de demonstrar a importância que ambos possuem para as construções se tornarem mais sustentáveis e a melhor utilização dos recursos naturais do planeta.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Construção civil, LEED.

I. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU), entre 1999 e 2015, a população mundial passou de 6 para 7 bilhões de pessoas. Esse crescimento implica em maior preocupação com assuntos relacionados com a urbanização, saúde, moradia, entre outros (ONU, 2015). Juntamente com o acréscimo populacional, aumentou a demanda por construções, a fim de garantir a sobrevivência, conforto e qualidade de vida para a humanidade.

O ramo da construção civil é o responsável por atender a demanda de estruturas que a população necessita, porém, esse setor também é um grande gerador de impactos ambientais e é um dos que mais consome recursos naturais, o qual pode chegar a 50% de todos os recursos extraídos da natureza (JOHN e AGOPYAN, 2005). Os principais impactos causados pelo ramo da construção civil estão relacionados ao consumo de água, emissões atmosféricas, consumo de energia e geração de resíduos (FEBRABAN, 2010).

Diante da percepção desses impactos causados pela construção civil, deu-se início uma discussão sobre o tema a partir da premissa da sustentabilidade, que vem ganhando maior destaque nas últimas décadas. Sendo assim, surgiu um novo conceito chamado de Green Building (Edifício Verde) onde uma obra é construída com princípios sustentáveis e que vem ganhando cada vez mais espaço no mercado (LEITE, 2011). Tavares (2006), destaca que a avaliação do desempenho ambiental é frequentemente baseada na Avaliação do Ciclo de Vida e por meio dos Selos e Certificações Ambientais.

O primeiro Sistema de Apoio Acadêmico 15 a 17 junho de 2016 Porto Alegre, RS avaliação ambiental da construção civil foi o método BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) que surgiu em 1990 no Reino Unido e serviu de base para os métodos que viriam a seguir, pois foi uma das primeiras metodologias visando alta qualidade ambiental. Após, surgiu o sistema francês HQE (Haute Qualité Environnementale) e posteriormente o norte-americano LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (FOSSATI, 2008; SALGADO et al., 2012).

No Brasil as certificações mais conhecidas são a LEED, que tem como base os critérios americanos e a certificação AQUA (Alta Qualidade Ambiental), que possui critérios adaptados do sistema francês HQE. O Brasil ficou com o 4.º lugar no ranking de maior número de certificações Leed (Liderança em Energia e Design Ambiental, na sigla em inglês) para construções sustentáveis em 2012 atrás apenas dos Estados Unidos, Emirados Árabes Unidos e China. E para receber a certificação, o empreendimento deve atender a pré-requisitos e recomendações que avaliam o tipo de terreno, a localização, a

infraestrutura local, o uso racional de água, eficiência energética, qualidade do ar interno, reciclagem e diversas outras medidas que garantam eficiência operacional ao usuário e preservação do meio ambiente, antes, durante e após a obra. Além de criar parâmetros de qualidade para o mercado gerando vantagens competitivas para as empresas que se certificaram, estes critérios começam a impulsionar e a transformar o mercado da construção civil (LEITE, 2011).

II. PROCEDIMENTOS

2.1 – CONCEITO DE ECOEFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE

Ao contrário da década de 80, onde as empresas se limitavam a cumprirem as Leis Ambientais, as no Brasil vem investindo nas práticas de ecoeficiência não só como forma de melhorar sua imagem no mercado, mas porque seus funcionários realmente adotaram como questão pessoal (FERNANDES, 2009).

Oficialmente, conceito de Ecoeficiência foi introduzido em 1992, pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), sendo endossado pela Conferência Rio-92. O Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), definiu ecoeficiência como: Saber combinar desempenho econômico e ambiental, reduzindo impactos ambientais; usando mais racionalmente matérias-primas e energia; reduzindo os riscos de acidentes e melhorando a relação da organização com as partes interessadas “stakeholders” (CEBDS, 2007).

Segundo Pinto, (2003), a ecoeficiência é um componente necessário rumo ao caminho da sustentabilidade e está baseada em sete princípios: Reduzir o consumo de materiais com bens e serviços; reduzir o consumo de energia com bens e serviços; reduzir a dispersão de substâncias tóxicas; intensificar o reaproveitamento e a reciclagem de materiais; maximizar o uso sustentável de recursos renováveis; prolongar a durabilidade dos produtos; agregar valor aos bens e serviços. Além dos sete princípios devem-se criar ações ambientalmente corretas para os funcionários, colaboradores e consumidores.

E os benefícios para as organizações praticantes de atividades coeficientes são: A redução de consumo de recursos naturais, ou seja, a minimização do uso de energia, materiais, água, solo, promovendo a reciclagem e a redução dos desperdícios; Redução do impacto na natureza, ou seja, redução das emissões atmosféricas, lançamentos de efluentes, disposição de resíduos e incentivo à reciclagem e ao reuso de materiais; Aumento da produtividade ou do valor do produto, isto significa atender

clientes fornecendo produtos mais flexíveis, funcionais e que atendam objetivamente às necessidades dos clientes com menor utilização de recursos (PINTO, 2003).

Os parâmetros sequenciais para resultados positivos voltados a estabilidade e sustentabilidade parte idealizando o uso da natureza, buscando crescimento econômico, inovação, competitividade e sucesso nos negócios, diminuindo o impacto ambiental. Líderes da sociedade civil e consumidores devem encorajar os consumidores a preferirem produtos e serviços ecoeficientes e mais sustentáveis; apoiar as medidas políticas para criação das condições enquadradoras, que recompensam a ecoeficiência.

Quando a sustentabilidade começou a ser divulgada mais abertamente, empresários também aderiram ao sistema certos de que poderiam contribuir com essa transformação. As empresas brasileiras também engajaram em favor desta causa, quando a sustentabilidade começou a ser discutida.

As primeiras adaptações empresariais em prol da sustentabilidade aconteceram nos anos 90, e, ao longo do tempo, foram se aperfeiçoando, sendo que novas empresas também foram aderindo à causa. No início, as medidas eram baseadas em reduzir o consumo de água e outros insumos. Outras empresas redefiniram toda a sua estrutura de produção, tem aquelas que investiram em equipamentos capazes de consumir menos energia que o normal.

2.2 – CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

O termo construção sustentável foi proposto pelo professor Kilbert (2003), para descrever a responsabilidade da construção civil no que diz respeito ao conceito e aos objetivos da sustentabilidade. Segundo Kilbert, o conhecimento existente e o diagnóstico da indústria da construção em termos de impactos ambientais revelam que existe a necessidade de uma mudança para se atingirem os objetivos de sustentabilidade, como primeira prioridade deve-se analisar as características da construção tradicional e compará-la com o novo critério sustentável para os materiais de construção, os produtos e processos construtivos. Essa linha de pensamento alterou fatores tradicionalmente considerados competitivos na indústria da construção, como: a qualidade, o tempo e o custo.

O planejamento sustentável e eficiente deve estar presente em todo o "ciclo de vida" de um edifício desde a sua concepção, construção, operação, manutenção e demolição, edifícios chamados de verde, isto é, planejados e mantidos de acordo com normas de consciência ambiental, podem reduzir, em média, o consumo de água em até 40%; o consumo de energia em até 50%; a geração de resíduos

sólidos em até 70%; e a emissão de gás carbônico (CO₂) em até 40% - trazendo benefícios não apenas de ordem econômica, mas também em relação ao uso/reuso dos recursos naturais (KILBERT,2003).

O termo GreenBuilding ou Edifício Verde é utilizado para definir edifícios que foram construídos seguindo padrões sustentáveis. Este edifício tem como objetivo atender a desempenho ambientais relativos a cinco temas: local sustentável, eficiência de água, eficiência de energia, conservação dos materiais e dos recursos e qualidade ambiental interna. O edifício sustentável também chamado de construção verde é o resultado de uma concepção centrada no aumento da eficiência dos recursos naturais (água, energia e matérias), com medidas e procedimentos construtivos, tendo como foco a redução dos impactos gerados pela construção no ciclo social e ambiental da região. O que qualifica um edifício como Green Building é a utilização de tecnologias e procedimentos para reduzir os impactos no meio ambiente, utilizando com eficiência a água e energia, protegendo a saúde dos usuários, reduzindo os resíduos, a poluição e o impacto ao meio ambiente. Um edifício “verde” fornece melhoria econômica de custo através da melhoria da produtividade ao longo dos anos, porém possui um investimento inicial maior quando comparado com edificações convencionais. Projetos considerados “verdes” geram benefícios quantitativo e qualitativo como o conforto interno, saúde das pessoas, redução da poluição e resíduos e outros benefícios.

Para o planejamento do local sustentável deve-se avaliar a paisagem do local na concepção do projeto. É importante observar o terreno em todos os aspectos, devendo manter longe de zonas úmidas e agrícolas sendo necessário a existência de infraestrutura urbana para atender o empreendimento.

2.3 – CERTIFICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Como método efetivo para reduzir os gastos com impacto ambiental e uso eficiente de energia, a sociedade, os empresários e os governantes começaram a desenvolver no mundo os chamados selos verdes ou certificados ambientais para as edificações a serem construídas ou reformadas, estes selos são baseados em conceitos e indicadores conforme o país de aplicação com a finalidade de buscar a realização de empreendimentos com base na sustentabilidade ambiental. Selos verdes ou certificados ambientais são atestados de cumprimento de pré-requisitos a fim de garantir o menor impacto ambiental e o menor consumo dos recursos naturais em reformas, operacionalização e construção de novos edifícios.

O objetivo da certificação é promover uma conscientização de todos os envolvidos no processo, desde a fase do projeto, seguindo pela construção até o usuário final. Os custos iniciais são elevados, mas os

benefícios trazidos pela certificação de uma construção são visíveis ao longo prazo como empreendimentos diferenciados e mais valorizados, mais possibilidade de atingir novos mercados, redução de custos de produção, maior visibilidade uma vez que a consciência ambiental vem aumentando, aumento da credibilidade, redução de custos devido a acidentes ambientais, redução na utilização de recursos naturais e redução no custo com mão de obra qualificada.

2.4 – CERTIFICAÇÃO AQUA

A certificação AQUA no Brasil é aplicada pela Fundação Carlos Alberto Vanzolini, esta fundação foi estabelecida pelo departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) em 1967, a AQUA é uma certificação internacional da construção sustentável desenvolvida a partir da certificação francesa HQE, que “visa garantir a qualidade ambiental de um empreendimento novo de construção ou reabilitação utilizando-se de auditorias independentes” (LEITE, 2011).

A certificação AQUA traz uma série de benefícios para o empreendedor, para o usuário e para a sociedade e meio ambiente como por exemplo, para o empreendedor: comprovar alta qualidade ambiental, diferencia seu portfólio no mercado, associar a imagem da empresa à alta qualidade ambiental e melhorar o relacionamento com órgãos ambientais e comunidades; para o usuário: economia direta no consumo de água e de energia elétrica, melhores condições de conforto e saúde, maior valor patrimonial ao longo do tempo e consciência de sua contribuição para o desenvolvimento sustentável e a sobrevivência no planeta; e, para a sociedade e meio ambiente: redução das emissões de gases do efeito estufa, redução da poluição, melhor gestão de resíduos sólidos e melhor qualidade de vida. O processo AQUA é estruturado em dois padrões que, segundo Valente (2009), permitem avaliar o desempenho requisitado sobre o sistema de gestão do empreendimento (SGE) e a qualidade ambiental do edifício (QAE). Conforme Leite (2011), o SGE avalia o sistema de gestão apresentado e o QAE avalia o desempenho arquitetônico e técnico do edifício. Segundo a Vanzolini (2015) o Sistema de Gestão do Empreendimento (SGE) permite o planejamento, a operacionalização e o controle de todas as etapas de seu desenvolvimento, partindo do comprometimento com um padrão Apoio acadêmico 15 a 17 junho de 2016 Porto Alegre, RS de desempenho definido e traduzido na forma de um perfil de Qualidade Ambiental do Edifício (QAE).

Segundo a Fundação Vanzolini (2015), para se obter a certificação AQUA, são hierarquizados 14 categorias e 4 temas, conforme segue: para edifícios comerciais, administrativos ou de serviços

(energia, meio ambiente, saúde e conforto); para edifícios habitacionais (energia e economias, meio ambiente, saúde, segurança e conforto).

2.5 – CERTIFICAÇÃO LEED

A certificação LEED foi implantada nos Estados Unidos em 1991 pela USGBC (U. S. Green Building Council), a USGBC é uma organização sem fins lucrativos que conta com a presença de construtores, ambientalistas, professores e estudantes que compartilham da mesma visão de um ambiente construído com foco na sustentabilidade. No Brasil, a certificação LEED foi implantada pelo GBC Brasil, que tem como missão desenvolver a indústria da construção sustentável no país, utilizando as forças de mercado para conduzir a adoção de práticas de Green Building em um processo integrado de concepção, implantação, construção e operação de edificações e espaços construídos.

A GBC Brasil define a certificação LEED como um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações (GBC BRASIL, 2015). Segundo (DALLA; MORAES, 2013), comparando os requisitos AQUA e LEED, constatou-se que a Certificação LEED é separada em 7 dimensões que são avaliadas nas edificações, enquanto a Certificação AQUA que avalia a qualidade ambiental do empreendimento é dividida em 14 categorias. Com base nas informações analisadas, a partir das propostas de cada Apoio acadêmico 15 a 17 junho de 2016 Porto Alegre, RS selo, percebeu-se que a Certificação LEED tem requisitos relacionados com a inovação e créditos de prioridade regional que leva em conta as diferenças ambientais, sociais e econômicas existentes em cada local, os quais não são abordados na Certificação AQUA.

Em contrapartida, a AQUA contém os requisitos conforto acústico, conforto olfativo, qualidade sanitária dos ambientes e qualidade sanitária da água. O conforto acústico visa identificar as fontes de ruído interno e externo, o conforto olfativo visa identificar as fontes de odores internas e externas ao longo do ciclo de vida do edifício. A qualidade sanitária da água prevê a conservação dos metais sanitários e pontos de uso, análises da legionella, a supervisão da qualidade da água nos pontos de uso e o acompanhamento das ações realizadas e da qualidade da água do edifício e a qualidade sanitária do ambiente visa identificação das fontes emissoras de ondas eletromagnéticas de baixa frequência e das fontes de radiofrequência do empreendimento.

III. RESULTADOS

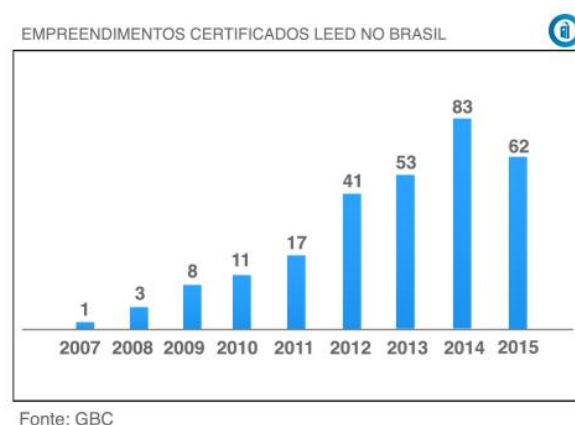
3.1 – CERTIFICAÇÕES PARA EDIFÍCIOS

No Brasil, são aplicadas atualmente duas certificações ambientais: o AQUA e o LEED. Há ainda um preconceito por parte dos consumidores que duvidam da reputação e da qualidade dos produtos e serviços sustentáveis, pois acreditam que a sustentabilidade está ligada à baixa qualidade e rusticidade.

O desenvolvimento sustentável a longo prazo traz benefícios econômicos, ambientais e sociais fundamentais para o crescimento do país. As práticas sustentáveis têm como objetivo a redução dos impactos ambientais, porém para se alcançar o sucesso esperado, as etapas das atividades devem ser planejadas e ter gerenciamento rigoroso, o que favorece o custo benefício da obra, tornando-as entre outras coisas, mais produtivas e rentáveis.

Processo para adquirir o selo Leed e custos envolvidos

Tabela 1: Certificados LEED no Brasil



Para os imóveis residenciais, ainda não há uma mensuração sistemática dos resultados. Mas os resultados iniciais são animadores. No primeiro imóvel certificado, um apartamento reformado na cidade de São Paulo, foi constatada uma redução de 12% no consumo de água e de 50% no de energia.

3.2 – O CUSTO DA CERTIFICAÇÃO

Podemos separar os custos em 3 grupos: Custo da certificação pelo USGB: são taxas em US Dollars variando conforme o tipo de certificação e tamanho da obra. Custo de consultoria especializada: esse não é um item obrigatório, mas altamente recomendado. Representa as despesas com o apoio técnico de especialistas na obtenção do selo LEED, podendo custar de 0,5% a 1,0% do custo da obra; Acréscimo

nos custos da obra: estes são provocados pelas alterações de projeto devido a adoção de práticas sustentáveis para atender aos critérios desse certificado de edifício verde.

Os custos adicionais da obra também variam em função da classificação almejada, estima-se em 1% para o selo “Certificaded” e 10% para o “Platinum”. Os empreendimentos que pretendem receber a certificação LEED deverão obedecer a uma série de atividades e processos que deverá ser criado na fase inicial do projeto tendo como base a documentação e normas de referências para se adequar aos padrões de trabalho que propiciam as melhores técnicas construtivas que busquem o desenvolvimento de tecnologias, materiais, processos e procedimentos operacionais que possam trazer benefícios para o meio ambiente e a todas as partes envolvidas no projeto.

O processo de certificação LEED obedecerá ao seguinte caminho de atividades: 1-Determinar o tipo de projeto: definir o tipo de construção em que se enquadram o projeto com base a classificação constante de acordo com o tipo de certificação. 2-Determinar qual o nível de certificação que será implantada: Antes de iniciar a fase de concepção do projeto, deverá decidir qual o nível de certificação LEED que se pretende buscar e estabelecer um orçamento que contemple todos os custos. 3-Definição de um orçamento para o projeto:

Para o bom andamento do projeto deverá ser definido os valores financeiros através de um orçamento que indique os recursos previstos para sua execução, pois todos os níveis de certificação LEED exigem despesas adicionais e devem ser detalhadas no orçamento para que todas as equipes envolvidas nas diversas fases do projeto possam tomar medidas que não extrapolem o orçamento proposto. 4- Traçar medidas para alcançar os objetivos da certificação LEED: Nessa etapa deverá se traçar as medidas cabíveis para que todas as equipes estejam empenhadas em comprimir as diretrizes propostas no projeto para preservar a integridade ambiental e econômica de cada etapa. 5- Avaliação dos Ciclos de Vida: nessa etapa deverá ser avaliado o custo beneficiado projeto, bem como, as medidas projetadas para trazer investimentos verdes em termos de desenvolvimento sustentável, pois deverá ser levado em consideração não somente a fase de benefícios ambientais trazidos no ciclo de implantação do empreendimento, mas sim, os benefícios que o mesmo irá dar ao meio ambiente ao longo de sua vida útil.

O ciclo de vida do projeto deverá prever o desenvolvimento de tecnologias na sua fase inicial o que poderá onerar o orçamento, mas os valores gastos na fase inicial deverão ser recompensados ao longo do desenvolvimento do projeto com aproveitamento dos recursos renováveis, conforme prever nas listas de procedimentos operacionais estabelecidos nas normas para certificação da LEED. 6-

Orientação do projeto por profissionais especializados na certificação LEED: Essa etapa será muito importante para que projeto possa atingir seus objetivos.

O empreendedor deverá contratar um profissional que tenha um amplo conhecimento de construções verdes e do sistema de avaliação LEED e o processo no processo de certificação para ajudar no desenvolvimento do projeto assim determinar os objetivos alcançados para se conseguir a certificação.

3.3 – NÍVEIS DE CERTIFICAÇÕES

Para receber a certificação LEED de prédio verde (construção sustentável), um projeto civil deve seguir alguns quesitos. Hoje, são 69 critérios que valem pontos. Estes critérios levam em consideração todo o ciclo de vida do empreendimento desde a sua concepção, construção, operação e descarte de resíduos após sua vida útil. Caso atinja no mínimo 40 pontos e atenda os 8 pré-requisitos, o prédio estará de acordo com as preocupações de sustentabilidade e recebe a certificação LEED básica. A partir de 50 pontos, recebe o certificado prata. Quando chega a 60, recebe o ouro. A partir de 80 pontos atinge-se a certificação máxima, que é de platina.

3.4 – BENEFÍCIOS DA CERTIFICAÇÃO ECONÔMICOS; SOCIAIS; AMBIENTAIS

Diminuição dos custos operacionais; Diminuição dos riscos regulatórios; Valorização do imóvel para revenda ou locação; Aumento na velocidade de ocupação; Aumento da retenção; Modernização e uma edificação menos ultrapassada. Sociais Melhora na segurança e antes de tudo, coloca a saúde de trabalhadores e ocupantes em primeiro lugar; Inclusão social e aumento do senso de comunidade; Capacitação Profissional; Conscientização de trabalhadores e usuários; Aumento da produtividade do funcionário; melhora na recuperação de pacientes (em Hospitais); melhora no desempenho de alunos (em Escolas); aumento no ímpeto de compra de consumidores (em comércio). Incentivo os fornecedores com maiores responsabilidades sócio ambientais; Aumento da Satisfação e bem-estar dos usuários; Estímulo a políticas públicas de estímulo à construção sustentável. Ambientais Uso Racional e redução da extração dos recursos naturais; Redução do consumo de água e energia; Implantação consciente e ordenada; Redução das consequências dos efeitos das mudanças climáticas; Uso de materiais e tecnologias de baixo impacto ambiental; Redução, tratamento e reuso dos resíduos da construção e operação; Certificação LEED.

3.5 – BASF CASA E

É uma casa Alemã que já existem outras cedes em diversos países do mundo a fora, há pouco tempo foi construída uma cede Brasil para que pessoas leigas especialistas na área pudessem aprender um pouco mais sobre esses tipos de construção e aprender um pouco mais com uma casa quase 100% ecológica. Criada pelo USGBC há mais de uma década, nos EUA, a certificação LEED para construção sustentável chegou ao Brasil há quase cinco anos e, hoje, é considerada o principal selo para edificações no país.

Com nova versão prevista para esse ano, a certificação já atestou o comprometimento de 40 empreendimentos nacionais com a sustentabilidade e colocou o Brasil na quarta posição do ranking mundial dos países mais preocupados com a construção sustentável. Atualmente, 40 empreendimentos brasileiros - entre bancos, hospitais, escolas, laboratórios de saúde, supermercados, prédios comerciais e outros - possuem a certificação LEED - Leadership in Energy and Environmental Design. A CasaE, Casa Ecoeficiente da BASF, conquistou a certificação LEED-NC Gold, concedida a novas construções pelo Green Building Council. Se tornando a primeira casa New Construction no Brasil a receber o selo Gold. Com foco na sustentabilidade, o sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações, utilizado em 143 países, tem o objetivo de incentivar a transformação das obras e projetos.

O espaço, que passou por uma ampla renovação, serve como catálogo vivo para apresentar soluções inovadoras e tendências ligadas à indústria da construção, com foco em eficiência, conforto, produtividade e sustentabilidade. Mobiliário moderno, novas tecnologias, além de um mural de 30 metros produzido pelo artista plástico Rui Amaral, pioneiro do grafite no Brasil. No local foram aplicadas 36 soluções desenvolvidas pela BASF, que proporcionam uma obra mais rápida, com redução no consumo de água, eficiência energética, conforto térmico e acústico, importante redução na emissão de CO2 e de resíduos de construção, além de assegurar maior vida útil. Outras 29 empresas parceiras trouxeram para a casa o que possuem de mais inovador ou sustentável.

Em 40 anos, uma edificação como a CasaE garantiria a economia de 30% do investimento total, incluindo operação e manutenção, evitaria o uso de energia equivalente ao consumo/dia de 9 mil casas, além de poupar 300 mil litros de água, o que poderia abastecer mais de 1.600 habitantes por ano, segundo estudo da Fundação Espaço Eco.

IV. CONCLUSÃO

Analisando as duas certificações LEED e AQUA foi possível realizar um julgamento comparativo dos requisitos por elas abordados. Os requisitos comuns visam a criação de um espaço sustentável que vai além dos limites do empreendimento, pois são abordados requisitos relacionados ao seu entorno e as partes interessadas. Abordam a gestão da água, da energia, dos resíduos, onde a permanência do empenho ambiental é avaliada. As duas certificações possuem características distintas, pois visam o mesmo objetivo que é trazer benefício ambiental com construções sustentáveis, mas, deve-se levar em conta que a Certificação AQUA é adaptada para a realidade brasileira, a escolha do melhor método de avaliação deve levar em consideração o empreendimento, bem como o local de implantação deste.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. O desafio da sustentabilidade na construção civil. Série Sustentabilidade – Volume 5. 1ª edição. São Paulo: Editora Blucher. 2011.

AQUA. Processo de certificação AQUA. Disponível em: <http://vanzolini.org.br/aqua/> Acessado em 27 out.2016.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas. São Paulo. 2014.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. Posicionamento CBCS. Eficiência Energética. São Paulo, 2007.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 307 de 05 de julho 2002. Brasília, DF, 2002.

DALLA COSTA, E.; MORAES, C. S. B. Construção Civil e a Certificação Ambiental: Análise Comparativa das Certificações LEED e AQUA. Espírito Santo do Pinhal. 2013.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE BANCOS - FEBRABAN. Café com Sustentabilidade. Construção Sustentável. São Paulo, 2010.

FERNANDES, A. L. G. Sustentabilidade nas construções. Curso de especialização de Engenharia civil pela Universidade federal de Minas Gerais, junho de 2009.

FOSSATI, M. Metodologia para avaliação da sustentabilidade de projetos de edifícios: o caso de escritórios em Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Santa Catarina. Florianópolis. 2008.

FUNDAÇÃO CARLOS ALBIETO VANZOLINI. Processo AQUA Construção Sustentável. Disponível em: <http://vanzolini.org.br/aqua/>. Acesso: 02 nov. 2016.

GBC Brasil Green Building Council Disponível em: < <http://gbcbrasil.org.br/sobre-certificado.php>>. Acessado em 30 out. 2016.

Capítulo 4



10.37423/230808075

AVALIAÇÃO DE JATOS DESCAREPADORES UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Samyla Souza Dutra

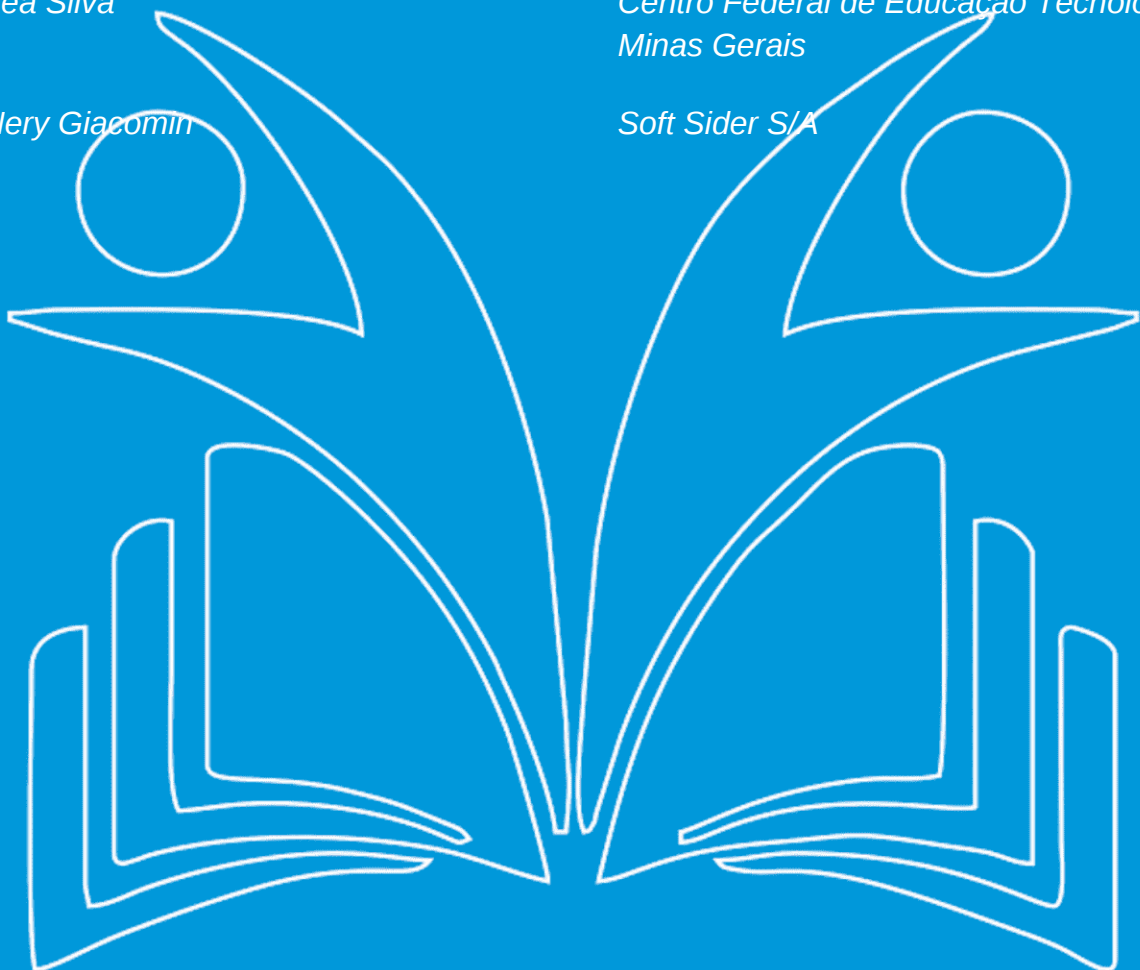
*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Odilon Correa Silva

*Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais*

Cristóvão Nery Giacomini

Soft Sider S/A



Resumo: Sistemas de Visão Computacional podem ser utilizados para otimizar o processo em larga escala nas indústrias. Porém, fazer com que o computador seja capaz de reconhecer objetos do mundo real ainda é um dos grandes desafios da computação. O objetivo desse trabalho é detectar, extrair e analisar as características de jatos descarepadores utilizados no processo siderúrgico. As imagens foram obtidas a partir da bancada de teste e submetidas ao algoritmo Haarcascade para a detecção da região de interesse e a um algoritmo, utilizando técnicas de Processamento Digital de Imagens para análise das características. Nos testes realizados o Haarcascade apresentou uma taxa de acerto de aproximadamente 81% e o algoritmo desenvolvido de aproximadamente 92%.

Palavras-chaves: Visão Computacional, Bico Pulverizador, Laminação a Quente, Siderurgia.

1.INTRODUÇÃO

Na computação é vigente a demanda em conseguir simular as capacidades humanas para a realização de funções relacionadas á análise de imagens. Essa simulação deve ter a habilidade de extrair apenas informações importantes a partir de uma cena repleta de informações incompletas e, principalmente, conseguir identificar um objeto ou padrão em uma imagem com a maior independência possível, em relação a fatores como mudança de posição, tamanho, orientação e variações no ponto de vista (Araújo, 2009).

Na indústria, esses conceitos servem de base para as modernas tecnologias da informação e automatização de processos, que deram origem aos termos Industry 4.0 na Europa e *Smart Manufacturing* nos EUA. Como exemplo para a área siderúrgica, sistemas de visão computacional já foram utilizados para automatizar o processo de inspeção de defeitos em chapas e classificá-los no processo de fabricação do aço (Queiroz, 2015), (Martins, 2010), analisar irregularidades na produção (Bento, 2016), auxiliar operadores para análise os sistemas de automação (Salis, 2007) e avaliar o desempenho eletromagnético de aço elétrico (Rebouças Filho et al., 2017).

Para a produção do aço, o processo siderúrgico dispõe de objetos responsáveis por realizar a remoção de óxidos de ferro presente na composição química do material, emissão de água ou ar para a mistura química, pulverização nas áreas primárias e resfriamento do material processado. Esses objetos são chamados de bicos de pulverização. A figura 1 mostra as áreas da siderurgia que utilizam os bicos de pulverização e os processos de fabricação do aço (Systems, 2010).

Em um cenário generalístico, os bicos de pulverização são utilizados em escala industrial emitindo jatos de água, elementos químicos, ou ar sob grande pressão em diversos ramos. Na indústria siderúrgica, os bicos pulverizadores no processo de laminação de tiras a quente são utilizados para a remoção de óxidos agregados no aço, denominados carepa. Nesse contexto os bicos pulverizadores passam a ser denominados bicos descarepadores. A siderurgia utiliza



Figura 1. Processos que utilizam bicos pulverizadores na indústria siderúrgica.

água na maioria de seus processos produtivos e a eficiência na utilização desse recurso é um fator muito importante na atividade industrial tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

Entretanto, a avaliação da qualidade do bico descarepador é realizada manualmente e, portanto, essa avaliação está suscetível a interferências humanas. Ocasionalmente, fatores ambientais, físicos e comportamentais (como estresse, fadiga, sono, fome) podem causar divergências na avaliação. Assim, a automatização do processo de avaliação do jato é importante, uma vez que implica em ganho de tempo para determinação da qualidade e cumprimento de um padrão fixo estabelecido.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um método para detectar, extrair e analisar as características de imagens, ou sequências de imagens, de jatos emitidos por um bico pulverizador, visando auxiliar o processo de avaliação dos bicos.

2. DESENVOLVIMENTO

Os sistemas que utilizam PDI (Processamento Digital de Imagem) podem ser subdivididos em sete passos fundamentais: domínio do problema, obtenção da imagem, restauração/realce (pré-processamento), segmentação, extração de características, classificação e decisão (Azevedo et al., 2010).

Com essa abordagem definida, tem-se a metodologia adotada para este trabalho que, tendo em vista o domínio do problema, as imagens foram adquiridas em bancada de teste do bico descarepador e submetidas ao classificador Haarcascade. Este foi treinado para obter a região de interesse das imagens e servir como base para o algoritmo desenvolvido usando técnicas de PDI.

Em seguida, na etapa de pré-processamento, as imagens foram redimensionadas, suavizadas com o filtro Gaussiano e os ruídos foram removidos com os filtros de mediana. Na segmentação, o operador de Canny foi utilizado para delimitar as bordas do jato e a Transformada de Hough para a detecção das retas. Para extrair as características do jato como o ângulo e a cobertura teórica, foram utilizadas relações trigonométricas e operações algébricas.

2.1 CLASSIFICADOR HAARCASCADE

O algoritmo Haarcascade utiliza o princípio de funcionamento do algoritmo Viola-Jones (Viola and Jones, 2001). Este é muito utilizado para detectar faces com precisão, alta taxa de acerto, baixa taxa de falsos positivos e baixo custo computacional (Araujo, 2010). O algoritmo é composto pela etapa de representação da imagem em um espaço de características baseadas nos filtros de Haar, um classificador *Boosting* e a combinação em cascata destes classificadores.

A figura 2 (Lienhart and Maydt, 2002) mostra os exemplos possíveis de configuração dos filtros de Haar em formato de pixels. Esses são os filtros utilizados para serem subtraídos e originar a imagem buscada. Por exemplo, a máscara 1(a) apenas subtrai o valor de um pixel do seu vizinho á direita. A máscara 2(c) subtrai o pixel central dos pixels logo acima e abaixo. A máscara 3(a) subtrai um pixel central dos seus 8-vizinhos. Esse processo percorre toda a imagem submetida ao algoritmo (imagem positiva) deslizando os filtros Haar procurando o padrão que se encaixe.

Por esse motivo o algoritmo Haarcascade também pode ser definido como detectores baseados em cascata, pois treinam uma árvore de decisão em que cada nível analisa um conjunto de atributos diferentes e avalia se esses atributos representam ou não o objeto de interesse (Barelli, 2018).

Na prática, o classificador Haarcascade é treinado para reconhecer padrões a partir de objetos já conhecidos. Um conjunto de características de objetos são apresentados ao classificador e a partir desses dados, ele é treinado para identificar automaticamente padrões nessas informações, tornando-se capaz de classificar novos objetos. Para este trabalho, foi utilizado a biblioteca OpenCV, que implementa o algoritmo Haarcascade para detectar a região de interesse.

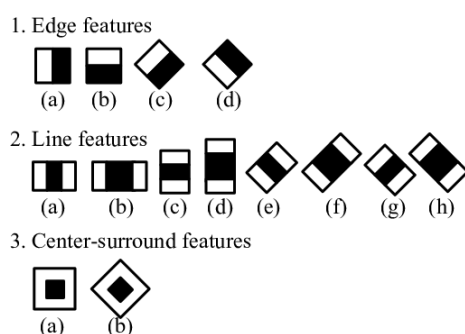


Figura 2. Filtros de Haar com as possíveis posições dos pixels das regiões brancas e regiões pretas.

O desenvolvimento do algoritmo Haarcascade foi realizado em sete etapas, como mostrado na figura 3: aquisição de imagens, definição da Região de Interesse (Region Of Interest - ROI) a ser detectada, selecionar as imagens negativas, selecionar as imagens positivas, geração das máscaras *Haar Features* e, por fim, o treinamento do algoritmo. É na etapa de treinamento

que o algoritmo consegue armazenar as informações da imagem correta a ser detectada das imagens a serem descartadas.

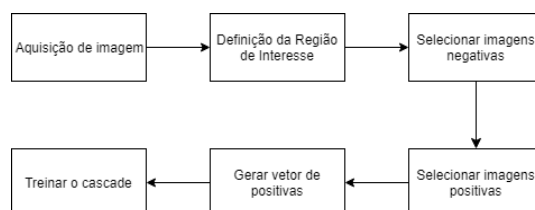


Figura 3. Etapas para o funcionamento do haarcascade.

As imagens positivas foram obtidas a partir de uma bancada de teste do bico descarepador para três classificações de bicos, sendo um do tipo 3040E, um DNEX 1328 e outro 3040EN PRO. Os testes foram feitos em imagens estáticas e em sequências de imagens (em vídeo). A definição da ROI é a região localizada na parte central da imagem, de forma a delimitar apenas o início do jato. As imagens negativas são imagens que não possuem o objeto de interesse, as imagens positivas são as que possuem o objeto de interesse e ambas são utilizadas durante a etapa de treinamento do classificador Haarcascade. A criação do vetor de positivas é a configuração obtendo a imagem positiva sobreposta na imagem negativa. Por fim, o treinamento do classificador utilizando a biblioteca OpenCV foi realizada definindo alguns parâmetros de configuração, assim como, especificando a taxa de acerto mínimo e taxa de alarme falso detectado. Após alguns experimentos, o resultado com o classificador para uma imagem é ilustrada na figura 4.

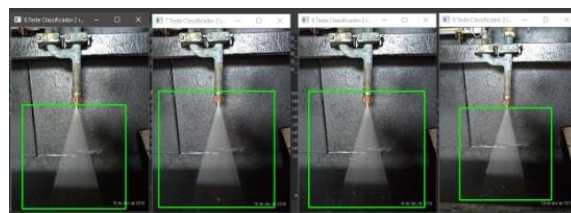


Figura 4. Resultado da detecção do algoritmo Haarcascade para os primeiros experimentos.

Entretanto, os resultados obtidos com essa ROI não foram satisfatórios por possuírem muito ruído ao fundo e nas delimitações. Assim, após alguns experimentos o algoritmo foi treinado com a ROI de tamanho menor. A criação do cascade foi refeita e definiu-se 5 novas imagens positivas de cada classe (mais próximas do início da emissão do jato) e com 500 imagens negativas com a sobreposição das imagens positivas. Assim, obteve-se o resultado ilustrado na figura 5.

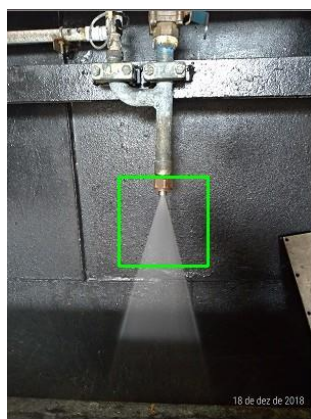


Figura 5. Imagem do jato para os experimentos com resultado satisfatório por apresentar uma ROI menor.

2.2 ALGORITMO DE EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

A imagem a ser tratada na etapa de pré-processamento é resultado da detecção da região de interesse processada pelo Haarcascade, já cortada apenas com a região de interesse e em escala de cinza. Sendo assim, o primeiro passo foi redimensionar a imagem recebida para uma escala menor. Após experimentos realizados, a melhor dimensão para trabalhar com a imagem foi 200x300 pixels. Posteriormente, foram utilizados filtros de suavização aplicados nas imagens da base de dados.

Os filtros de suavização são utilizados para borramento e redução de ruído. Aplicando as operações de borramento nas imagens, foi possível remover os pequenos detalhes da imagem, antes da extração de característica do objeto, e conectar pequenas descontinuidades nas linhas apresentadas pelas imagens. Dentre os filtros de suavização, dois merecem destaque: filtro Gaussiano e filtro de Mediana.

O filtro Gaussiano é um filtro passa-baixa e, como tal, um dos principais problemas relacionados à eliminação de ruído em imagens por meio desses filtros é a supressão de detalhes finos e bordas da imagem. Entretanto, por ser um filtro não linear, o filtro Gaussiano realiza a suavização de forma mais atenuada seguindo a distribuição normal. Assim, o filtro aplicado na imagem possui uma matriz com pesos distintos, seguindo a função Gaussiana.

Como a aplicação do filtro espacial não interfere na detecção de bordas, é possível aplicá-lo iterativamente. Assim, a aplicação do filtro de mediana permitiu remover o restante dos ruídos não removidos pelo filtro Gaussiano.

Segundo Gonzales (2010), os filtros de mediana proporcionam excelentes resultados na redução de ruído, com borramento consideravelmente menor do que filtros lineares de suavização de tamanho

similar. Os filtros de mediana são eficazes na presença de ruído impulsivo, também chamado de ruído sal e pimenta em razão de sua aparência, como pontos brancos e pretos sobrepostos em uma imagem. Embora os ruídos na imagem em contexto não sejam essencialmente do tipo sal e pimenta, por ser passa-baixa e por isto combinar com o filtro Gaussiano, o filtro de mediana foi escolhido para suavizar as imagens do jato.

Na etapa de segmentação o objetivo é identificar corretamente a forma dos objetos presentes na imagem. Baseando-se principalmente na variação dos valores de intensidade dos pixels da imagem, detecção de descontinuidades e técnicas de limiarização.

Para a etapa de segmentação, as imagens resultantes da suavização dos filtros Gaussiano e mediana foram submetidos às operações para delimitação do jato. Essa operação foi realizada utilizando, primeiramente, o operador de Canny para detecção das bordas na imagem e a transformada de Hough para a obtenção das retas que parametrizam o formato do jato.

Nesta etapa, o interesse era reduzir os ruídos apresentados ao fundo da imagem do jato, para que não fossem detectados como parte da região onde as características seriam extraídas e ao mesmo tempo não suavizasse as bordas entre o jato e a parede. Os resultados obtidos são apresentados na figura 6.

A detecção de borda realizada com o operador de Canny é muito sensível aos pequenos ruídos presentes na imagem. Isso ocorre devido ao cálculo da derivada parcial e para isto a oscilação das cores em escala de cinza presente na imagem tem grande influência na detecção das bordas. A figura 7 (Gonzales, 2010) ilustra o comportamento da

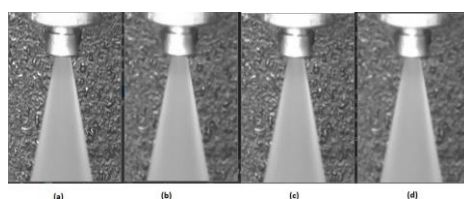


Figura 6. Imagem da ROI original (a), com filtro mediana (b), Gaussiano (c) e filtro Gaussiano e mediana (d) aplicado.

derivada parcial, de acordo com as variações das bordas. A primeira coluna da figura 7 (a) não apresenta ruído. As demais figuras 7 (b), (c) e (d) estão corrompidas por um ruído gaussiano aditivo com média zero e σ igual a 0,1-1,0-10,0 níveis de intensidade, respectivamente. O gráfico

abaixo de cada figura 7 é um perfil de intensidade horizontal, onde o nível 0 representa o preto e o 255 o branco.

A segunda coluna de cada imagem é o resultado da aplicação da primeira derivada e os respectivos perfis de intensidade. Conforme acrescenta-se o ruído, percebe-se que o gráfico da derivada se torna cada vez mais diferente se comparada à derivada original da figura 7(a). A terceira coluna refere-se às imagens resultantes da segunda derivada e os perfis de intensidade. Neste caso, percebe-se que a segunda derivada é ainda mais sensível ao ruído. A única representação que se assemelha mais ao comportamento original é a figura 7 (b) com um ruído de $\sigma = 0,1$. Para as demais seria difícil detectar seus componentes positivos e negativos, que são características úteis da segunda derivada para a detecção de borda.

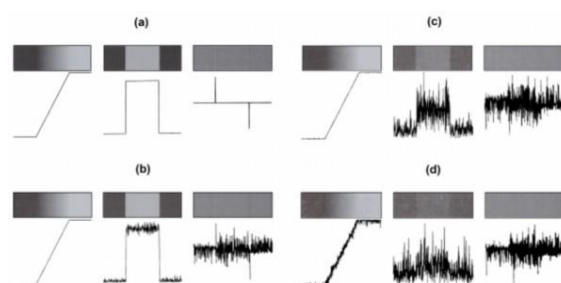


Figura 7. Imagens de bordas em declives submetidas a um ruído gaussiano, os resultados da aplicação da derivada de primeira ordem, os resultados da aplicação da derivada de segunda ordem e os respectivos perfis de intensidade para cada caso: (a) Ruído com desvio padrão de 0,0; (b) Ruído com desvio padrão de 0,1; (c) Ruído com desvio padrão de 1,0; (d) Ruído com desvio padrão de 10,0.

Portanto, convencionou-se que a utilização de dois filtros de suavização permitiria a melhor detecção das bordas. Assim, após a aplicação do filtro Gaussiano e em seguida o filtro de mediana, o resultado obtido é mostrado na figura 6 (d). Visualmente, a figura 6(b), (c) e (d) não apresentam diferenças exorbitantes, porém, os pixels de fundo estão relativamente mais suaves, isto é, sem mudanças bruscas na coloração como na imagem original (figura 6 (a)) e, ao mesmo tempo, os pixels do jato contrastando com os pixels do fundo. As imagens com essas características obtiveram um excelente resultado na etapa de delimitação das retas para o cálculo do ângulo.

A figura 8 ilustra o impacto que os filtros Gaussiano e de mediana geram para o resultado final das imagens. Esse resultado é devido à sensibilidade ao ruído das derivadas parciais aplicadas no processo de filtragem com os respectivos filtros. Na figura 8 (a) é mostrado a aplicação apenas de filtro

Gaussiano, figura 8 (b) aplicação apenas de filtro mediana e figura 8 (c) aplicação da combinação dos filtros Gaussiano e mediana.

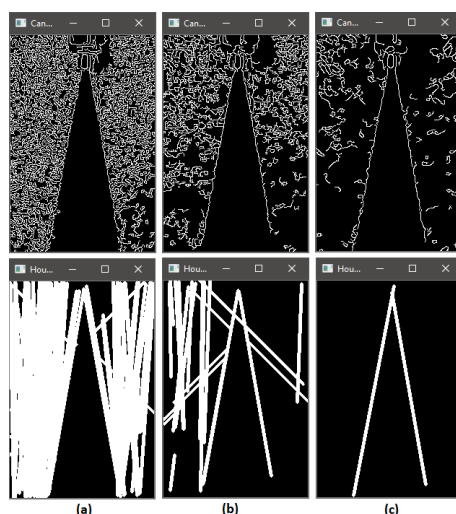


Figura 8. Imagem da ROI e os resultados do processamento após aplicação de filtro Gaussiano (a); após aplicação de filtro de mediana (b) e filtro Gaussiano e mediana aplicados simultaneamente (c).

Para obter a equação da reta que delimita o formato do jato, a Transformada de Hough foi aplicada na imagem resultante após os filtros de suavização e segmentação. A Transformada de Hough, disponível na biblioteca OpenCV utilizada, retorna de forma simplificada dois pontos para cada reta encontrada. Assim, é possível trabalhar algebricamente com a reta extraindo as informações pertinentes, como o coeficiente angular.

Com essas retas obtidas, o algoritmo desenvolvido determina o ângulo que o jato apresenta e obtém características, tais como a distância de pulverização. Assim, após as etapas de detecção da ROI, pré-processamento e a delimitação das retas que originam o jato, estudou-se a posição relativa entre as duas retas. A ideia central para o cálculo do ângulo entre as duas retas delimitadas é a relação trigonométrica existente entre duas retas concorrentes em um plano. A figura 9 mostra a relação entre duas retas que se interceptam formando um ângulo θ entre si.

Por relação geométrica, é possível inferir que $\beta = \alpha + \theta$. Aplicando relação de tangente em ambos os lados, temos que $\text{tg}(\theta) = \text{tg}(\beta - \alpha)$. Definindo m_r como a inclinação da reta r e, portanto a tangente do ângulo β , e definindo m_s como a inclinação da reta s e, portanto a tangente do ângulo α , o valor do ângulo θ é conforme mostrado equação 1.

$$\theta = \arctg \frac{m_r - m_s}{1 + m_r m_s} \quad (1)$$

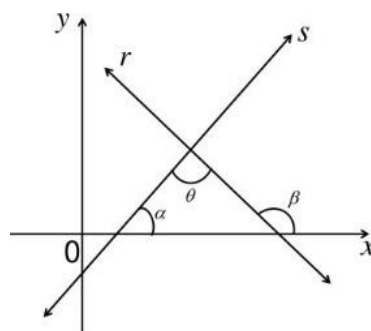


Figura 9. Posição relativa entre duas retas concorrentes.

Com o ângulo de referência calculado, foi possível obter a distância de pulverização com uma aproximação esquemática do modelo real. Como apresentado na figura 10, a imagem do jato pode ser aproximada de um triângulo retângulo com um ângulo $\theta/2$, cateto adjacente como a distância de pulverização informada pelo usuário (H), o cateto oposto a metade da cobertura teórica procurada ($D/2$) e a hipotenusa uma das retas encontradas pela Transformada de Hough.

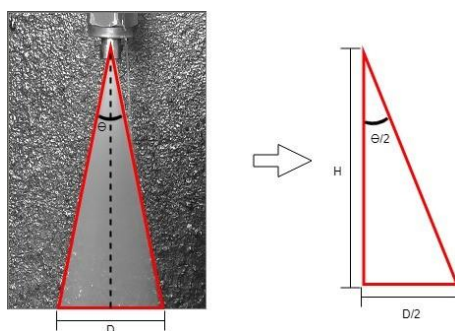


Figura 10. Relação trigonométrica para o cálculo da abertura do jato e da cobertura teórica.

Dessa forma, o valor da cobertura teórica procurado pode ser escrito como demonstrado na equação 3.

$$D = \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \cdot H \cdot 2 \quad (2)$$

$$d = \operatorname{tg} \alpha \cdot H \quad (3)$$

3. RESULTADOS

Os testes do experimento foram realizados com imagens estáticas e sequências de imagens registradas em três tipos de bicos: 3040E, DNEX 1328 e 3040EN PRO. A partir desses testes o valor médio encontrado foi de aproximadamente 20° para o ângulo calculado pelo algoritmo e cobertura teórica de pulverização de 10,22cm para uma distância de pulverização igual a 30cm informada pelo usuário.

O percentual de acerto que o classificador Haarcascade conseguiu identificar foi de aproximadamente 81% e o percentual de erros foi de aproximadamente 19%, como mostrado na tabela 1.

Foram submetidas para a etapa de pré-processamento as 63 imagens resultantes da detecção com o Haarcascade.

Tabela 1. Valores médios para o ângulo e a cobertura teórica calculada.

Falsos positivos	15
Total de imagens na base de dados	78
Percentual de erro	19,23%
Percentual de acerto	80,77%

Nesse total, 5 dessas imagens apresentaram incoerências tanto ao ângulo calculado quanto à cobertura teórica e, portanto, foram consideradas outliers. A tabela 2 apresenta esses resultados onde 100% refere-se as 63 imagens submetidas às técnicas de suavização, segmentação e extração de características.

Tabela 2. Resultados gerais para a etapa de pré-processamento.

Imagens que não apresentaram erros	58
Outliers removidos	5
Total de imagens processadas	63

Assim, o percentual de acertos das imagens submetidas e corretamente identificadas pelo classificador Haarcascade foi de 92% e de, aproximadamente, 8% de erro.

A tabela 3 mostra os resultados obtidos do vídeo. Para avaliá-lo o método desenvolvido foi aplicado a uma sequência de imagens, com as mesmas características das imagens isoladas, obtido na etapa de aquisição de imagem. O vídeo contém originalmente 30 frames/segundo e com resolução em HD (1280x720pixels) de 14 segundos. Foram processados 219 frames no total resultando em uma taxa de processamento de 15,64 frames/segundo (50% do vídeo original). Destes 219 frames processados, 97 apresentaram erro de detecção da ROI e 29 apresentaram erro de cálculo do ângulo e da cobertura teórica resultando, portanto, em 93 frames válidos. Com isto, obtivemos uma taxa de acerto de 42,47% que a priori pode parecer um valor baixo.

Tabela 3. Percentual de erros e acertos do pré- processamento para os testes em vídeo.

	DNEX1328	TC3040E	TC3040ENPRO
Taxa de frames/segundo	15,64	12	15,62
Frames processados	219	156	15,62
Erro Haarcascade	97	55	143
Erro cálculo parâmetros	29	12	24
Frames válidos	93	89	83
Percentual de acerto do método	42,47%	33,2%	57,05%
Percentual de acerto do algoritmo para cálculo dos parâmetros	76,22%	77,57%	88,12%
Ângulo médio calculado	21,01°	19,25°	18,57°
Cobertura média teórica calculada	10,75cm	8,67cm	9,18cm

Entretanto, considerando um cenário com o tempo de monitoramento de análise igual a 60 segundos, a taxa de 42,47% é equivalente a 36 segundos consecutivos de defeito apresentado pelo jato. Ou seja, utilizando o método atuando em tempo real, é possível detectar que o jato apresenta algum tipo de defeito em até 36 segundos.

Outra análise importante a ser feita é em relação ao percentual de acertos do algoritmo para o cálculo do ângulo e da distância de pulverização sobre o total de frames sem erro de detecção. Dos 219 frames processados 97 apresentaram erro de detecção, portanto, 122 imagens foram de fato submetidas ao algoritmo para o cálculo. Destas, 93 foram calculadas representando assim em 76,23% de acerto em relação às imagens que de fato foram calculadas pelo algoritmo.

4.CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um método para auxiliar o processo de análise dos bicos pulverizadores a partir dos jatos emitidos em bancada de teste. Desse modo, o principal objetivo foi alcançado, uma vez que foi possível medir parâmetros essenciais para a avaliação do jato emitido.

Outros objetivos também foram alcançados, uma vez que o método desenvolvido foi capaz de detectar a região de interesse, delimitar segmentos de retas, representando as bordas do jato emitido, e calcular os parâmetros como o ângulo e a cobertura teórica para auxiliar o avaliador. A implementação foi capaz de reconhecer os jatos tanto em imagens quanto em sequências de imagens capturadas em tempo real.

O desenvolvimento desse projeto apresentou algumas dificuldades, principalmente na etapa de aquisição de imagens reais para compor a base de dados. Impactando, assim, em uma análise minuciosa dos valores calculados em relação ao manual técnico disponibilizado pelas empresas fornecedoras. Entretanto, a detecção da região de interesse e o processamento de forma simplificada da imagem demonstrou a viabilidade em aplicar a visão computacional acoplada às técnicas de PDI para elaborar um processo de avaliação mais otimizado. Os experimentos realizados mostraram que é possível contribuir, utilizando Visão Computacional e técnicas de Processamento Digital de Imagens, na análise dos bicos pulverizadores.

REFERÊNCIAS

- Araujo, G.M. (2010). Algoritmo para reconhecimento de características faciais baseado em filtros de correlação. Master's thesis. PPEE-UFRJ.
- Araújo, S.A.d. (2009). Casamento de padrões em imagens digitais livre de segmentação e invariante sob transformações de similaridade. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Azevedo, E., Conci, A., and Leta, F.R. (2010). Computação gráfica-volume 2: Teoria e prática, volume 2. Elsevier Brasil.
- Barelli, F.(2018). Introdução á Visão Computacional. Uma abordagem prática com Python e OpenCV, vo- lume 1. Casa do Código, Rua Vergueiro, 3185 - 8o andar. São Paulo., 1a edição edition.
- Bento, D.D.S. (2016). Técnicas de processamento de imagens para reconhecimento e análise da propagação de trincas em chapas de aço.
- Gonzales, Rafael C. e Woods, R.E. (2010). Processamento Digital de Imagens, volume Único. Pearson, Limão - São Paulo - SP, 3a edição edition.
- Lienhart, R. and Maydt, J. (2002). An extended set of haar-like features for rapid object detection. volume 1, 1–900. doi:10.1109/ICIP.2002.1038171.
- Martins, L.A.d.O. (2010). Sistema de Inspeção Visual Automática Aplicado á Detecção de Defeitos emAços Laminados. Ph.D.thesis,Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFETMG.
- Queiroz, L.C.L. (2015). Classificação das amostras do ensaio de Baumann através do processamento digital de imagens. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Rebouças Filho, P.P., dos Santos, J.C., Freitas, F.N.C., de Araújo Rodrigues, D., Ivo, R.F., Herculano, L.F.G., and de Abreu, H.F.G. (2017). New approach to evaluate a non-grain oriented electrical steel electromagnetic performance using photomicrographic analysis via digital image processing. Journal of Materials Research and Technology.
- Salis, Turíbio Tanus e Pereira, G.A.S. (2007). Contagem automática de tarugos de aço por meio de visão computacional (01).
- Systems, S. (2010).Por que a escolha certa do fabricante de bicos de pulverização é essencial nasiderurgia?[online]disponívelem:<https://www.spray.com.br/conteudotecnico/bicosdepulverizacao.aspx> acessado em 04/12/2018. LI025.
- Viola, P. and Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. CVPR 2001, volume 1, 511–528. IEEE.

Capítulo 5



10.37423/230808076

MODELAGEM NO DOMÍNIO DO TEMPO, SOLUÇÃO VIA TRANSFORMADA DE LAPLACE E ANÁLISE DAS FORMAS DE ONDA DE CIRCUITO ELÉTRICO RLC CHAVEADO

Otávio Amaro de Paula dos Santos

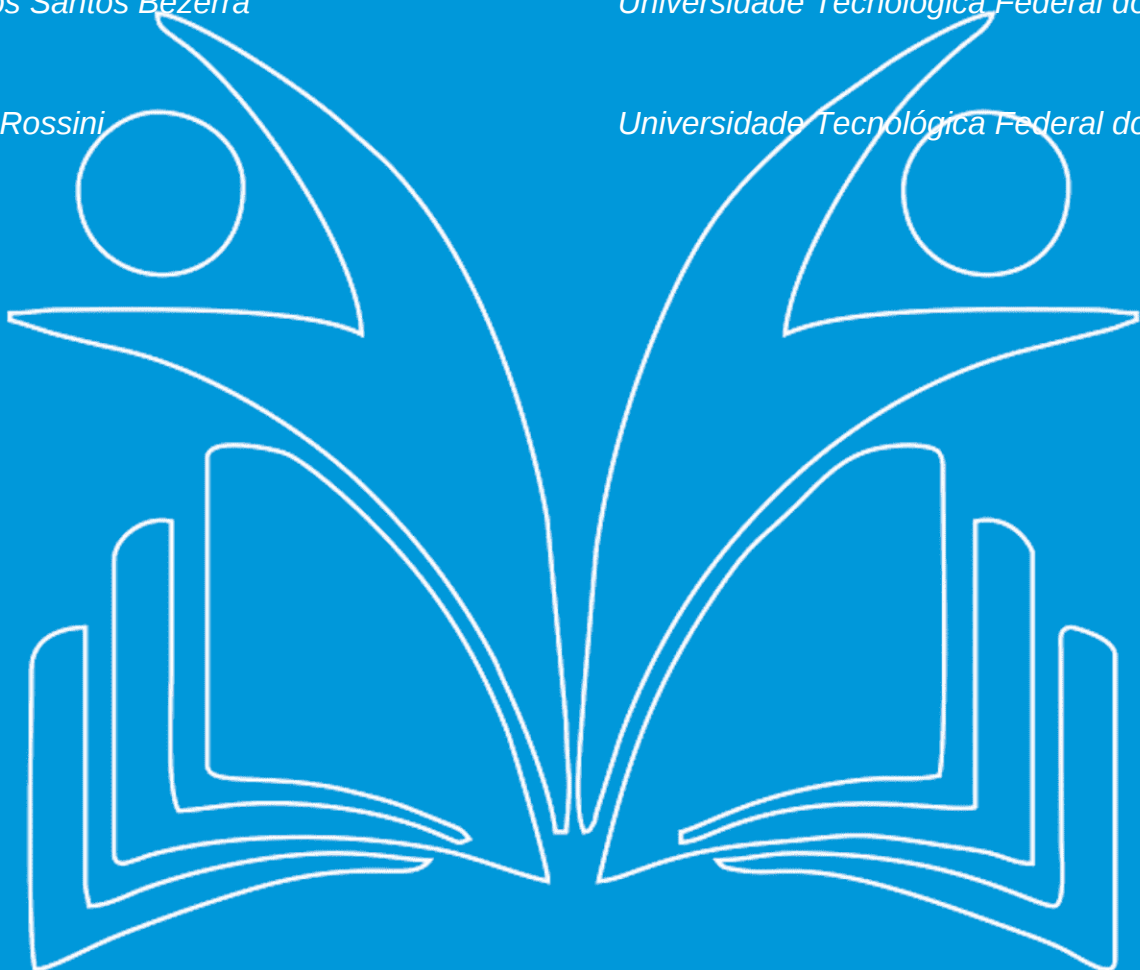
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Matheus dos Santos Bezerra

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Flávio Luiz Rossini

Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Resumo: O artigo propõe a modelagem no domínio do tempo contínuo de um circuito elétrico passivo RLC, solução a partir da transformada de *Laplace* e análise das formas de ondas das correntes elétricas e das tensões por meio dos softwares Matlab® e LTspice®. Diante do novo contexto industrial denominado de Indústria 4.0, há necessidade de comunicação de todos os processos e etapas nas fábricas e nos comércios. Logo, emerge a necessidade de interconexão de todos os dispositivos e equipamentos, dessa forma há necessidade de quantificar e analisar o comportamento de sistemas dinâmicos. Assim, foram estabelecidas as seguintes etapas de desenvolvimento do presente artigo: (I) modelagem do sistema dinâmico no domínio do tempo; (II) aplicação da Transformada de *Laplace*; (II-A) elaboração das simulações no software Matlab® a partir das soluções fechadas; (III) simulação do circuito chaveado no software LTspice®; e (IV) validação e análise das formas de onda. O trabalho proposto, contribui para estudantes, engenheiros e profissionais na área de engenharia elétrica, com a apresentação do modelo, a solução do sistema de equações diferenciais e a checagem por meio de dois softwares reconhecidos na área de tecnologia e desenvolvimento.

Palavras-chave: Transformada de *Laplace*. Equações diferenciais. Circuitos elétricos. Circuito chaveado.

I .INTRODUÇÃO

Conforme ocorre a evolução da tecnologia, desde as primeiras revoluções industriais, os engenheiros demandavam de modelos matemáticos para usar em projetos e sanar necessidades da indústria [1]. Atualmente, com o crescimento em larga escala da tecnologia nas indústrias e nas residências, surge a demanda da comunicação entre todas as áreas da tecnologia para solucionar os problemas, onde surge a era da indústria 4.0 [1].

Mediante a evolução da indústria 4.0, há demanda de diversos métodos e modelos matemáticos para uso na automação e comunicação de equipamentos. Contudo, o símbolo de tecnologia são os robôs indústria e esses, por sua vez, demandam de modelagem, simulação e projetos de sistemas de controle [2] - [16]. Outra frente de pesquisa e desenvolvimento em franca expansão é a teoria de sistemas de controle [17] - [29].

No presente artigo, utilizaram-se as leis de *Kirchhoff* para constituir o modelo dinâmico do circuito elétrico RLC [30] - [47].

A transformada de *Laplace* é uma ferramenta útil para análise de sistemas lineares, esses por sua vez obtidos por meio da modelagem matemática. Assim, a transformada *Laplace* pode ser usada para solução e análise de circuitos elétricos, resolução de sistema de equações diferenciais, a fim de se obter a solução fechada [30] [31].

O operador Laplaciano é uma forma de transformar o uso de fasores, desse modo leva o conjunto de equações do domínio do tempo para o domínio da frequência [2]. Sua aplicação possibilita a análise do período transitório de um circuito elétrico, o qual proporciona a compreensão do comportamento das correntes e das tensões nos domínios do tempo ou frequência [1].

Em circuitos elétricos, a transformada de *Laplace* é frequentemente utilizada para análise de sinais transientes e quanto a estabilidade do sistema. Outro fator importante é o uso da transformada para resolver os sistemas com condições iniciais, nos quais se aplica a propriedade da transformada de derivadas. Tal transformação permite o uso de equações algébricas, no domínio da frequência, o que possibilita a manipulação de equações algébricas e não equações diferenciais [1][2].

Neste artigo, realizou-se a aplicação da transformada de *Laplace* num sistema de equações diferenciais obtidas por meio da modelagem matemática de um circuito elétrico. Abordaram-se algumas propriedades da transformada e seu caráter operacional na resolução de problemas do meio elétrico, sendo possível ser aplicada em outras áreas da engenharia. Além disso, foi exposto como a

transformada pode ser empregada na resolução de um circuito elétrico, no qual ocorre a comutação de uma chave, o que pode alterar a topologia do circuito e a consideração de condições iniciais para a nova estrutura do circuito [30] [31] [33].

Os resultados obtidos foram checados e validados a partir de *softwares* reconhecidos no meio acadêmico. O *software* LTspice® simulador de circuitos elétricos para obtenção de formas de onda das correntes e das tensões. O *software* Matlab®, usado na construção e comparação das formas de onda da solução fechada obtidas por meio da aplicação das transformadas de Laplace, aos resultados da simulação do *software* LTspice®. Portanto, foram expostas as conclusões obtidas na análise do comportamento transitório e estacionário do circuito por meio da solução fechada e simuladas nos respectivos *softwares*.

Organizou-se o artigo do seguinte modo: na Seção II, relatou-se sobre a fundamentação teórica da transformada de Laplace e a transformada inversa; nas Seções II-A, II-B e II-C, apresentaram-se dos teoremas usados da transformada de Laplace; na Seção III, mostrou-se a aplicação dos teoremas de Diferenciação e Integração no tempo; na Seção IV, desenvolveu-se a aplicação da transformada de Laplace na resolução do sistema de um circuito elétrico chaveado; na Seção V, descreveram-se os resultados obtidos no trabalho.

II TRANSFORMADA DE LAPLACE

A transformada de Laplace bilateral é uma ferramenta matemática avançada para resolver sistemas lineares e contínuos no tempo, sendo as soluções encontradas no domínio do tempo ou da frequência complexa. A transformada foi criada por *Pierre Simon Laplace* com o intuito de resolver equações diferenciais [30] [31].

A simbologia da transformada de Laplace, expressa por:

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} \quad (1)$$

sendo s a variável complexa, t o tempo contínuo, $f(t)$ a função no domínio do tempo e $F(s)$ a transformada de Laplace de [30] [31].

A transformada de Laplace bilateral de uma função $f(t)$ é definida como [30] [31] :

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2)$$

A transformada de Laplace unilateral, é um caso especial da transformada de Laplace bilateral, em que o limite inferior é zero.

Dessa forma, a transformada de Laplace unilateral de uma função $f(t)$, pode ser expressa como [30] [31]:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (3)$$

A partir da função transformada, $F(s)$, torna-se necessário retornar para uma representação temporal, assim sugere a necessidade de um arranjo para a obtenção da transformada de Laplace inversa [30] [31].

Simbologia da transformada de Laplace inversa dada por:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} \quad (4)$$

A transformada de Laplace inversa de uma função $F(s)$ pode ser obtida por meio da definição [30] [31]:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\alpha-j\infty}^{\alpha+j\infty} F(s)e^{-st} dt \quad (5)$$

sendo α um número real para convergência da Eq. (5).

A seguir, aplicou-se a transformada de Laplace para uma função $u(t)$, definida como:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

ao substituir essa última na Eq. (2), obtém-se:

$$\mathcal{L}\{u(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-st} dt \quad (6)$$

Ao substituir a definição de $u(t)$ na Eq. (6), obtém-se:

$$\mathcal{L}\{u(t)\} = \int_0^{\infty} 1e^{-st} dt \quad (7)$$

A partir da Eq. (7) realizou-se a integração e obteve-se:

$$F(s) = -\frac{1}{s} e^{-st} \Big|_0^{\infty} \quad (8)$$

Após calcular dos limites da Eq. (8), adquiriu-se:

$$F(s) = \frac{1}{s} \quad (9)$$

A partir da necessidade de facilitar a aplicação da transformada, criou-se uma tabela de transformadas de Laplace para sintetizar os resultados.

II-A. TABELA DE TRANSFORMADAS DE LAPLACE

Tabela 1 - Transformadas de Laplace

$f(t)$	$\leftrightarrow$	$F(s)$
$\delta(t)$	$\leftrightarrow$	1
$u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{1}{s}$
$t^n u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$e^{bt} u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{1}{s-b}$
$te^{bt} u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{1}{(s-b)^2}$
$\cos(bt) u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{s}{s^2 + b^2}$
$\text{sen}(bt) u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{b}{s^2 + b^2}$
$\cosh(bt) u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{s}{s^2 - b^2}$
$\sinh(bt) u(t)$	$\leftrightarrow$	$\frac{b}{s^2 - b^2}$

A transformada de Laplace possui diversas propriedades que auxiliam na simplificação dos cálculos e na resolução de problemas que surgem na matemática e na engenharia. No presente artigo, foram abordados os principais teoremas utilizados em cálculo de transformadas [30] [31].

II-B DESLOCAMENTO NO TEMPO E FREQUÊNCIA

A propriedade de deslocamento temporal é aplicada em funções que possuem um deslocamento no tempo [30] [31]. Assim, é estabelecido pelo teorema de deslocamento no tempo que uma função $f(t)$ pode ser descrita como $f(t-a)$, sendo a o deslocamento no tempo. A função transformada do deslocamento é dada por $F(s)$ multiplicada por e^{-as} , que representa o deslocamento, expresso por:

$$\mathcal{L}\{f(t-a)\} = F(s)e^{-as} \quad (10)$$

O deslocamento na frequência de uma função $F(s)$, descrita como $F(s-a)$, é dado por:

$$\mathcal{L}\{f(t)e^{at}\} = \int_0^\infty f(t)e^{at} e^{-st} dt = F(s-a) \quad (11)$$

II-C DIFERENCIAÇÃO E INTEGRAÇÃO NO TEMPO

A propriedade de diferenciação no tempo permite a análise de sistemas dinâmicos de tempo contínuo [30] [31].

A diferenciação é representada por:

$$\frac{df(t)}{dt} = sF(s) - f(0) \quad (12)$$

A aplicação repetida da diferenciação pode ser descrita como:

$$\frac{d^n f(t)}{dt^n} = s^n F(s) - \sum s^{n-k} f^{(k-1)}(0) \quad (13)$$

A integração no tempo permite a soma de uma função ao longo do tempo, da forma:

$$\int_0^t f(\tau) d\tau = \frac{F(s)}{s} \quad (14)$$

A versão da Eq. (14) com condições iniciais, dada por:

$$\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau = \frac{F(s)}{s} + \frac{\int_{-\infty}^0 f(\tau) d\tau}{s} \quad (15)$$

A aplicação da diferenciação e integração no tempo é utilizada na análise e modelagem matemática de sistemas dinâmicos, como em circuitos elétricos. Diante desse pressuposto, as propriedades da transformada foram utilizadas no sistema de equações diferenciais, obtidas por meio da descrição matemática do sistema [30] [31].

III. PROPRIEDADES DA TRANSFORMADA DE LAPLACE APLICADA A CIRCUITOS ELÉTRICOS

Frequentemente encontra-se em circuitos elétricos componentes como resistores, indutores e capacitores. A transformada de Laplace pode ser aplicada a estes componentes juntamente com as propriedades de diferenciação e integração no tempo [30] [31].

Nos componentes elétricos essas propriedades são utilizadas para obter a descrição em função da frequência [30] [31].

A equação diferencial do indutor para a corrente é obtida através da sua derivada em função do tempo, descrita por [30] [31]:

$$i(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (16)$$

Ao aplicar a transformada de Laplace no indutor, Eq. (12), obteve-se:

$$I(s) = LsI(s) - i(0) \quad (17)$$

A equação do indutor para obter a corrente origina-se da primeira derivada em função do tempo e o cálculo da tensão a partir da segunda derivada da carga elétrica, expressa por:

$$v(t) = L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} \quad (18)$$

Ao aplicar a Eq. (13), na equação diferencial da carga no indutor, Eq. (18), origina a equação dada por:

$$V(s) = Ls^2 Q(s) - sq(0) - \frac{dq(t)}{dt} \quad (19)$$

A fim de calcular a transformada de Laplace para a corrente do capacitor, o equacionamento é obtido pela integral, da forma:

$$i(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (20)$$

Ao aplicar a propriedade Eq. (15) na Eq. (20), obtém-se a descrição em função da frequência do capacitor para o cálculo da corrente, expresso por:

$$I(s) = \frac{1}{C} \frac{I(s)}{s} + \frac{V_c(0)}{s} \quad (21)$$

A equação do capacitor para a tensão em função do tempo, representada por:

$$v(t) = \frac{1}{C} q(t) \quad (22)$$

Assim, a transformada de Laplace aplicada na Eq. (22), obtém-se:

$$V(s) = \frac{1}{C} Q(s) \quad (23)$$

Em contrapartida, a equação diferencial do resistor para calcular a corrente por meio da transformada de Laplace mostra-se mais simples, quando comparado com os outros dois componentes já apresentados, expressa por:

$$i(t) = Ri(t) \quad (24)$$

E sua transformada é constituída pelo retorno do valor da resistência multiplicado pela corrente em função da frequência, da forma:

$$I(s) = RI(s) \quad (25)$$

Para determinar a equação da tensão do resistor em função da carga, sua representação na forma diferencial é dada por:

$$v(t) = R \frac{dq(t)}{dt} \quad (26)$$

A transformada da Eq. (26), por ser escrita como:

$$V(s) = RsQ(s) - q(0) \quad (27)$$

IV.APLICAÇÃO

A transformada de Laplace foi aplicada a um circuito RLC passivo chaveado, para o qual antes do tempo zero a chave está aberta e todas as condições iniciais do circuito são nulas. No instante de

tempo zero, a chave do circuito foi fechada e um novo equacionamento para o circuito foi realizado, com isso obtiveram as condições iniciais para a realização dos cálculos.

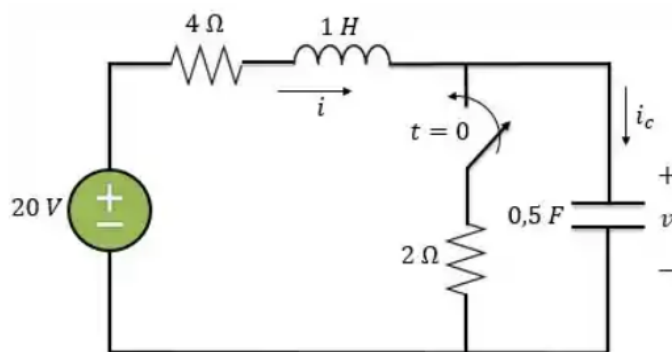


Fig. 1. Circuito RLC chaveado.

Antes do tempo zero, instante em que a chave fecha, o sistema é formado apenas pelo resistor com 4Ω , o indutor com $1H$ e o capacitor com $0,5F$. Conforme mostrado na Figura 1, não flui corrente elétrica no resistor de 2Ω , assim tal ramo não é considerado para análise.

Para realizar a modelagem matemática do circuito elétrico, foram utilizados os conceitos das leis de *Kirchhoff* tanto para corrente como para tensão.

A lei das tensões afirma que a soma da diferença de potencial em uma malha fechada deve ser igual a zero, ou seja, a tensão dissipada pelos componentes do circuito será igual à tensão fornecida pela fonte.

A modelagem matemática foi obtida através do uso das equações diferenciais de cada componente. Nas equações obtidas por meio da modelagem foram aplicadas a transformada de *Laplace*. A modelagem matemática para cálculo da carga é expressa por:

$$v(t) = L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} q(t) \quad (28)$$

Para calcular a equação da corrente no circuito, partiu-se do mesmo princípio, com as equações diferenciais da corrente.

$$i(t) = L \frac{dq(t)}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (29)$$

A partir da seleção de um modelo matemático de carga Eq. (28) ou de corrente (29), foi possível aplicar a transformada, obtiveram-se as equações algébricas em função da frequência. Aplicou-se a transformada de *Laplace* inversa e computaram-se as equações do circuito em função do tempo.

Com a equação da carga em função do tempo foi possível obter a função equivalente do capacitor, que é o produto da divisão do comportamento da carga pelo valor do componente, descrito como:

$$v(t) = \frac{q(t)}{C} \quad (30)$$

Assim, tornou-se possível calcular as equações do sistema com o chaveamento aberto.

Para o cálculo da carga no capacitor, substituíram-se dos valores dos componentes apresentados na Fig. 1 na Eq. (28), da forma:

$$1 \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + 4 \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{0,5} q(t) = 20 \quad (31)$$

No cálculo da transformada da Equação (31), cujas condições iniciais são nulas, ou seja, as parcelas que surgiram foram anuladas, no indutor e no resistor. Como mostrado a seguir.

Transformada no indutor:

$$1 \frac{d^2 q(t)}{dt^2} = s^2 Q(s) - sq(0) - \frac{dq(0)}{dt} \quad (32)$$

Transformada no resistor:

$$4 \frac{dq(t)}{dt} = 4sQ(s) - q(0) \quad (33)$$

Com as condições anuladas, a transformada de Laplace da Eq. (31) para o cálculo da carga no capacitor em função da frequência foi descrita por:

$$s^2 Q(s) + 4sQ(s) + 2Q(s) = \frac{20}{s} \quad (34)$$

Ao isolar Q(s) na Eq. (34), obteve-se:

$$Q(s) = \frac{20}{s^3 + 4s^2 + 2s} \quad (35)$$

expandiu-se a Eq. (35) em frações parciais, da forma:

$$Q(s) = \frac{10}{s} + \frac{-10s - 40}{(s + 2)^2 - 2} \quad (36)$$

Outra expansão da Eq. (36) em parcelas individuais das frações, a fim de aplicar a transformada inversa de Laplace, descrita por:

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{10}{s} - \frac{10(s + 2)}{(s + 2)^2 - 2} - \frac{20}{(s + 2)^2 - 2} \right\} \quad (37)$$

Na análise da equação, foi possível identificar a existência de três transformadas para calcular, sendo possível utilizar a Tabela 1 para auxiliar nos cálculos. Além disso, a Equação (37) precisou passar por manipulações matemáticas para viabilizar a aplicação de Laplace.

A transformada da Eq. (37) pode ser reduzida da seguinte forma:

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{10}{s}\right\} - \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{10(s+2)}{(s+2)^2 - 2}\right\} - \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{20}{(s+2)^2 - 2}\right\} \quad (38)$$

A transformada inversa de uma equação $\frac{1}{s}$ pode ser descrita como um $u(t)$, conforme na Tabela 1, expressa por:

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{10}{s}\right\} = 10u(t) \quad (39)$$

Nas demais parcelas da Eq. (37), encontrou-se um deslocamento na frequência, o qual, segundo o teorema Eq. (11), pode ser descrito como $e^{\alpha t}$, sendo α o deslocamento que aparece junto a variável complexa. Assim, foi possível reescrever as duas parcelas como:

$$e^{-2t} \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{10s}{s^2 - s} - \frac{20}{s^2 - 2}\right\} \quad (40)$$

Referente a Tabela 1, a equação geral que representa um cosseno hiperbólico, foi dada por:

$$\cosh(bt) = \frac{s}{s^2 - b^2} \quad (41)$$

E a equação geral para um seno hiperbólico por:

$$\sinh(bt) = \frac{b}{s^2 - b^2} \quad (42)$$

Para aplicar as Equações (41) e (42), foi necessário manipular a Eq. (40), da forma.

$$e^{-2t\sqrt{2}} \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{10s}{s^2 - (\sqrt{2})^2} - \frac{20}{s^2 - (\sqrt{2})^2}\right\} \quad (43)$$

Ao considerar os cálculos da transformada Laplace inversa aplicada, a equação da carga foi descrita por:

$$q(t) = -10e^{-2t} \cosh(\sqrt{2}t) - 10\sqrt{2}e^{-2t} \sinh(\sqrt{2}t) + 10u(t) \quad (44)$$

A função de carga do capacitor foi descrita pela substituição da Eq. (44) e do valor do capacitor na Eq. (30):

$$v_c(t) = \frac{-10e^{-2t} \cosh(\sqrt{2}t) - 10\sqrt{2}e^{-2t} \sinh(\sqrt{2}t) + 10u(t)}{0,5} \quad (45)$$

Ao realizar a divisão por 0.5 mostrada na Eq. (45), obteve-se a equação correspondente ao valor da tensão presente no capacitor, em qualquer instante do tempo, descrita por:

$$v_c(t) = -20e^{-2t} \cosh(\sqrt{2}t) - 20\sqrt{2}e^{-2t} \sinh(\sqrt{2}t) + 20u(t) \quad (46)$$

Através do software Ltspice®, foi possível simular o circuito e obter os gráficos das formas de onda do sistema.

A fim de validar a modelagem matemática, geraram-se as respectivas curvas no *software* Matlab® e compararam-se os dados por meio de inspeção gráfica de modo sobrepostos.

O circuito construído no simulador Ltspice® possuía uma chave que ativava no momento em que recebe uma quantidade mínima de tensão. Desse modo, foi adicionado ao circuito uma fonte, cujo objetivo é de comutação da chave.

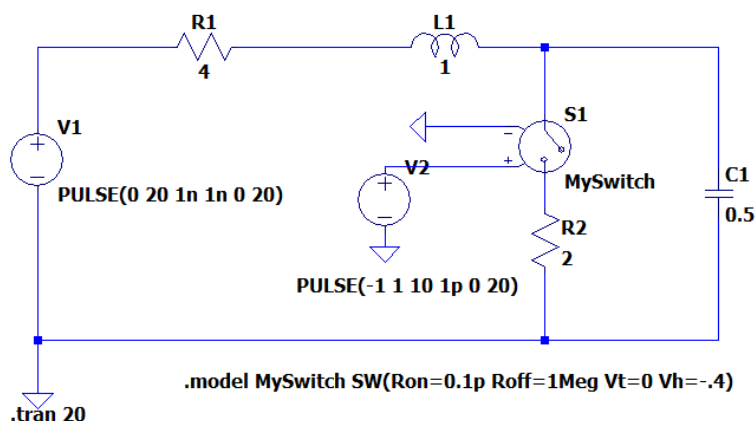


Fig. 2. Circuito no simulador Ltspice®.

Na Fig. 3, mostraram-se o comportamento da tensão no capacitor em ambos os softwares.

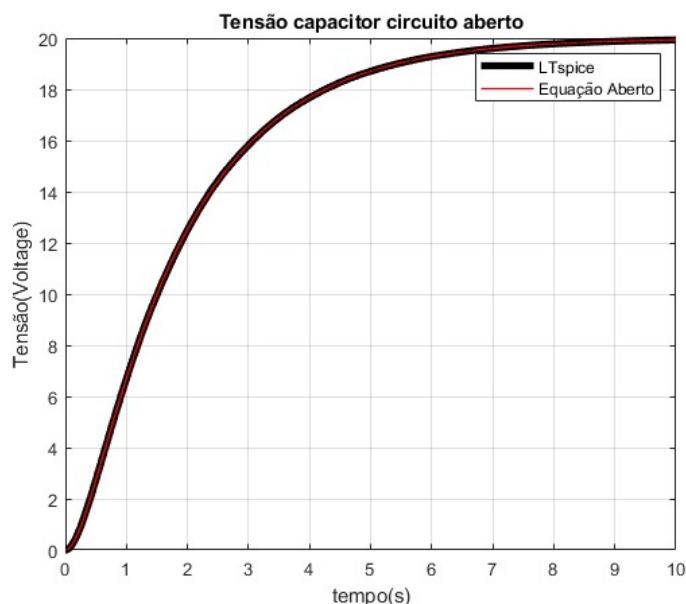


Fig. 3. Tensão no capacitor em circuito aberto, Eq. (46).

Pela análise gráfica do período transiente da tensão que percorre o capacitor, foi possível afirmar o momento em que a carga armazenada atingiu estabilidade, bem como a quantidade de carga que foi armazenada, uma vez que a tensão máxima do componente foi de 20V no tempo de 10 segundos.

Para calcular a equação algébrica da corrente existem duas maneiras: (i) calcular por meio da equação diferencial, Eq. (29), seguido da aplicação da transformada de Laplace; ou (ii) derivar a equação da carga, Eq. (44).

Assim, selecionou-se a Eq. (29), a função da corrente para o circuito aberto, em seguida foi aplicada a propriedade da equação diferencial. Como mostrado a seguir:

$$1 \frac{di(t)}{dt} + 4i + \frac{1}{0,5} \int_0^t i(\tau) d\tau = 20u(t) \quad (47)$$

A transformada do capacitor, Eq. (21), dada por:

$$\int_0^t i(\tau) d\tau = \frac{I(s)}{s} + \frac{V_c(0)}{s} \quad (48)$$

A partir da aplicação da transformada na Eq. (47), obteve-se:

$$sI(s) - i(0) + 4I(s) + \frac{2I(s)}{s} + \frac{V_c(0)}{s} = \frac{20}{s} \quad (49)$$

Ainda antes do instante zero, as condições iniciais da Eq. (49) são nulas, expresso como.

$$\left(s + 4 + \frac{2}{s}\right) I(s) = \frac{20}{s} \quad (50)$$

Ao isolar I(s) na Eq. (50) obteve-se:

$$I(s) = \frac{20}{s \left(s + 4 + \frac{2}{s}\right)} \quad (51)$$

Realizou-se a multiplicação do denominador na Eq. (51) e completou-se o quadrado, reescrito como:

$$I(s) = \frac{20}{(s + 2)^2 - 2} \quad (52)$$

Na expansão da Eq. (52) surgiu o resíduo -2 para manter a igualdade da função.

Após o arranjo matemático, usou-se a Tab. 1 de transformadas para obtenção da inversa, da forma:

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{20}{(s + 2)^2 - 2} \right\} \quad (53)$$

A Eq. (53) apresentou um deslocamento de 2, que acompanha a variável complexa s, assim substituiu-se (s+2) por s da Eq. (53) e obteve-se:

$$e^{-2t} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{20}{s^2 - 2} \right\} \quad (54)$$

Conforme a Tab. 1 de transformadas, a expressão que possuiu similaridade com Equação (54) da corrente foi a transformada do seno hiperbólico da Eq. (42). Para adequar a Equação (54), realizou-se:

$$e^{-2t\sqrt{2}}\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{20}{s^2 - (\sqrt{2})}\right\} \quad (55)$$

A partir da aplicação da transformada na Eq. (55), obteve-se a equação de corrente no indutor no circuito com a chave aberta.

$$i(t) = 10\sqrt{2}e^{-2t}\sinh(\sqrt{2}t) \quad (56)$$

Assim, desenvolveu-se a comparação dos gráficos da corrente da equação com os simuladores, ilustrado na Fig. 4.

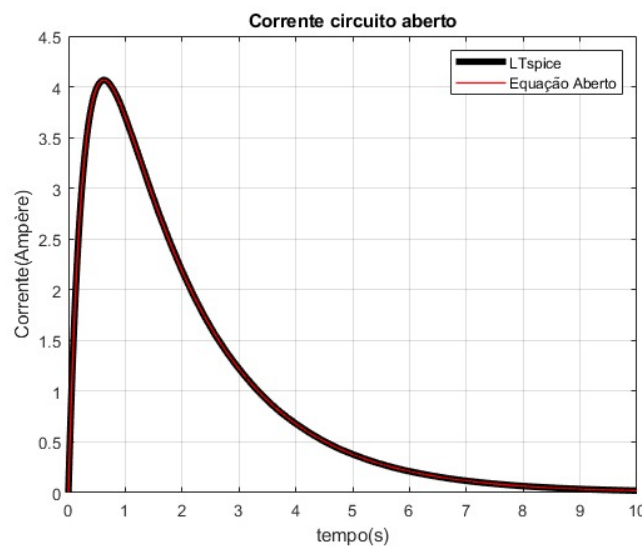


Fig. 4. Corrente total do circuito aberto, Eq (56)

Por meio da análise gráfica do comportamento da corrente no período transiente, afirma-se que a corrente se estabilizou em 10 segundos em 0A . No entanto, o ponto máximo atingido pela corrente foi no instante de 0.6 segundos, com um valor de 4.064A . Após dez segundos de funcionamento do circuito elétrico, comutou-se a chave e o circuito apresentou duas malhas com condições iniciais no indutor e no capacitor.

Para chegar as condições iniciais bastou aplicar o limite de $t \rightarrow \infty$ nas equações de corrente do indutor, Eq. (56), e tensão no capacitor, Eq. (46). Para a tensão do capacitor, obteve-se:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_c(t) = 20V \quad (57)$$

E para a corrente no indutor:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i(t) = 0A \quad (58)$$

Assim, as condições iniciais do circuito para a tensão no capacitor foi de 20V e a corrente no indutor foi de 0A.

A Modelagem matemática da Malha 1, pode ser escrita como:

$$R_1 i_1(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} + R_2 [i_1(t) - i_2(t)] = 20u(t) \quad (59)$$

Aplicou-se a transformada na Eq. (59), adquiriu-se:

$$4I_1(s) + 4sI_1(s) - i(10) + 2[I_1(s) - I_2(s)] = \frac{20}{s} \quad (60)$$

Ao substituir $i(10)=0$ na Eq. (60) obteve-se:

$$(6 + s)I_1(s) - 2I_2(s) = \frac{20}{s} \quad (61)$$

A Modelagem matemática da Malha 2, resultou em:

$$R_2 [i_2(t) - i_1(t)] + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = 0 \quad (62)$$

Usou-se a transformada na Eq. (62) e obteve-se:

$$2[I_2(s) - I_1(s)] + \frac{1}{0,5} \frac{I_2(s)}{s} + \frac{v_c(10)}{s} = 0 \quad (63)$$

Ao substituir a condição inicial $V_c(10)=20$ na Eq. (63) adquiriu-se:

$$-2I_1(s) + \left[2 + \frac{2}{s}\right] I_2(s) = -\frac{20}{s} \quad (64)$$

A partir das Equações (61) e (64), as equações foram organizadas na forma de um sistema matricial.

$$\begin{bmatrix} (6 + s) & -2 \\ -2 & (2 + \frac{2}{s}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{20}{s} \\ -\frac{20}{s} \end{bmatrix} \quad (65)$$

Para resolver um circuito com duas ou mais malhas, utiliza-se a regra de *Cramer*, esse é um método simples utilizado na resolução de sistemas de equações lineares.

Primeiramente, calculou-se o coeficiente de *Cramer*, da forma:

$$\Delta = \begin{vmatrix} (6 + s) & -2 \\ -2 & (2 + \frac{2}{s}) \end{vmatrix} \quad (66)$$

Calculou-se o determinante da Eq. (66) e obteve-se:

$$\Delta = \frac{6(2s + 2)}{s} + 2s - 2 \quad (67)$$

Para calcular o coeficiente de *Cramer* da corrente I_1 , realizou-se a substituição dos termos independentes do Sistema (66) na primeira coluna, da forma:

$$\Delta I_1 = \begin{bmatrix} \frac{20}{s} & -2 \\ -\frac{20}{s} & (2 + \frac{2}{s}) \end{bmatrix} \quad (68)$$

Computou-se o determinante, Eq. (68) e obteve-se:

$$\Delta I_1 = \frac{20(2s + 2)}{s^2} - \frac{40}{s} \quad (69)$$

O cálculo do coeficiente de Cramer para a corrente I_2 é análogo a I_1 , descrito da seguinte forma:

$$\Delta I_2 = \begin{bmatrix} (6 + s) & \frac{20}{s} \\ -2 & -\frac{20}{s} \end{bmatrix} \quad (70)$$

A partir do cálculo do determinante da Eq. (70), obteve-se:

$$\Delta I_2 = -\frac{80}{s} - 20 \quad (71)$$

A partir da definição de *Cramer*, a equação da corrente da malha 1, foi obtida pela divisão:

$$I_1 = \frac{\Delta I_1}{\Delta} \quad (72)$$

sendo ΔI_1 Equação (69), dividida por Δ Equação (67), ao substituir, obtém-se:

$$I_1(s) = \frac{\frac{20(2s + 2)}{s^2} - \frac{40}{s}}{\frac{6(2s + 2)}{s} + 2s - 2} \quad (73)$$

A partir de arranjos matemáticos na Eq. (73), obteve-se a equação da corrente que flui pela malha 1 em função da frequência:

$$I_1(s) = \frac{20}{s(s + 2)(s + 3)} \quad (74)$$

Aplicou-se a transformada inversa na Eq. (74), expressa por:

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{20}{s(s + 2)(s + 3)} \right\} \quad (75)$$

Ao expandir em frações parciais da Equação (75) obteve-se:

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{10}{3s} - \frac{10}{s + 2} + \frac{20}{3(s + 3)} \right\} \quad (76)$$

Separou-se em três transformadas individuais e evidenciaram-se as constantes da Eq. (75), como:

$$\frac{10}{3} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \right\} - 10 \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s + 2} \right\} + \frac{20}{3} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s + 3} \right\} \quad (77)$$

A partir do cálculo da primeira transformada da Eq. (77), obteve-se:

$$\frac{10}{3} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \right\} = \frac{10}{3} u(t) \quad (78)$$

Para a função e^{at} , a transformada foi calculada do modo:

$$e^{at} = \frac{1}{s - a} \quad (79)$$

Aplicada a transformada no restante da Eq. (77), obteve-se:

$$-10\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{10}{s+2}\right\} + \frac{20}{3}\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s+3}\right\} = \frac{20}{3}e^{-3t} - 10e^{-2t} \quad (80)$$

A transformada de Laplace inversa aplicada à Eq. (77) resultou na equação em função do tempo da corrente que flui na malha 1 do circuito:

$$i_1(t) = \frac{20}{3}e^{-3t} - 10e^{-2t} + \frac{10}{3}u(t) \quad (81)$$

Na Fig. 5, apresenta-se o comportamento temporal da corrente na malha 1:

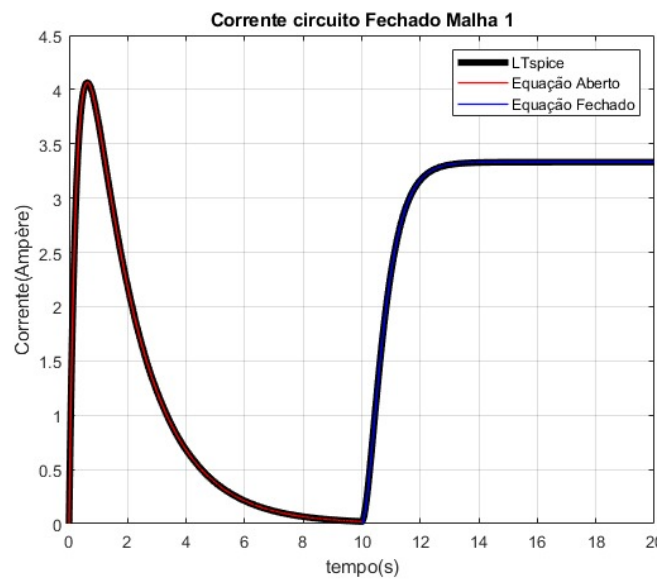


Fig. 5. Corrente da malha 1, Eq (56) e (81).

No momento em que a chave fechou, a corrente que flui na malha 1 do circuito sofreu uma rápida alteração de magnitude, conforme ilustrou-se na Fig. 5. Após 4,6 segundos do chaveamento sua estabilidade foi alcançada e o novo valor da corrente foi de 3,33A .

Para o cálculo da equação de corrente na malha 2, realizou-se o equacionamento por meio de *Cramer* análogo a Eq. (72), da forma:

$$I_2 = \frac{\Delta I_2}{\Delta} \quad (82)$$

Substituiu-se as Equações (67) e (71) na Equação (82), obtém-se:

$$I_2(s) = \frac{-\frac{80}{s} - 20}{\frac{6(2s+2)}{s} + 2s - 2} \quad (83)$$

Manipulou-se matematicamente a Eq. (83), a corrente na malha 2 em função da frequência pode ser reescrita como:

$$I_2(s) = -\frac{10(s+4)}{(s+2)(s+3)} \quad (84)$$

Expandiu-se em frações parciais a Eq. (84) e obteve-se:

$$I_2(s) = -\frac{20}{s+2} + \frac{10}{s+3} \quad (85)$$

Para a obtenção da equação da corrente em função do tempo na malha 2, aplicou-se a transformada Laplace inversa na Eq. (85), descrita por:

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{-\frac{20}{s+2} + \frac{10}{s+3}\right\} \quad (86)$$

A partir da Eq. (86), realizou-se a transformada inversa e obteve-se a equação da corrente na malha 2:

$$i_2(t) = 10e^{-3t} - 20e^{-2t} \quad (87)$$

Na Fig. 6, ilustrou-se a representação temporal da corrente na malha 2, Eq. (87).

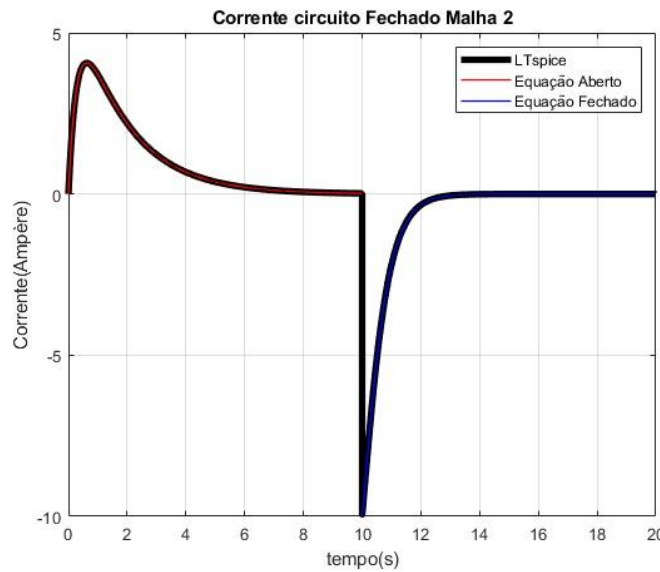


Fig. 6. Corrente na malha 2, Eq (56) e (87).

A corrente elétrica da segunda malha que em regime permanente antes da comutação da chave era nula, atingiu o ponto mínimo instantaneamente, no momento em que ocorreu a comutação da chave. Essa corrente alcançou valor de 10A , após 4,6 segundos do tempo de chaveamento, retornou para 0A .

Para o cálculo da equação de tensão no capacitor foi necessário utilizar a Eq. (30), na qual $i(\tau)$ foi substituída por $i_2(\tau)$ e resultou em:

$$v_c(t) = \frac{1}{0,5} \int_0^t i_2(\tau) d\tau \quad (88)$$

Ao aplicar a transformada de Laplace na Eq. (88), expressa por:

$$V_c(s) = \frac{I_2(s)}{0,5s} + \frac{V_c(10)}{s} \quad (89)$$

Substituiu-se a $I_2(s)$, calculada na Equação (83), cuja condição inicial é $v_c(10)$ a tensão no capacitor, no instante de tempo em que a chave se fechou, obteve-se:

$$V_c(s) = -\frac{20(s+4)}{s(s+2)(s+3)} + \frac{20}{s} \quad (90)$$

Expandiu-se a Eq. (90) em frações parcial e obteve-se:

$$V_c(s) = -\frac{40}{3s} + \frac{20}{s+2} - \frac{20}{3(s+3)} \quad (91)$$

Desse modo, aplicou-se a transformada inversa da Eq. (91) e reescreveu-se como:

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ -\frac{40}{3s} + \frac{20}{s+2} - \frac{20}{3(s+3)} \right\} \quad (92)$$

Além disso, obteve-se a equação da tensão no capacitor em função do tempo a partir do momento em que a chave fecha, dada por:

$$v_c(t) = 20e^{-2t} - \frac{20}{3}e^{-3t} + \frac{20}{3}u(t) \quad (93)$$

Na Fig. 7, ilustra-se o comportamento da tensão no capacitor com a chave fechada.

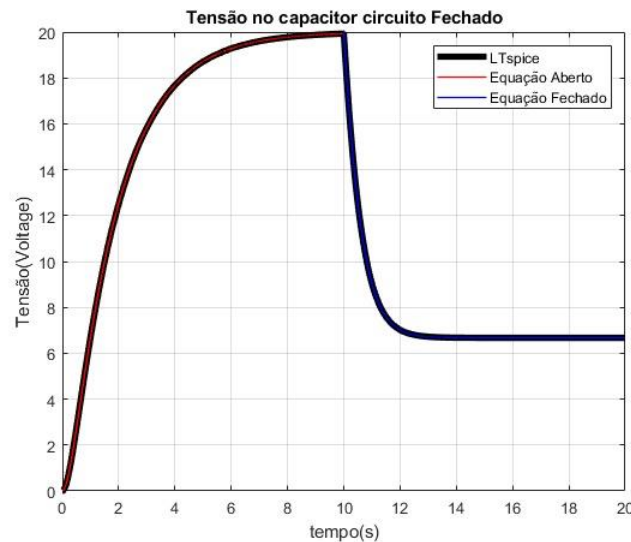


Fig. 7. Tensão do capacitor, Eq. (46) e (93).

No momento em que a chave comutou, ocorreu certa descarga da tensão do capacitor, notou-se que a tensão passou do valor 20V para um valor de 6,66V, após 3,35 segundos.

CONCLUSÃO

Nesse artigo, o circuito RLC chaveado foi utilizado para aplicar os conceitos de análise de circuitos elétricos e a transformada de Laplace. Utilizou-se como ferramentas de análise para o artigo os softwares Matlab® e Ltspice® para validação dos resultados.

Construíram-se os modelos no domínio do tempo contínuo para o circuito antes e após a comutação da chave. O chaveamento além de promover mudanças nos níveis de tensão e corrente nos respectivos componentes, houve mudança na estrutura do sistema de equações. Antes da comutação, o circuito era descrito por uma equação diferencial de segunda ordem. Com o chaveamento, o circuito passa a ser constituído por duas malhas, isso corresponde a um sistema com duas equações diferenciais, com condições iniciais.

A partir das descrições matemáticas, usou-se a transformada de Laplace para computar as soluções fechadas, essa na frequência e no tempo contínuo. Implementou-se o circuito no software Ltspice®, extraíram-se as formas de onda. Usou-se o software Matlab® para simular as soluções fechadas e sobrepor as formas de onda obtidas no software Ltspice®. Assim, validou-se a resolução e análise do circuito elétrica RLC chaveado.

Com o trabalho, observou-se que a transformada de Laplace é uma ferramenta valiosa para obtenção de resposta de sistema lineares invariantes de tempo contínuo. Mostrou-se que sua aplicação a circuitos se obtém como resposta a parte transitória e a permanente, isso é vantajoso quando comparada com o uso de fasores.

Por fim, o engenheiro ao se deparar com uma situação real, pode usar a metodologia exposta por este trabalho. Uma vez que em problemas reais, torna-se atrativo a checagem da solução por pelo menos duas formas distintas antes da implementação física, dessa forma ajuda a evitar erros ou mesmo contornar variáveis não consideradas no projeto.

REFERENCIAS

- [1] FERRUZZI, Elaine Cristina; ALMEIDA, Lourdes Maria Werle de. Modelagem Matemática no ensino de Matemática para engenharia. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, v. 6, n. 1, p. 153-172, jan-abr.2013. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/1530/981>. Acesso em: 31/07/2023. doi: 10.3895/S1982-873X2013000100010.
- [2] ROSSINI, Flávio Luiz; LIMA, Bruno Suracci de; CORRÊA, João Henrique Dias; LOPES, João Marcos Pericaro; BARBOSA, Reginaldo Ferreira de Sousa; BARROZO, Yuri Ruzzene. Modeling, Simulation, Motion Trajectory Planning and Nonlinear Control in the Joint Space of the Manipulator Robot SCARA T3 401SS Manufacturer Epson. In: Seven Publications (org.). Development and Its Applications in Scientific Knowledge, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-248>. Acesso em: 18/06/2023.
- [3] ABREU, Leonardo de Melo; ROSSINI, Flávio Luiz; OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de. Modelagem Cinemática de um Robô Modelo SCARA e Desenvolvimento de Aplicativo para Análise Gráfica. In: Anais Do(A) Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da Utfpr, Santa Helena, p.17, 07 nov. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.29327/1152426.1-2>. Acesso em: 15/06/2023.
- [4] SOUZA, Eber Delgado de; ROSSINI, Flávio Luiz; OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de. Desenvolvimento de um Aplicativo no Ambiente App Designer do Software Matlab® para Planejamento de Trajetória do Robô PUMA 560}. In: FREITAS, Lilian Coelho de (org.). Engenharia Elétrica e de Computação: docência, pesquisa e inovação tecnológica. Ponta Grossa: Atena Editora, p. 87–109, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.4652316018>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- [5] ROSSINI, Flávio Luiz; LOPES, João Marcos Pericaro; ABREU, Leonardo de Melo; BARBOSA, Reginaldo Ferreira de Sousa; OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de. Modelagem, Simulação e Controle de Trajetória do Robô Manipulador SCARA SR-6 IA através de um Aplicativo MATLAB®. In: PERBICHE, João Paulo (org.). Ciências Exatas Estudos e Desafios - Vol. 01. São José dos Pinhais: Editora Brazilian Journals, p. 248-278, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.35587/brj.ed.0001995>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- [6] ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Matemática da Dinâmica do Robô Manipulador RC 180, Empresa EPSON, via Formulação Lagrangiana. In: II Simpósio de Tecnologia e Engenharia Eletrônica - II SIMTEEL. Campo Mourão, 2014.
- [7] MARTINES, Francine; MELO, Larissa; CHICHANOSKI, Gustavo; MUNARINI, Bruno; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Matemática da Cinemática Direta do Robô Manipulador SCARA Modelo G-10/G-20. In: V Ciclo de Palestras: Perspectivas Matemáticas - V CIPEM. Campo Mourão, 2015.
- [8] PENHA, Bruno Schuavab; QUEIROZ, Mariana Emer; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem e Análise da Cinemática Direta e Inversa de Manipulador Robótico com Cinco Juntas Rotativas. In: III Simpósio de Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL. Campo Mourão, 2016.
- [9] FUDOLI, Fábio; BLESSA, Lucas; SOUZA, Júlio; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem da Cinemática Direta e Inversa do Robô SCARA EPSON G10-851S. In: III Simpósio de Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL. Campo Mourão, 2016.

- [10] SANTOS, Matheus Araújo dos; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Matemática e Simulação da Cinemática Direta do Robô Manipulador com Seis Juntas Rotativas - 6 GL. In: III Simpósio De Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL. Campo Mourão, 2016.
- [11] CHICHANOSKI, Gustavo; MUNARINI, Bruno Lucas; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem da Cinemática Direta do Robô Manipulador RV-2AJ de 6 Graus de Liberdade da Industrial Robot Mitsubishi - estudo de caso. In: XX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Campo Mourão, 2015.
- [12] OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de; ROSSINI, Flávio Luiz; SILVA, Manuel Fernando; MOREIRA, Antonio Paulo. Modeling, Simulation and Implementation of Locomotion Patterns for Hexapod Robots. In: 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON). Resistencia, Argentina, p. 1-1, 2020. doi: 10.1109/ARGENCON49523.2020.9505570.
- [13] OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de; ROSSINI, Flávio Luiz. Modeling, Simulation and Analysis of Locomotion Patterns for Hexapod Robots. In: IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 2, p. 375-383, Feb. 2018. doi: 10.1109/TLA.2018.8327389.
- [14] SANCHES, Hugo Eduardo; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem e Controlador um Manipulador Robótico. In: Journal Of Exact Sciences, vol. 9, n. 1, p. 05-16, Abr-Jun 2016. Disponível em: <https://www.mastereditora.com.br/jes9-1>. Acesso em: 06/07/2023.
- [15] LIMA, Bruno Suracci de; ROSSINI, Flávio Luiz; CORRÊA, João Henrique Dias; LOPES, João Marcos Pericaro; BARBOSA, Reginaldo Ferreira de Sousa; BARROZO, Yuri Ruzzene. Modelagem, Simulação e Análise de Movimento do Robô Manipulador SCARA T3 401SS Fabricante EPSON. In: DALLAMUTA, João; HOLZMANN, Henrique Ajuz (org.). Engenharia Elétrica: Sistemas de energia elétrica e telecomunicações. Ponta Grossa: Atena Editora, p.108125, 2022. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/modelagem-simulacao-e-analise-de-movimento-do-robo-manipulador-scara-t3-401ss-fabricante-epson>. Acesso em: 18/06/2023. doi: 10.22533/at.ed.0022217088.
- [16] ROSSINI, Flávio Luiz; LIMA, Bruno Suracci de; CORRÊA, João Henrique Dias; LOPES, João Marcos Pericaro; BARBOSA, Reginaldo Ferreira de Sousa; BARROZO, Yuri Ruzzene. Modelagem, Simulação, Planejamento de Trajetória e Controle Não Linear no Espaço de Juntas de Movimento do Robô Manipulador SCARA T3 401SS - EPSON. In: BARBOSA, Frederico Celestino (org.). Engenharia: a máquina que constrói o futuro - Volume XIII. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, p. 21-41, 2023. Disponível em: <https://api.conhecimentolivre.org/ecl-api/storage/app/public/L.709-2023.pdf>. Acesso em: 18/06/2023. doi: 10.37423/230407596.
- [17] CANHAN, Diego Carrião; BROLIN, Leandro Castilho; ROSSINI, Flávio Luiz. Projeto e Análise de Desempenho de Algoritmos de Estimação Paramétrica Aplicados ao Controle Adaptativo por Modelo de Referência. In: SOARES, Adriano Mesquita (org.). Tópicos Especiais em Engenharia: inovações e avanços tecnológicos - Vol. 6. Ponta Grossa: Aya Editora, p. 42-54, 2023. Disponível em: <https://ayaeditora.com.br/Livro/25361/>. Acesso em: 06/07/2023. doi: 10.47573/aya.5379.2.186.3.
- [18] COLDEBELLA, Henrique; ROSSINI, Flávio Luiz. Design and Simulation of a Model Reference Adaptive Control System Using the Recursive Least Squares Method with Forgetting Factor for Gain Adjustment. In: Seven Publications (org.). Development and Its Applications in Scientific Knowledge, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-287>. Acesso em: 06/07/2023.

[19] CANHAN, Diego Carrião; BROLIN, Leandro Castilho; ROSSINI, Flávio Luiz. Design, Simulation and Performance Analysis of Parametric Estimation Algorithms Applied to Model Reference Adaptive Control. In: Seven Publications (org.). Development and Its Applications in Scientific Knowledge, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/devopinterscie-247>. Acesso em: 06/07/2023.

[20] COLDEBELLA, Henrique; ROSSINI, Flávio Luiz. Desenvolvimento e Implementação do Método dos MQR-FE Acoplado a um Sistema de CAMR. In: BARBOSA, Frederico Celestino (org.). Engenharia de Controle e Automação: estudos fundamentais. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, p. 130-149, 2023. Disponível em: <https://api.conhecimentolivres.org/ecl-api/storage/app/public/L.655-2023.pdf>. Acesso em: 06/07/2023. doi: 10.37423/230107095.

[21] DONDA, Rafael Angelini; ROSSINI, Flávio Luiz. Projeto, Simulação e Análise de um Sistema de Controle por Modo Deslizante Aplicado ao Conversor CC-CC Buck: estudo de caso. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...SantaHelena(PR)UTFPRSantaHelena,2022.Disponível em:<https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548919-projeto-simulacao-e-analise-de-um-sistema-de-controle-por-modo-deslizante-aplicado-ao-conversor-cc-cc-buck--estu/>. Acesso em: 06/07/2023.

[22] CANHAN, Diego Carrião; BROLIN, Leandro Castilho; ROSSINI, Flávio Luiz. Comparação entre Estimadores Paramétricos Aplicados ao Controle Adaptativo por Modelo de Referência. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...SantaHelena(PR)UTFPRSantaHelena,2022.Disponível em:<https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548540-comparacao-entre-estimadores-parametricos-aplicados-ao-controle-adaptativo-por-modelo-de-referencia/>. Acesso em: 06/07/2023.

[23] COLDEBELLA, Henrique; BROLIN, Leandro Castilho; ROSSINI, Flávio Luiz. Comparação entre Algoritmos de Adaptação Paramétrica aplicados ao Projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena (PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548802-comparacao-entre-algoritmos-de-adaptacao-parametrica-aplicados-ao-projeto-de-controlador-adaptativo-por-modelode/>. Acesso em: 06/07/2023.

[24] COLDEBELLA, Henrique; BROLIN, Leandro Castilho; ROSSINI, Flávio Luiz. Análise de Algoritmos de Estimação Paramétrica Aplicados ao Projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência. In: DALLAMUTA, João; HOLZMANN, Henrique Ajuz (org.). Engenharia Elétrica: Sistemas de energia elétrica e telecomunicações - Vol. 2. Ponta Grossa: Atena Editora, p. 47-58, 2022. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/analise-de-algoritmos-de-estimacao-parametrica-aplicados-a-projeto-de-controlador-adaptativo-por-modelo-de-referencia>. Acesso em: 06/07/2023. doi:10.22533/at.ed.2702211114.

[25] CANHAN, Diego Carrião; BROLIN, Leandro Castilho; ROSSINI, Flávio Luiz. Aplicação do Método do Gradiente e do Método dos Mínimos Quadrados Recursivo para Análise de Desempenho do Controle Adaptativo por Modelo de Referência. In: DALLAMUTA, João; HOLZMANN, Henrique Ajuz (org.). Engenharia Elétrica: Sistemas de energia elétrica e telecomunicações - Vol. 2. Ponta Grossa: Atena Editora, p. 91-100, 2022. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/aplicacao-do-metodo-do-gradiente-e-do-metodo-dos-minimos-quadrados-recursivo-para-analise-de-desempenho-do-controle-adaptativo-por-modelo-de-referencia>. Acesso em: 06/07/2023. doi:10.22533/at.ed.2702211118.

- [26] DONDA, Rafael Angelini; ROSSINI, Flávio Luiz. Projeto, Simulação e Análise de um Sistema de Controle por Modo Deslizante Aplicado ao Conversor CC-CC Buck: estudo de caso. In: DALLAMUTA, João; HOLZMANN, Henrique Ajuz (org.). Engenharia Elétrica: Sistemas de energia elétrica e telecomunicações - Vol. 2. Ponta Grossa: Atena Editora, p. 14-24, 2022. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/projeto-simulacao-e-analise-de-um-sistema-de-controle-por-modo-deslizante-aplicado-ao-conversor-cc-cc-buck-estudo-de-caso>. Acesso em: 06/07/2023. doi: 10.22533/at.ed.2702211112.
- [27] ROSSINI, Flávio Luiz; OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto de; GIESBRECHT, Mateus. Identificação Recursiva de Sistemas Dinâmicos Contínuos Variantes no Tempo através do Filtro de Kalman Estendido e da Filtragem de Variáveis de Estado pelo Método dos Mínimos Quadrados Recursivos. In: AYOUB, Julianno Pizzano; OLIVEIRA, Marcel Ricardo Nogueira de. Desvendando a Engenharia: sua abrangência e multidisciplinaridade - Vol. 2. Guarujá: Editora Científica Digital, p. 284-302, 2021. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/210404090>. Acesso em: 06/07/2023. doi: 10.37885/210404090.
- [28] ROSSINI, Flávio Luiz. Métodos de Filtragem, Estimação e Controle Adaptativo Indireto Aplicados a Sistemas de Teleoperação Bilateral. pt. PhD thesis. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Universidade Estadual de Campinas, p. 92, 2020. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_a4357c8ea5602bb2b5b0d556e8c3a91e. Acesso em: 06/07/2023.
- [29] LUIZ ROSSINI, Flávio; SANTOS MARTINS, Guilherme; PAULO SILVA GONÇALVES, João; GIESBRECHT, Mateus. Recursive Identification of Continuous Time Variant Dynamical Systems with the Extended Kalman Filter and the Recursive Least Squares State-Variable Filter. In: Proceedings of the 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1: ICINCO; ISBN 9789897583216; ISSN 21842809, SciTePress, pages 458-465. Disponível em: <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0006865504680475>. Acesso em: 06/07/2023. doi: 10.5220/0006865504680475
- [30] LATHI, B. P. Sinais e Sistemas Lineares. 2ª Ed., Porto Alegre: Editora Bookman, 2006.
- [31] ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. Fundamentos de Circuitos Elétricos. 5ª ed., Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [32] CRUZ, Lucas Martinez da; LEÃO, Andressa; CHICHANOSKI, Gustavo; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem e Simulação da Dinâmica Não-Linear em Retificadores Monofásicos Meia-Onda Carga RL. In: III Simpósio de Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL. Campo Mourão, 2016.
- [33] GERALDI, Marcelo Theis; SOUZA, Dionni Fernando Rodrigues de; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Dinâmica de Circuito RLC Chaveado com Topologia Mista e Análise Numérica através do Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem. In: III Simpósio de Tecnologia e Engenharia Eletrônica - III SIMTEEL. Campo Mourão, 2016.
- [34] SANTOS, Andressa Cristina Kuibida dos; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem Dinâmica e Comparação entre a Solução Algébrica e Numérica, através do Método de Euler, à Circuito Elétrico RLC Série. In: VI Ciclo de Palestras: Perspectivas Matemáticas - VI CIPEM. Campo Mourão, 2016.
- [35] COLAUTO NETO, Alexandre; CASTRO, Alisson de Souza; OLIVEIRA JÚNIOR, Virgílio; ROSSINI, Flávio Luiz. Descrição Matemática do Comportamento Dinâmico de Circuito Elétrico Não Linear com

Topologia Mista. In: XX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Campo Mourão, 2015.

[36] ROSSINI, Flávio Luiz; LOBEIRO, Adilandri Mércio; BOROMELO, Viviane Colucci; SILVA, Edilza Martins da; HÜBNER, Rodrigo; FOLEISS, Juliano Henrique. Análise de Carga em um Circuito Elétrico Passivo com Topologia Paralela por meio do Método de Diferenças Finitas. In: IV Ciclo de Palestras: Perspectivas Matemáticas - IV CIPEM. Campo Mourão, 2014.

[37] SILVA, Victor Augusto da; OLIVEIRA, Luan; SEIFERT, Nicholas; OLIVEIRA, João Matheus Simm de; PONTIM, Flávia Macedo; ROSSINI, Flávio Luiz. Modelagem no Domínio do Tempo e Aplicação da Transformada de Laplace na Solução e Análise de um Circuitos RLC com Três Malhas. In: FONTGALLAND, Isabel Lausanne (org.). Cidades inteligentes e novos modelos industriais - Volume 2. CampinaGrande:EditoraAmplla,p.6284,2023.Disponívelem:<https://ampllaeditora.com.br/publicacoes/5563/>.Acessoem:31/07/2023.doi:10.51859/amplla.cin3224-5.

[38] ARAÚJO, Camila Duarte de. Equações Diferenciais Aplicadas em Circuitos Elétricos. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponívelem:<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/7352>. Acesso em: 31/07/2023.

[39] TAKEMOTO, Vinícius Sasaki; ROSSINI, Flávio Luiz; CORREA, Wellington José. Modelagem de um Sistema Caixa-Cinza por meio do Método dos Mínimos Quadrados a partir de Identificação ARX. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena (PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponívelem:<https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/547687-modelagem-de-um-sistema-caixa-cinza-por-meio-do-metodo-dos-minimos-quadrados-a-partir-de-identificacao-arx/>. Acesso em: 07/07/2023.

[40] DONDA, Rafael Angelini; ROSSINI, Flávio Luiz; SOUZA, Reginaldo Nunes de; GARCIA, Renato Vinicius. Desenvolvimento do Aplicativo Métodos de Matemática Aplicada – Simulador da Série de Fourier (MMA-SSF): estudo de caso. In: Anais do XI Seminário de Extensão e Inovação & XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Guarapuava (PR) UTFPR Guarapuava, 2021. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br//sei/sei2021/paper/viewFile/8387/4067>. Acesso em: 25/07/2023.

[41] PAWELSKI, Lucas; SILVA JUNIOR, Paulo Roberto Machado; ROSSINI, Flávio Luiz. Desenvolvimento de um Aplicativo Simulador de Entrada-Saída Periódica de Circuito Elétrico RLC Série (MMA-SESPC). In: Anais do XI Seminário de Extensão e Inovação & XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Guarapuava (PR) UTFPR Guarapuava, 2021. Disponívelem:<https://eventos.utfpr.edu.br//sei/sei2021/paper/viewFile/7741/4065>. Acesso em: 25/07/2023.

[42] DONDA, Rafael Angelini; GARCIA, Renato Vinicius; ROSSINI, Flávio Luiz; SOUZA, Reginaldo Nunes de. Desenvolvimento do Aplicativo Métodos de Matemática Aplicada - Simulador da Série de Fourier (MMA-SSF): estudo de caso. In: Editora Científica Digital (org.). Open Science Research II. Guarujá: Editora Científica Digital, p.13601369, 2022. Disponívelem:<https://www.editoracientifica.com.br/article/s/code/220207807>. Acesso em: 07/07/2023. doi: 10.37885/220207807.

[43] PAWELSKI, Lucas; SILVA JUNIOR, Paulo Roberto Machado; ROSSINI, Flávio Luiz. Desenvolvimento do Aplicativo Métodos de Matemática Aplicada - Simulador de Entrada-Saída Periódica de Circuito Elétrico RLC Série (MMA-SESPC). In: Editora Científica Digital (org.). Open Science Research II. Guarujá:

Editora Científica Digital, p.13501359, 2022. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/220207739>. Acesso em: 07/07/2023. doi: 10.37885/220207739.

[44] PAWELSKI, Lucas; ROSSINI, Flávio Luiz; COLDEBELLA, Henrique. Desenvolvimento de um aplicativo estimador não paramétrico de função de transferência de processos industriais (EnPFTPI)}. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais... Santa Helena (PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: [https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/546232-desenvolvimento-de-um-aplicativo-estimador-nao-parametricodefuncao-de-transferencia-de-processos-industriais-\(e/](https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/546232-desenvolvimento-de-um-aplicativo-estimador-nao-parametricodefuncao-de-transferencia-de-processos-industriais-(e/). Acesso em: 07/07/2023.

[45] DONDA, Rafael Angelini; GARCIA, Renato Vinicius; ROSSINI, Flávio Luiz; SOUZA, Reginaldo Nunes de. Métodos de Matemática Aplicada - Simulador da Série de Fourier (MMA-SSF): Manual de Uso, 2021. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/flrossini/Manual_MMA_SSF_ISBN.pdf\\view. Acesso em: 07/07/2023. ISBN: 978-65-00-25632-1.

[46] PAWELSKI, Lucas; SILVA JUNIOR, Paulo Roberto Machado; ROSSINI, Flávio Luiz. Manual do Aplicativo Métodos de Matemática Aplicada - Simulador de Entrada-Saída Periódica de Circuito (MMA-SESPC), 2021. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/flrossini/Manual_MMASESPC_ISBN.pdf/view. Acesso em: 07/07/2023. ISBN: 978-65-00-23100-7.

[47] PAWELSKI, Lucas; COLDEBELLA, Henrique; ROSSINI, Flávio Luiz. Manual do Aplicativo para Estimação não Paramétrica de Função de Transferência de Processos Industriais (EnPFTPI), 2022. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/flrossini/Manual_EnPFTPI_com_ISBN\\.pdf/view. Acesso em: 07/07/2023. ISBN: 978-65-00-48542-4.

Capítulo 6



10.37423/230808078

ADEQUAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA AUMENTO DE PRODUÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA – ETA

Murilo Tavares Palos

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Marcos Vinícius Henrique da Silveira

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Valdinei de Oliveira

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Vinícios Gomes Dornel

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Cirillo Moreno Tavares Palos

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Nelma Paula Vieira Ramos

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Helena de Carvalho

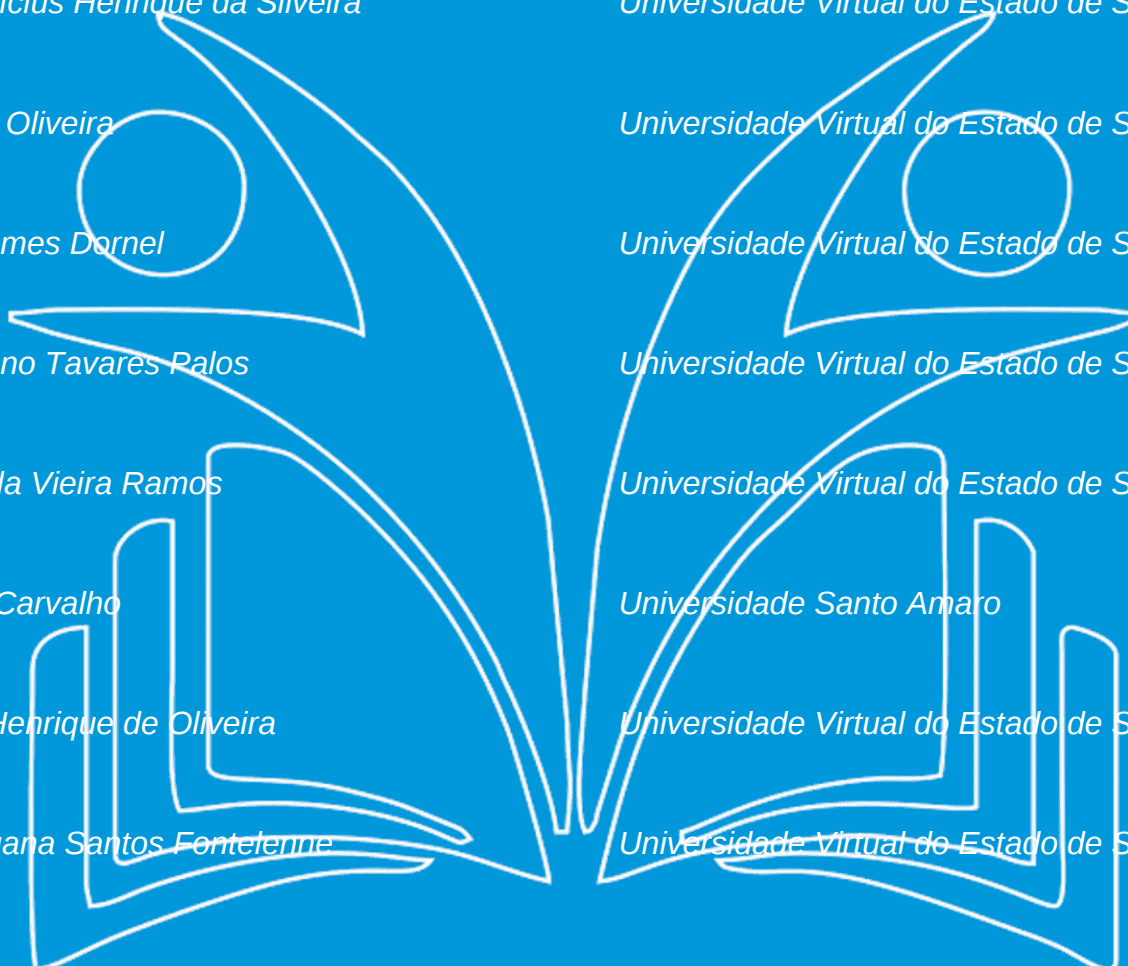
Universidade Santo Amaro

Fernando Henrique de Oliveira

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Caroline Luana Santos Fontelenne

Universidade Virtual do Estado de São Paulo



INTRODUÇÃO: Todo processo de produção gera resíduos, alguns servem de matéria prima para outro processo e outros não tem aplicação. Como matéria prima, muitas vezes é inviável economicamente. Em um processo para tratamento de água, onde o produto acabado deve sair como produto potável para consumo humano não é diferente, dependendo do manancial onde é retirada a água bruta, pode haver maior ou menor geração de resíduos. Em tratamento de água o resíduo também chamado de lodo deve ter destino adequado para evitar contaminação de solo, rios, córregos etc. Durante o processo de decantação ocorre a precipitação de partículas sólidas ao qual aos poucos vão se juntando formando lodo, mas ainda com grande concentração de umidade. Este líquido contem grande concentração de lodo deve ser desaguado gerando desta formará lodo em estado sólido ao qual trataremos da sua desumificação. A desidratação de lodo da Estação de Tratamento de Água - ETA é uma necessidade constante para que não se devolva estes resíduos ao meio ambiente. ETA'S com mananciais diferentes apresentam resíduos de lodo de forma e composição diferentes. Após efetuar cálculos de volume gerado, testes de concentração de sólidos em amostras e verificação de movimentação de resíduos já desumidificado, foi verificado tipo de equipamento, carregamento de carretas, logística de transporte para adequação de planta de desidratação compatível com processo de tratamento de água. As etapas de processo compreendem a transferência de lodo acumulado em decantador, transferência para adensador, bombeamento para centrífuga e carregamento de carreta e transporte para aterro sanitário. Basicamente o lodo ainda em estado líquido deve ser separado da água em centrífugas mantendo a parte seca com menor condição de umidade possível, após a centrifugação este lodo deve ser transportado a carreta. Com exigências e leis mais rigorosas onde se deve atender a legislação, portarias, normas, etc para destinação de resíduos em processo de produção, surge a necessidade de acelerar o procedimento e adequação de plantas ineficazes para este fim. Após identificar a ineficiência de método e modelo de planta existente para este objetivo foram efetuadas pesquisas e estudos para determinar a melhoria em equipamentos e instalação. A partir deste ponto foram levantados quantidade de lodo da ETA (estação de tratamento de água), em estudos, para determinar as etapas que devem ser melhoradas no processo. A separação de lodo propriamente dito do líquido deverá ser feito por centrifugação. A parte líquida retirada nesta etapa do processo retorna ao início do tratamento na ETA, para ser reaproveitada, parte sólida transferida para carretas rodoviárias que são a condição de transporte onde será levado para sua destinação.

MÉTODO: Realizou-se levantamento bibliográfico sobre o tema abordado, realizado visita técnica às instalações onde existe a necessidade de melhoria na performance de desidratação de lodo. Foram levantados dados de volume de geração de lodo, verificado condições de equipamentos existentes,

consulta de mananciais, verificado catálogos e conversado com empresas de fabricantes de equipamentos que podem ser utilizados na melhoria da planta existente, entre as empresas pesquisadas estão: Pieralise (fabricante de centrífuga), Gratt (Fabricante de centrífuga), Netzsch do Brasil (Fabricante de bombas).

RESULTADOS E DISCUSSÕES: Para o início do projeto foram levantados estudos com protótipo inicial de quantitativo de lodo gerado em decantado entre uma limpeza e outra da Eta em estudo. Apurado que o valor médio é de quatrocentos metros cúbicos de lodo em estado úmido (400 M^3). Na planta anterior seriam necessárias quatrocentas horas de funcionamento ininterrupto para processar este volume, aproximadamente 17 dias. Em condições de estudo apurado com aumento de 8 vezes da capacidade de centrifugação e processamento e carregamento de carretas rodoviárias (com dispositivo desenvolvido para carregamento e distribuição sobre a carreta do lodo em estado sólido, (fig.03) o tempo para limpeza do decantador diminui proporcionalmente, sendo possível processar o mesmo volume em 50 horas. Em cada carreta rodoviária é possível transportar 20 toneladas de lodo em estado sólido, após ser processado e centrifugado, retiramos todo material com trinta por cento de umidade em seis viagens. Identificado a ineficiência de planta, quanto a capacidade de processamento e condições gerais de operacionalidade nos deparamos com outros problemas. Existe equipamento adequado para esta aplicação? De que forma serão os passos até colocar este resíduo sólido em condição de transporte? O sistema deve ser ajustado proporcionalmente para a capacidade de produção de água potável, de tal forma que o lodo gerado seja processado em paralelo a produção principal (potabilidade de água) sem prejudicar a capacidade de produção principal, para que desta forma não ocorra diminuição de produção. O lodo gerado contém produtos químicos que são prejudiciais ao solo e por consequência ao meio ambiente. Por se tratar de aplicação específica, para o estudo são aplicadas conhecimento de física, química, fluidos etc. Na operação da planta antiga era necessário um operador de equipamento e dois ajudantes na operação de distribuição uniforme do lodo na caçamba de transporte, na planta atual a operação é feita apenas por um operador de equipamentos, pois, distribuição de lodo processado é feita de forma uniforme através de bombeamento e dutos telescópicos mecanizados, substituído equipamentos de centrifugação no protótipo final com ganho de produção em 8 vezes, adequado as bombas de transferência de lodo líquido e aplicação de polímeros, desenvolvido equipamento para carregamento de carretas de transporte foi possível diminuir o tempo em limpeza de decantadores, custos operacionais, otimizar transporte, bem como dar correto destino aos resíduos, desta forma foi atendido a legislação em vigor

e ainda gerou confiabilidade ao sistema. Através de testes de umidade em amostras de lodo processado obtivemos resultados satisfatórios com umidade variando entre 28 e 30 por cento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS: Inicialmente foi identificado a ineficiência de planta, quanto a capacidade de processamento e condições gerais de operacionalidade nos deparamos com outros problemas. O sistema deve ser ajustado proporcionalmente para a capacidade de produção de água potável, de tal forma que o lodo gerado seja processado em paralelo a produção principal (potabilidade de água) sem prejudicar a capacidade de produção principal, para que desta forma não ocorra diminuição de produção. O lodo gerado contém produtos químicos que são prejudiciais ao solo e por consequência ao meio ambiente, a partir dos resultados do projeto com finalidade atender a portaria e leis para tratamento de resíduos industriais e necessidade de aumento de produção em tempo menor. Arelado a essa necessidade constatamos ganhos financeiros, agilidade do processo e confiabilidade do sistema. É importante ressaltar que o presente estudo se limitou a realização de uma pesquisa qualitativa para a investigação, protótipo e consecução do objetivo proposto, portanto, para generalização dos achados sugere-se que o modelo apresentado passe por mais testes.

Palavras-chave: Processo, Resíduos, Lodo, Decantação.

REFERÊNCIAS

Lei nº 9.605, DE 12 DE FEVEREIRO DE 1998 -Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos. PNRS 12.305/20110ABNT. Disponível em: L12305 (planalto.gov.br)

Fabricante de polímeros para tratamento de água SNF Brasil Comercial Química EIRELI

RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de Estações de Tratamento de água . Editora Blucher

NUNES, J. A. Tratamento Físico – Químico de águas residuais. 6. ed. Metcalf & Edy.

Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. Aecon.

Capítulo 7



10.37423/230808108

MISTURAS DE BORRACHA NATURAL (NR)/COPOLÍMERO DE ESTIRENO E BUTADIENO (SBR):ANÁLISE TEÓRICA DAS FORMAS DE PROCESSAMENTO ATRAVÉS DA MODELAGEM MOLECULAR

Helson Moreira da Costa

*Instituto Politécnico (IPRJ) / UERJ;
Universidade Estácio de Sá (UNESA/RJ)*

Valéria Dutra Ramos

Universidade Estácio de Sá (UNESA/RJ)



Resumo: Diferentes formas de processamento das misturas de borracha natural (NR) e o copolímero de estireno-butadieno (SBR) foram avaliadas do ponto de vista teórico através da modelagem molecular. Com o emprego da metodologia de campos de força AMBER, a energia de adsorção e o aspecto final de distribuição de ingredientes da composição e matrizes elastoméricas foram avaliados. Os dados teóricos, corroboram os experimentos encontrados na literatura, e indicam que a melhor forma de preparo da mistura corresponde ao método M2. Em tal método, SBR é misturado aos aditivos, posteriormente à borracha de NR e, por último, à massa homogênea, o acelerador é adicionado. Tal procedimento parece permite não apenas um balanço energético adequado entre fisissorção e quimissorção, segundo a modelagem molecular; mas também uma cura adequada do SBR, o elastômero menos reativo, segundo os experimentos. O resultado líquido, verificado na prática, é um desempenho mecânico superior dos vulcanizados NR/SBR.

Palavras-chaves: Misturas elastoméricas, Modelagem Molecular, Adsorção

INTRODUÇÃO

A geração de novos materiais com aplicações comerciais e de utilidade prática exige, por vezes, a necessidade da utilização de misturas de dois ou mais polímeros em uma composição. Uma vez que este procedimento é mais acessível e menos dispendioso que o desenvolvimento de novos materiais, a combinação de dois ou mais polímeros tem por objetivo a sinergia entre as características. No entanto, embora a concepção seja aparentemente fácil, o resultado pode ser menos satisfatório que o esperado, ou seja, as propriedades podem ser inferiores às propriedades dadas pelos polímeros individuais. O desafio reside na otimização de um número apreciável de variáveis, de modo a se obter o melhor ajuste de uma faixa de propriedades para uma aplicação particular (NASCIMENTO et al., 2019).

Neste contexto, o uso de apenas um elastômero muitas vezes não é suficiente para se obter determinadas propriedades exigidas na aplicação de artefatos de borracha. Consequentemente, as misturas elastoméricas são feitas principalmente por três razões: melhorar as propriedades dos elastômeros originais; melhorar o processamento; e, diminuir os custos. Essas misturas possibilitam que se consiga um balanço de propriedades, onde as vantagens de um elastômero compensam as desvantagens do outro e vice-versa e, desse modo, se amplia a faixa de propriedades atendidas. Tal premissa evita a necessidade de que novos polímeros sejam sintetizados, uma vez que elastômeros já conhecidos e bem caracterizados são empregados (VISCONTE et al., 2001; ABREU JUNIOR et al., 2010). Neste manuscrito, a modelagem molecular foi empregada para mimetizar o comportamento de misturas de NR/SBR conforme a forma de processamento adotada. O modelo AMBER, uma família de campos de força para a mecânica molecular frequentemente utilizado para modelagem de biomoléculas, foi escolhido para as simulações do mecanismo de adsorção entre os elastômeros e os ingredientes da composição. A fim de corroborar os dados teóricos gerados, as investigações de VISCONTE et al. (2001), ABREU JUNIOR et al. (2010) e COELHO et al. (2011) foram tomadas para fins de comparação.

EXPERIMENTAL

A fim de se obter a análise conformacional das moléculas e o estado de mínima energia, o programa HyperChem 8.0TM® foi utilizado. As diretrizes escolhidas para a determinação da energia de adsorção foram: mecânica molecular com campos de forças AMBER; algoritmo de otimização Polak-Ribiere; condições de convergência do gradiente RMS igual a 10^{-3} kcal/Å.mol; e, modelagem em condições de

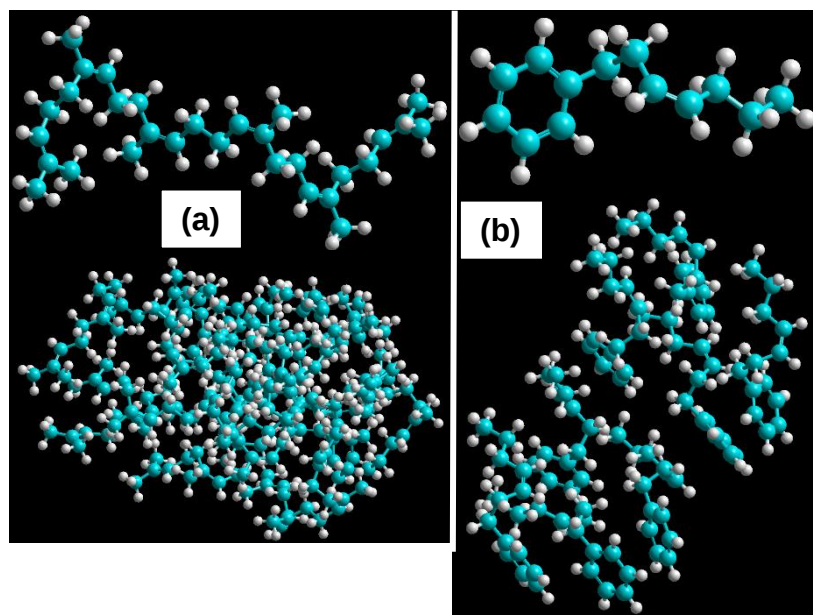
vácuo. Para que alguns parâmetros específicos das espécies químicas como, por exemplo, a polarizabilidade (α), o momento dipolar (μ) e outros, o método semiempírico PM3 foi empregado. Para o estudo de adsorção, a molécula de esqualeno ($C_{30}H_{50}$) ou 2,6,10,15,19,23-hexametil-2,6,10,14,18,22-tetracosahexeno foi selecionada como o composto modelo para a borracha natural (NR), porém a configuração Z foi escolhida para a classificação dos substituintes dos carbonos da ligação dupla. A matriz elastomérica foi simulada criando-se um cristal hexagonal (comprimentos das arestas a, b e c equivalentes a 10 Å, 10 Å e 20 Å, respectivamente; e, os ângulos α , β , e γ das arestas equivalentes a 90° , 90° e 120° , respectivamente). O composto [(3Z)-hept-3-en-1-il]benzeno foi selecionado como o composto modelo para a borracha do copolímero de estireno-butadieno (SBR) e um cristal com características similares ao gerado para NR foi criado. Na Figura 1 são ilustrados os compostos modelos e os respectivos cristais.

A formulação hipotética para o estudo teórico da adsorção dos ingredientes junto à matriz de NR/SBR foi baseada nos seguintes aditivos: os ativadores ZnO (óxido de zinco) e ácido esteárico ($CH_3(CH_2)_{16}COOH$ ou C_{18}); agente de vulcanização – enxofre (S8); acelerador TBBS (t-butil-2-benzotiazol sulfenamida); e, o antioxidante octamine (4,4'-dioctil-difenilamina).

As simulações para as diferentes formas de processamento seguiram os procedimentos citados em ABREU JUNIOR et al. (2010):

- M1: Os aditivos, com exceção do acelerador, foram misturados inicialmente a NR e, após a homogeneização, a borracha SBR foi adicionada. Por último, o acelerador foi acrescentado à mistura homogênea;
- M2: Os aditivos, com exceção do acelerador, foram misturados inicialmente com a SBR e, após a homogeneização, a borracha NR foi adicionada. Por último, o acelerador foi acrescentado à mistura homogênea.
- M3: As borrachas foram previamente misturadas, antes da adição dos aditivos.
- M4: A cada uma das borrachas foi adicionada metade da quantidade de cada um dos aditivos, com exceção do acelerador. As composições das duas borrachas foram misturadas e, por último, o acelerador foi acrescentado à mistura homogênea.

Figura 1: (a) Composto modelo de NR e o cristal criado; e, (b) Composto modelo de SBR e o cristal criado



O procedimento experimental de modelagem molecular seguiu as seguintes etapas:

- i) Cálculo da energia potencial de cada molécula de cada ingrediente no estado conformacional mais estável;
- ii) Cálculo da energia potencial do cristal hipotético de NR e de SBR;
- iii) Cálculo da energia potencial de cada sistema, conforme a metodologia de processamento escolhida; e,
- iv) Cálculo da energia de adsorção mediante a Equação 1:

$$E_{\text{adsorção}} = U_i^{\text{sistema}} - \sum U_i \quad \text{Eq. 1}$$

em que: U_i é a energia potencial do aditivo i ou do cristal de NR ou SBR; e, U_i^{sistema} é a energia potencial do sistema i , o qual foi criado segundo a ordem escolhida de mistura. É importante ressaltar que a energia potencial dos campos AMBER obedece à uma função de quatro somatórios, conforme a Equação 2. Os três primeiros somatórios são referentes à energia potencial da ligação covalente, enquanto o último termo é referente às interações não-covalentes (eletrostáticas e de van der Waals).

$$E_{\text{total}} = \sum_{\text{ligação}} K_r (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{eq}})^2 + \sum_{\text{ângulos}} K_\theta (\theta - \theta_{\text{eq}})^2 + \sum_{\text{diedral}} \frac{V_n}{2} (1 + \cos(n\phi - \gamma)) + \sum_{i < j} \left[\frac{A_{ij}}{R_{ij}^{12}} - \frac{B_{ij}}{R_{ij}^6} + \frac{q_i q_j}{\epsilon R_{ij}} \right] \quad \text{Eq. 2}$$

Os significados de cada termo são (AMBER, 2022):

- Somatório da ligação: representa a energia entre dois átomos covalentemente ligados. A ligação é considerada uma mola, e por esse motivo, é descrita pela função harmônica da mola ideal. O termo K_r é referente à constante de mola da ligação, há também os termos da distância da ligação e a distância de equilíbrio (parâmetro do campo);
- Somatório do ângulo: representa a energia angular entre três átomos covalentemente ligados. Seguindo o mesmo princípio do item citado acima, a energia será referente à perturbação do ângulo considerado comparado ao ângulo de equilíbrio do trio de átomos;
- Somatório diedral: representa a energia da torção de uma ligação sobre sua ordem e as ligações das redondezas ou pares isolados de elétrons; e,
- Último termo: representa as forças não covalentes atuantes sobre o sistema, como as interações eletrostáticas e as interações de van der Waals. Os dois primeiros termos dentro dessa somatória são referentes às interações de van der Waals, que no caso dessa família de campos de força, utiliza o potencial de Lennard-Jones. O último termo, por sua vez, descreve as interações eletrostáticas descritas pelas leis de Coulomb.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE DAS ESPÉCIES QUÍMICAS INDIVIDUAIS

Uma ressalva importante antes do início da discussão é que o óxido de zinco (ZnO) não está presente, pois a modelagem molecular não foi satisfatória para a geração dos parâmetros de interesse.

Na Figura 2 são exibidos os valores teóricos, estimados pela modelagem molecular via método semiempírico PM3, para o momento de dipolo (μ) e a polarizabilidade (α) das espécies. Uma vez que a polarizabilidade é influenciada pela massa molar do composto químico, o parâmetro foi normalizado, ou seja, os valores mostrados na Figura 1 correspondem aos resultados da Eq. 3:

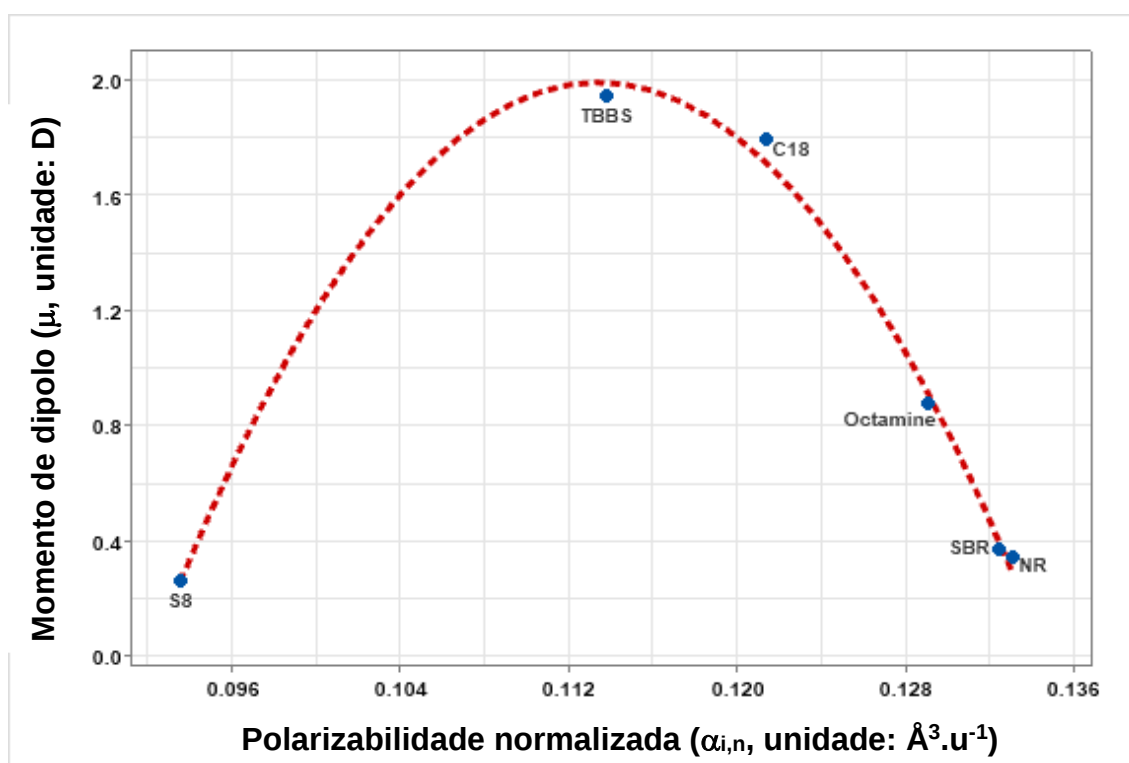
$$\alpha_{i,n} = \alpha_i / MM_i \quad \text{Eq. 3}$$

em que: $\alpha_{i,n}$ é a polarizabilidade da espécie i normalizada; α_i é a polarizabilidade da espécie i; e, MM_i é a massa molar da espécie i.

O momento de dipolo (μ) é uma medida quantitativa da polaridade de uma ligação, definido como o produto da carga Q pela distância r entre as cargas. Os momentos de dipolo são sempre expressos em unidades debye (D, $1 \text{ D} = 3,336 \times 10^{-30} \text{ C.m}$). Medidas de momentos de dipolo podem fornecer informações valiosas a respeito da distribuição de cargas nas moléculas e para uma molécula constituída por três ou mais átomos, a existência ou não de momento de dipolo depende não só da polaridade das ligações, mas também da geometria molecular (BROWN et al., 2005; CHANG e GOLDSBY, 2013).

A Figura 2 sugere que as moléculas usadas como compostos modelos para a borracha natural (NR) e para a borracha do copolímero de estireno-butadieno (SBR) possuem momentos de dipolo similares – cerca de 0,34 D para NR contra, aproximadamente, 0,37 D para SBR. Em outras palavras, pode ser inferido que, hipoteticamente, as matrizes elastoméricas não são tão diferentes quanto à polaridade em suas ligações e, portanto, devem exibir boa interação entre si.

Figura 2: Momento de dipolo versus polarizabilidade normalizada para as diferentes espécies presentes na mistura NR/SBR



Uma regra na seleção de borrachas em misturas afirma que quanto maior a similaridade de características como, por exemplo, o parâmetro de solubilidade, a polaridade e o grau de insaturação, maior é a compatibilidade alcançada entre diferentes tipos de borrachas. De acordo com os dados da literatura, o parâmetro de solubilidade δ para a NR varia de 16,20 a 17,69 MPa^{1/2}, enquanto δ para SBR S (25% estireno) é de 17,29 MPa^{1/2}. Se $|\delta_a - \delta_b| < 1 \text{ MPa}^{1/2}$, sendo δ_a e δ_b os parâmetros de solubilidade dos dois tipos de borracha presentes, as borrachas são miscíveis; se a diferença for superior a 1 MPa^{1/2}, as borrachas ou são parcialmente miscíveis ou mesmo imiscíveis (o que exige um agente de compatibilização para a obtenção de propriedades satisfatórias no vulcanizado) (CTB, 2023). Assim sendo, pelos dados teóricos encontrados para o parâmetro μ , a hipótese de interação satisfatória entre NR e SBR é sustentada.

Quanto aos demais ingredientes, o momento de dipolo em ordem crescente é: enxofre (S_8), 0,26 D; octamine, 0,88 D; ácido esteárico (C_{18}), 1,80 D; e, TBBS, 1,95 D). Assim, um aumento crescente de polaridade indicaria também uma dificuldade crescente de solubilização dos ingredientes nas matrizes elastoméricas de NR e SBR, essencialmente de baixa polaridade.

BRUICE (2006) afirma que a polarizabilidade indica como uma nuvem eletrônica pode ser facilmente distorcida. Quanto maior o átomo, mais fracamente ele segura os elétrons em sua camada de valência e mais eles podem ser distorcidos. Quanto mais polarizado o átomo, mais forte são as interações de van der Waals. Por sua vez, SOLOMONS e FRYHLE (2001) define a polarizabilidade como a capacidade de os elétrons responderem a uma mudança de campo elétrico. A polarizabilidade relativa depende de os elétrons estarem mais ou menos fortemente presos e tal parâmetro é importante na determinação da magnitude das forças de van der Waals.

Através da Figura 2, pode ser visto que as moléculas que correspondem aos modelos teóricos dos elastômeros NR e SBR são as espécies mais polarizáveis, pois exibem os valores de $\alpha_{i,n}$ mais altos, 0,133 Å³.u⁻¹ e 0,132 Å³.u⁻¹, respectivamente. Em contrapartida, a molécula de enxofre (S_8) é a com menor capacidade de distorção em sua nuvem eletrônica ($\alpha_{i,n} = 0,094 \text{ Å}^3 \cdot \text{u}^{-1}$) quando comparada às demais. Os outros aditivos situam-se entre os extremos citados, sendo que a ordem crescente encontrada foi: TBBS, 0,114 Å³.u⁻¹ < C_{18} , 0,121 Å³.u⁻¹ < octamine, 0,129 Å³.u⁻¹. Desta forma, conforme a definição de BRUICE (2006) e SOLOMONS e FRYHLE (2001), é possível deduzir, pelos valores teóricos encontrados, que as matrizes elastoméricas são as mais capacitadas para uma resposta dinâmica quando sofrem a influência de campo elétrico externo, ou seja, são as espécies mais propícias para formar dipolos instantâneos. Por consequência, em teoria, o antioxidante octamine deve apresentar uma interação

mais facilitada com as matrizes de NR e SBR, visto que as interações intermoleculares serão do tipo dipolo-dipolo. Ao mesmo tempo, em particular, S_8 deve exibir uma maior dificuldade na criação das interações com as matrizes de NR e SBR em função da “rigidez” da nuvem eletrônica.

A lipossolubilidade refere-se à capacidade de uma substância de se solubilizar em uma fase oleosa, ou a capacidade de se solubilizar em lipídeos, com isso espera-se que quanto maior for essa lipossolubilidade, mais facilmente o fármaco atravessa a membrana. A hidrossolubilidade seria a capacidade de uma substância em se dissolver em meio aquoso. Uma forma de se mensurar essa relação entre a lipossolubilidade e hidrossolubilidade é através do coeficiente de partição octanol [O] / água [A] ou P. Este coeficiente indica a tendência preferencial do fármaco se dissolver em uma fase oleosa ou aquosa. O logaritmo desse coeficiente é chamado de log P. Se o $\log P = 0$, pode-se deduzir que $P = 1$, mostrando que o composto possui afinidade igual as duas fases (oleosa e aquosa); se $\log P < 0$, significa que $P < 1$, assim a solubilidade é maior na fase aquosa; se o $\log P > 0$, o $P > 1$, mostrando que o composto tem afinidade maior pela fase oleosa. Quanto maior o valor de log P mais hidrofóbico e lipossolúvel será o fármaco (STORPIRTIS et al., 2011).

Na Figura 3, os valores de log P são apresentados de forma normalizada em relação às matrizes de NR e SBR. A normalização foi executada segundo a Equação 4.

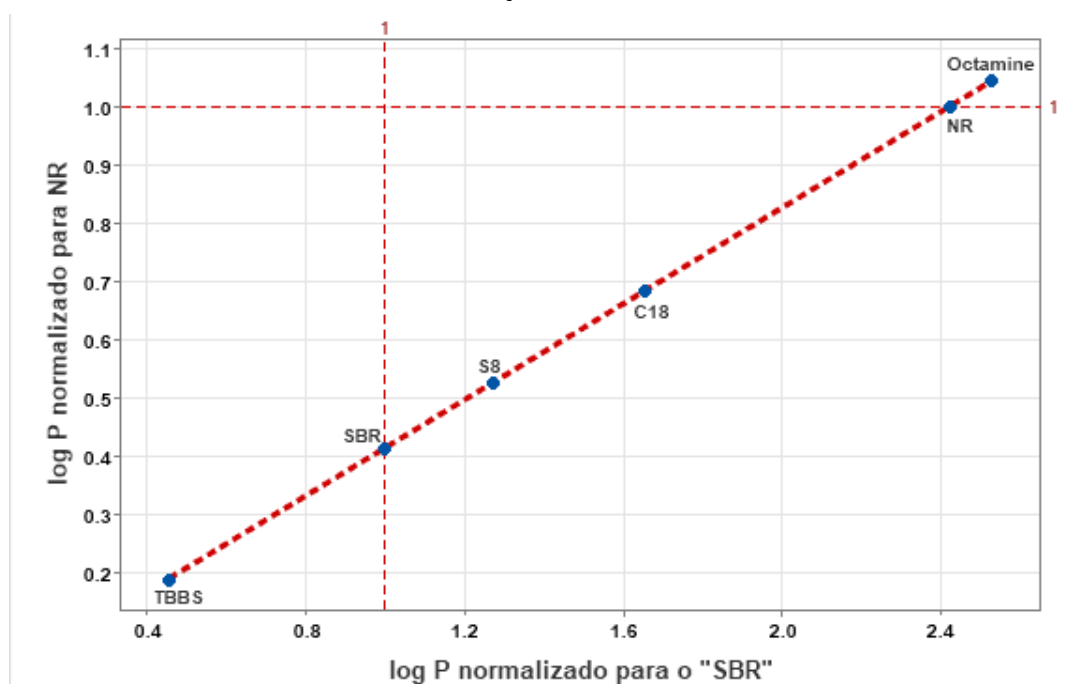
$$\log P_{i,n} = \log P_i / \log P_{NR \text{ ou } SBR} \quad \text{Eq. 4}$$

em que: $\log P_{i,n}$ é a lipossolubilidade normalizada da espécie i; $\log P_i$ é a lipossolubilidade da espécie i determinada pela modelagem molecular usando o método PM3; e, $\log P_{NR \text{ ou } SBR}$ é a lipossolubilidade, determinada pelo método PM3, para o composto modelo da borracha natural (NR) ou do copolímero de estireno e butadieno (SBR), conforme o padrão adotado.

As linhas tracejadas da Figura 3 foram usadas para melhor visualização do comportamento teórico esperado para a solubilidade dos aditivos em cada matriz elastomérica em particular. Assim, na escala horizontal, temos em ordem decrescente de solubilidade em SBR: $S_8 > TBBS > C_{18} > \text{Octamine}$. Ao mesmo tempo, na escala vertical, a ordem decrescente de solubilidade em NR seria: $\text{Octamine} > C_{18} > S_8 > TBBS$. Desta forma, a conclusão preliminar é que em uma mistura de NR/SBR, os principais agentes do processo de vulcanização, isto é, enxofre e acelerador teriam tendência em se solubilizar preferencialmente no SBR, o que logicamente impacta na forma de processamento da mistura. Tal hipótese é justificável pela “maior hidrossolubilidade” do SBR em relação à NR, conforme os valores individuais estimados para as moléculas ($\log P_{SBR} = 3,87$ versus $\log P_{NR} = 9,37$). Contudo, na

investigação de VISCONTE et al. (2001), os autores afirmam que a formação de ligações cruzadas é favorecida em NR, em função da estrutura química, em comparação ao SBR. Ao mesmo tempo, é também considerado que exista uma maior afinidade dos aditivos em relação à NR, o que faz com que os compostos da formulação se encontrem dispersos preferencialmente nesta fase. Portanto, há necessidade de que a análise dos fatores que impactam em mudanças de comportamento nas misturas de NR/SBR deva ser respaldada por uma maior gama de informações e não apenas por um parâmetro molecular isolado.

Figura 3: Lipossolubilidade normalizada em relação ao NR versus lipossolubilidade normalizada em relação ao SBR



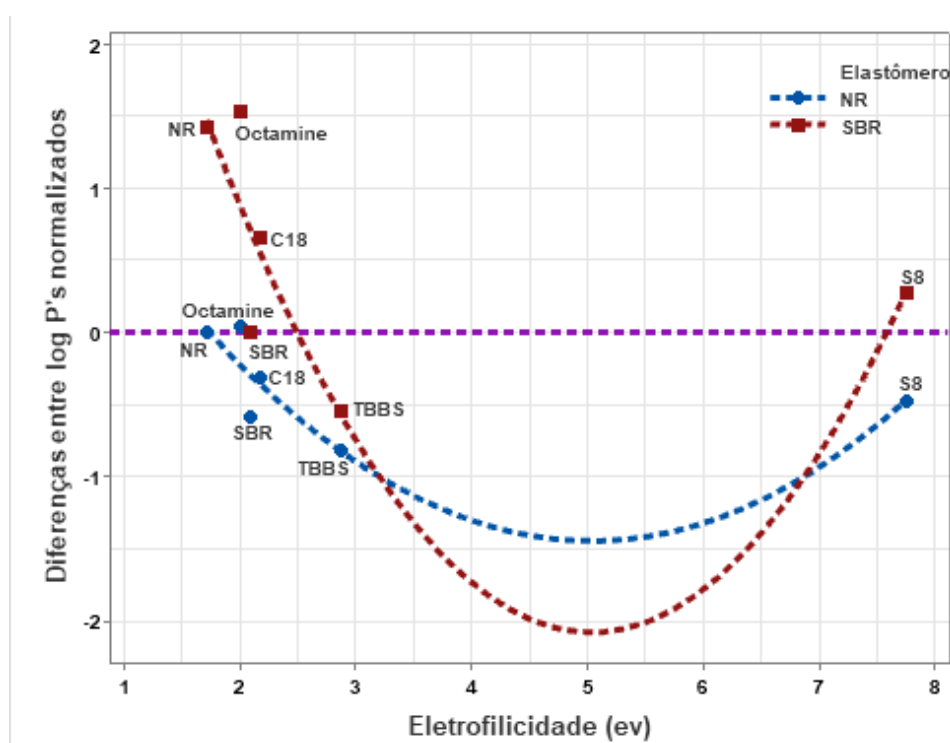
Dando continuidade à análise, o último parâmetro individual estimado pela modelagem molecular, a eletrofilicidade (ω), é exibido na Figura 4. O gráfico relaciona os valores de ω com as diferenças nos valores de lipossolubilidade normalizada para os elastômeros. O objetivo é procurar enxergar mais claramente como a solubilidade e a reatividade contribuem na dispersão dos ingredientes pelas diferentes matrizes de borracha. Convém ressaltar que as diferenças nas lipossolubilidades normalizadas foram calculadas pela Equação 5.

$$\Delta \log P_{n,i} = \log P_{n,i} - 1,0 \quad \text{Eq. 5}$$

em que: $\Delta \log P_{n,i}$ é a diferença encontrada para a espécie i ; $\log P_{n,i}$ é a lipossolubilidade da espécie i normalizada em relação ao NR ou SBR; e, a constante 1 diz respeito ao valor unitário encontrado quando a Equação 4 é calculada para o próprio valor de $\log P$ do elastômero.

Um eletrófilo é um átomo, íon, molécula ou mesmo um composto que possui uma afinidade por elétrons, o que significa que está inclinado a se tornar carregado negativamente. São geralmente considerados ácidos de Lewis, que é um termo para compostos que realmente recebem elétrons durante a reação química. Os eletrófilos também são classificados de acordo com seu grau de reatividade ou sua tendência a aceitar elétrons. Uma medida dessa reatividade é o chamado índice de eletrofilicidade (ω), que indica sua energia elétrica macroscópica. Um índice de eletrofilicidade mais alto indica que um composto é mais eletrofílico (SOLOMONS e FRYHLE, 2001; BRUICE, 2006).

Figura 4: Eletrofilicidade versus as diferenças na lipossolubilidade normalizada para as diferentes espécies presentes na mistura NR/SBR



Por meio da Figura 4 é possível verificar que o enxofre (S_8) é a espécie química mais eletrofílica, seja entre os ingredientes da composição, seja quando comparado aos compostos modelos de SBR e NR. Os demais aditivos da composição como o TBBS, o octamine e o ácido esteárico exibem valores de ω que estão compreendidos na faixa de 2,0 eV a 2,9 eV. Tal faixa engloba o composto modelo do SBR ($\omega_{SBR} = 2,09$ eV), porém exclui o composto modelo de NR, pois $\omega_{NR} = 1,72$ eV. A importância de tal dado é compreender que se examinarmos a reação entre o enxofre e o elastômero como uma reação ácido-base torna-se justificável a maior afinidade do enxofre pela borracha natural – a espécie mais eletrofílica, S_8 , reagindo com a espécie menos eletrofílica, o composto modelo de NR. De igual

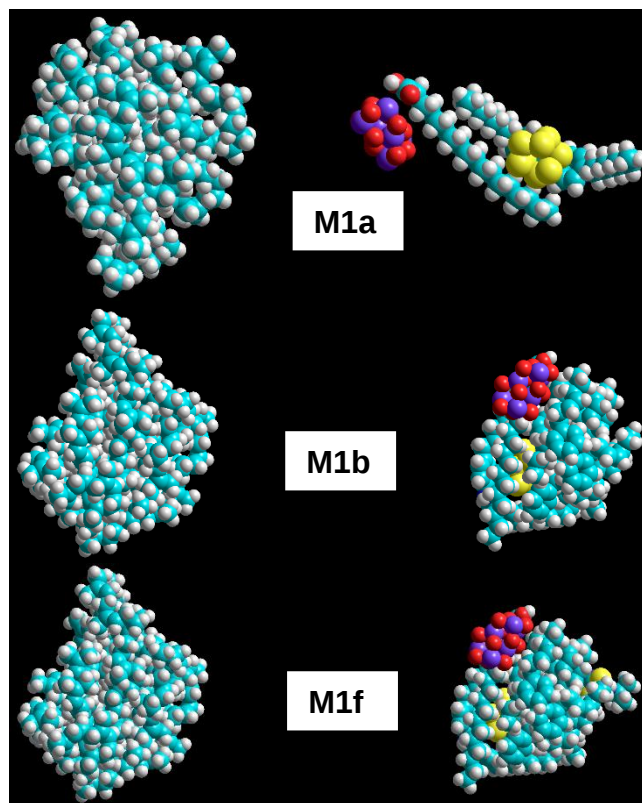
maneira, uma reação entre TBBS e NR e C₁₈ e NR seriam mais propícias do que reações análogas com SBR, em função das diferenças de ω . As consequências imediatas de tal observação são a coerência com as afirmações do manuscrito de VISCONTE et al. (2001) e a conclusão de que a eletrofilicidade é, possivelmente, o parâmetro diretor na avaliação das interações aditivos e elastômeros. Em outras palavras, a reatividade da borracha natural frente aos aditivos é mais significativa do que uma maior solubilidade eventual deles em SBR.

ANÁLISE DA ADSORÇÃO DAS ESPÉCIES NAS MATRIZES DE NR/SBR CONFORME O MÉTODO DE PROCESSAMENTO

O método de processamento da mistura NR/SBR denominado por M1, segundo o procedimento citado em ABREU JUNIOR et al. (2010), envolve três etapas contínuas: os aditivos, com exceção do acelerador, são misturados inicialmente a NR (M1a); homogeneização e adição da borracha SBR (M1b); e, por último, adição do acelerador à mistura homogênea (M1f). A modelagem molecular, usando o método de campos de força AMBER, determinou, após a simulação do processo de adsorção, as situações ilustradas na Figura 5.

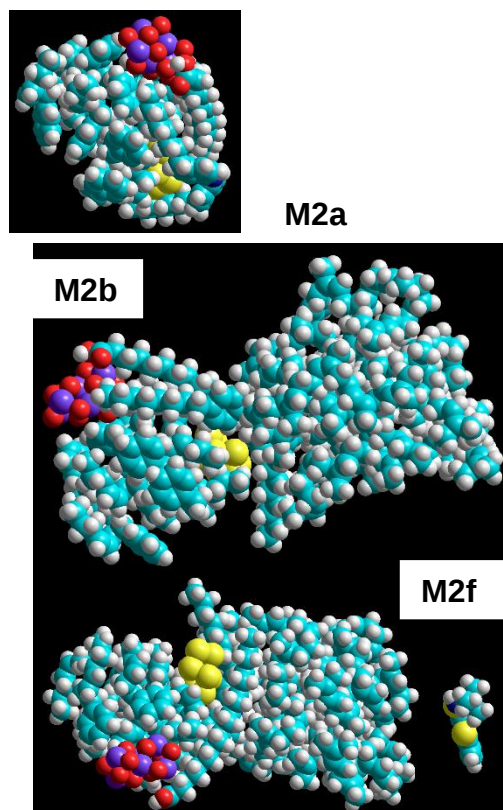
A Figura 5 revela que os aditivos inicialmente preferem uma interação mais efetiva entre si do que com a matriz de NR (Figura 5, M1a), fato compreensível pelo desenvolvimento de forças de interação intermoleculares mais significativas. No entanto, a adição de SBR permite que tais aditivos busquem a adsorção junto à superfície do elastômero, conforme se verifica na Figura 5 em M1b. Quanto à adição do acelerador TBBS (Figura 5, M1f), ela apenas acrescenta um novo aditivo adsorvido à matriz elastomérica de SBR, pois o aspecto geral da adsorção não é alterado significativamente.

Figura 5: Processo de adsorção, segundo a modelagem molecular, para o processamento da mistura NR/SBR segundo o método M1



Quando o processamento denominado M2 é seguido, um cenário completamente diferente é encontrado na adsorção das espécies. Em acordo com as etapas de mistura citadas por ABREU JUNIOR et al. (2010), a adição dos aditivos, com exceção do acelerador, ocorre inicialmente no SBR e isto permite que haja a formação de “um único aglomerado” que inclui a matriz elastomérica, ou seja, logo no início já existe uma adsorção efetiva e conjunta próxima à superfície da borracha (Figura 6, M2a). Tal efeito propaga-se na etapa posterior quando a borracha natural é adicionada, conforme visualizado na Figura 6 em M2b. Novamente, parece haver, de acordo com a modelagem molecular, um único bloco onde os aditivos, à exceção do ZnO (conjunto de esferas em vermelho e roxo na Figura 6), distribuem-se na interface entre SBR e NR. Porém, na etapa final (Figura 6, M2f), representada pela adição do acelerador TBBS, há uma segregação do ingrediente, isto é, a molécula do acelerador parece ficar “isolada” do bloco único gerado em M2b; ainda que, tal distanciamento, entre as extremidades mais próximas, implique em um valor de cerca de 9,81 Å (0,981 nm).

Figura 6: Processo de adsorção, segundo a modelagem molecular, para o processamento da mistura NR/SBR segundo o método M2

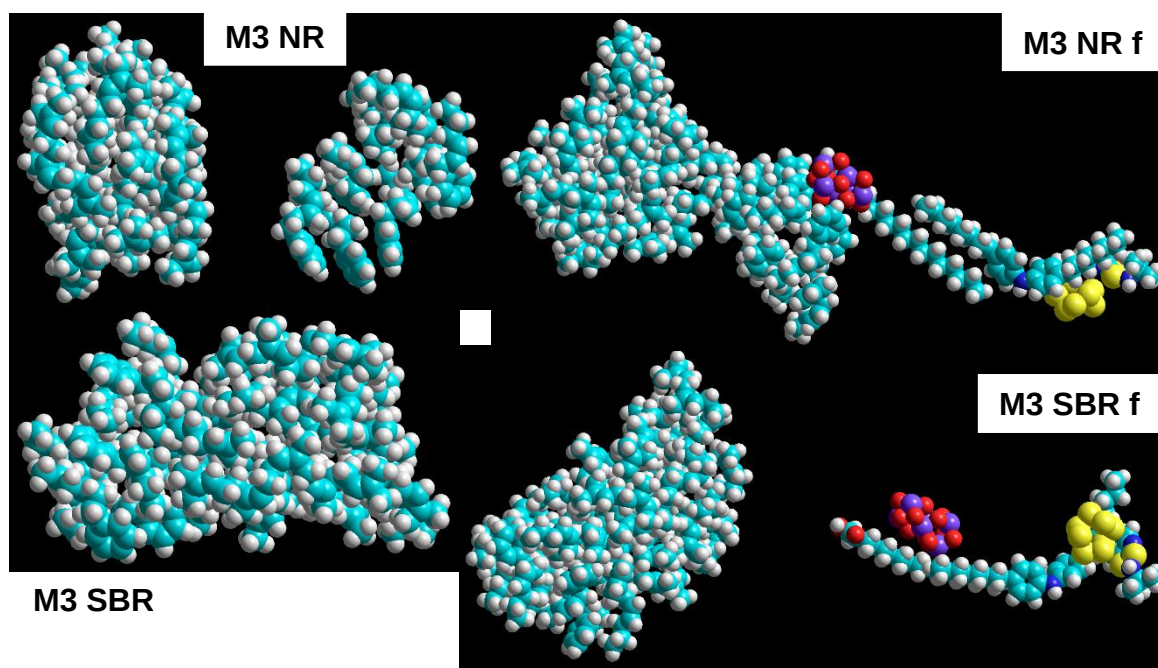


O procedimento designado por M3 corresponde à mistura prévia dos elastômeros, antes da adição dos aditivos. Uma vez que não foi definido no manuscrito de ABREU JUNIOR et al. (2010) a ordem de adição das borrachas, decidimos empregar a modelagem molecular para duas situações distintas. Em M3 NR, a adição segue a ordem NR, SBR e aditivos; enquanto em M3 SBR temos a ordem SBR, NR e aditivos.

O efeito da decisão de como processar a mistura pelo método M3 afeta o mecanismo de adsorção é ilustrado na Figura 7. De acordo com a modelagem molecular, o processo de adsorção quando seguimos a sequência M3 NR gera inicialmente uma segregação entre as matrizes elastoméricas e, posteriormente, a geração de um bloco quase contínuo (Figura 7, M3 NR f). Em tal bloco, NR interage em alguma extensão com o SBR e, este último, dispõe uma interface de contato com ZnO e C₁₈. Muito próximo, há um aglomerado dos demais ingredientes da composição – o octamine, o S₈ e o TBBS. Por sua vez, em M3 SBR é visto que SBR e NR formam inicialmente um aglomerado único e com contato extenso entre as superfícies elastoméricas. Todavia, quando os ingredientes são adicionados (M3 SBR f) cria-se um claro distanciamento com relação ao bloco inicial. O óxido de zinco e o C₁₈ posicionam-

se voltados para a superfície do bloco SBR/NR, ao passo que S₈, TBBS e octamine juntam-se na extremidade oposta, mais distantes.

Figura 7: Processo de adsorção, segundo a modelagem molecular, para o processamento da mistura NR/SBR segundo o método M3



Por último, a metodologia de processamento M4 é ilustrada nas Figuras 8 e 9. Uma vez mais não foi definido no manuscrito de ABREU JUNIOR et al. (2010) a ordem de adição das borrachas e decidimos empregar a modelagem molecular para duas situações distintas. Na adição M4 NR, o processo de mistura ocorre tomando a matriz de NR como protagonista e os efeitos são bem nítidos. Desde a primeira etapa (Figura 8 M4 NR a) até a última (Figura 8 M4 NR f) é visível que os aditivos da composição procuram preferencialmente a superfície da borracha de SBR e o mecanismo de adsorção desenvolve-se junto à superfície dela. Por sua vez, uma similaridade é alcançada entre os processos de mistura M3 SBR e M4 SBR quando analisamos a Figura 9. A escolha da matriz de SBR como agente principal produz novamente dois blocos distintos ao fim da modelagem (M4 SBR/NR f) - um aglomerado de SBR/NR com aditivos compartilhados na interface e um aglomerado isolado com os aditivos residuais.

Figura 8: Processo de adsorção, segundo a modelagem molecular, para o processamento da mistura NR/SBR segundo o método M4 NR

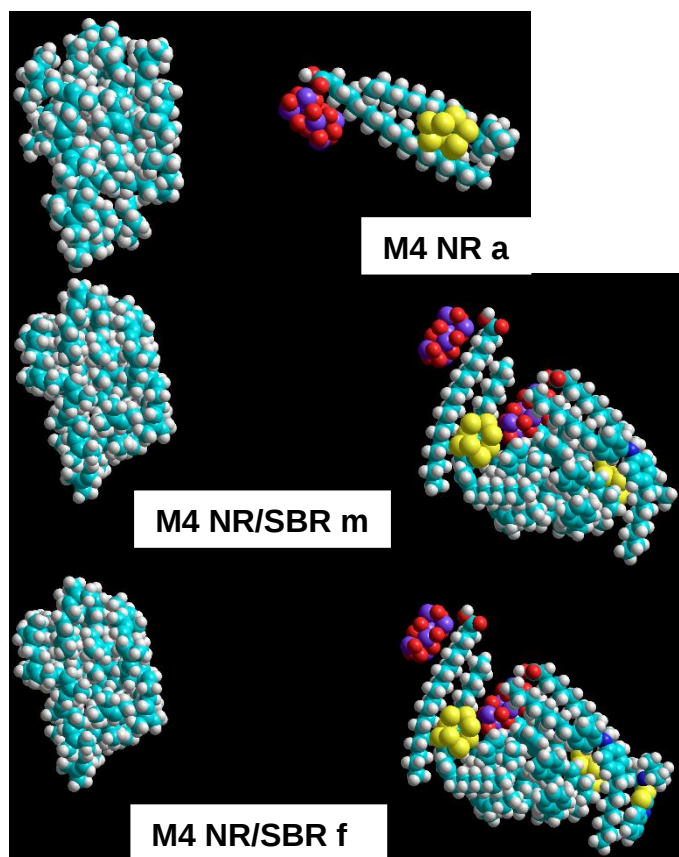
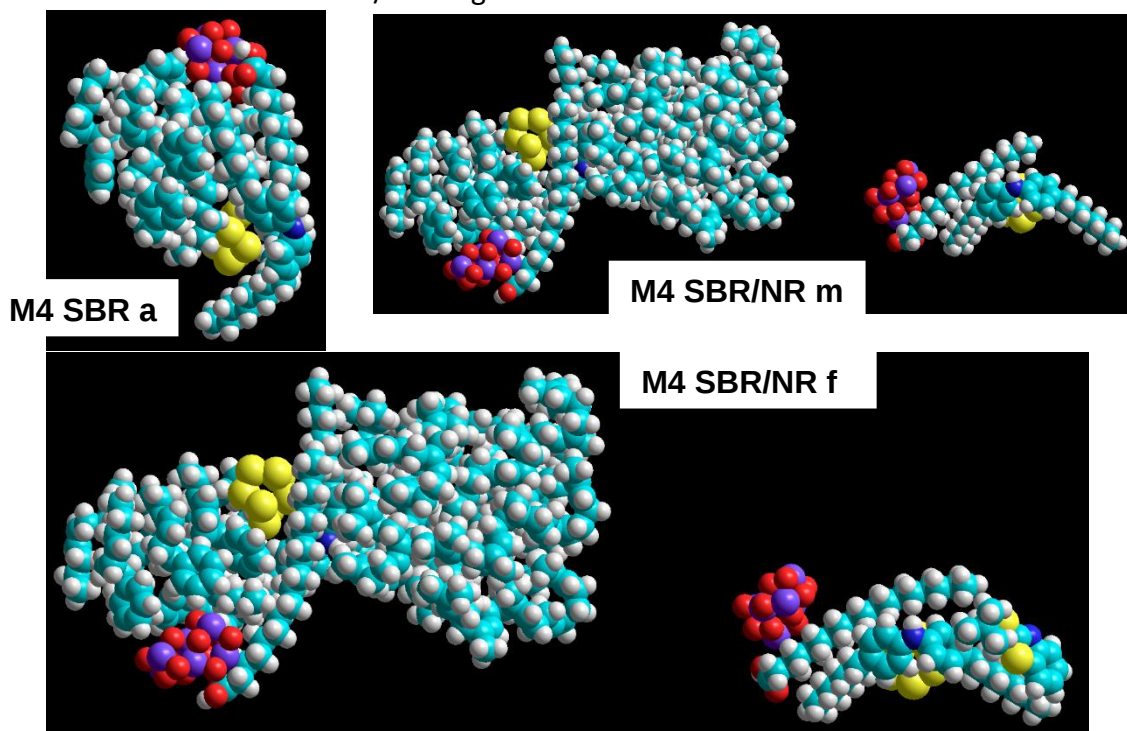
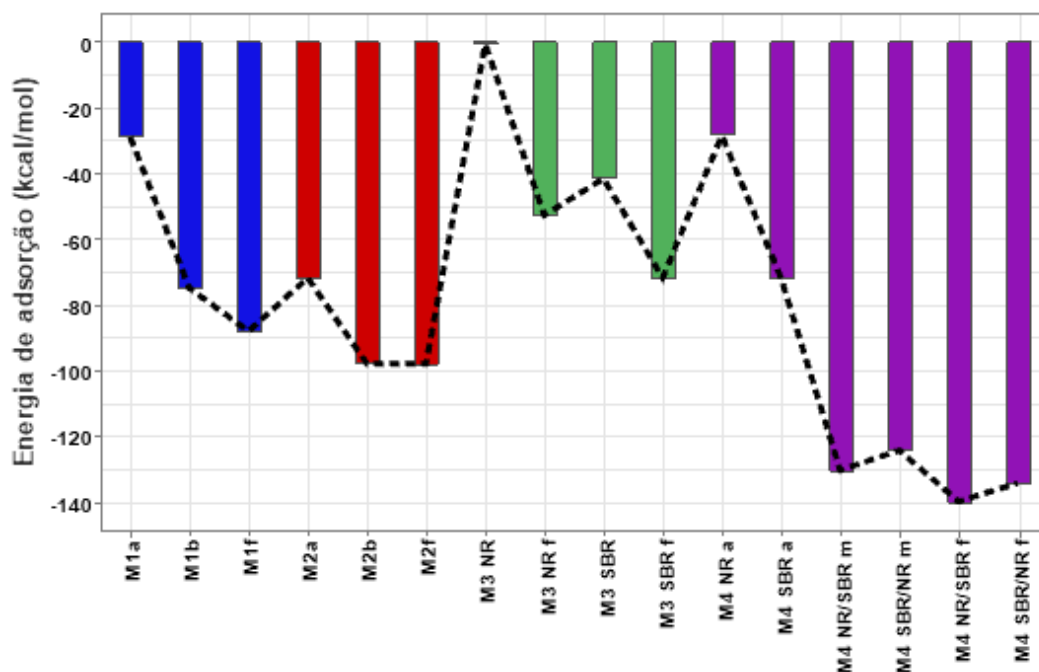


Figura 9: Processo de adsorção, segundo a modelagem molecular, para o processamento da mistura NR/SBR segundo o método M4 SBR



Os valores da energia de adsorção de cada etapa de cada tipo de processamento são exibidos na Figura 10. Os valores foram estimados pela Equação 1 e, segundo RUSSEL (2000), há dois tipos gerais de adsorção: a adsorção relativamente fraca, adsorção física (fisissorção) ou de van de Waals; e, a mais forte, a adsorção química ou quimissorção. A evidência de que a molécula quimissorvida está mais fortemente ligada à superfície provém do fato de que durante a quimissorção se desprende consideravelmente mais calor do que durante a adsorção física. A quimissorção é comum na catálise heterogênea e aparentemente ocorre, de preferência, sobre determinados sítios da superfície, chamados de sítios ativos ou centros ativos. A molécula quimissorvida é de alguma maneira modificada no sítio ativo, de modo que pode reagir mais facilmente com outra molécula.

Figura 10: Valores para a energia de adsorção para cada etapa de cada forma de processamento da mistura de NR/SBR



Mediante a Figura 10 é possível notar que o processamento da mistura NR/SBR através do mecanismo M4 é o que apresenta a mais elevada exotermia, independente da escolha inicial ser NR ou SBR. Tal premissa é verdadeira quando se considera a etapa intermediária, M4 NR/SBR m ou M4 SBR/NR m (borrachas, previamente misturadas à metade dos aditivos da composição, homogeneizadas em uma única batelada), e final, M4 NR/SBR f ou M4 SBR/NR f (adição do acelerador TBBS à mistura das borrachas e demais ingredientes). Hipoteticamente, o mecanismo M4 pode ser apontado como a forma de processamento que mais privilegia a quimissorção. Um contraponto é dado no processamento M3, onde os valores de $E_{ads.}$ são, de forma global, os mais baixos estimados na simulação molecular, independente do modo ser M3 NR ou M3 SBR. Baseado no exposto em RUSSEL

(2000), isto significa que a adsorção pode ter um caráter mais físico (fisissorção) e, portanto, de natureza relativamente fraca.

Os processamentos mediante M1 e M2, em termos de energia de adsorção, podem ser vistos como equivalentes. Excluindo-se a etapa M1a (mistura dos aditivos, com exceção do acelerador, à borracha natural), as diferenças, em módulo, são cerca de 23 kcal/mol entre M2b e M1b e 10 kcal/mol entre M2f e M1f. As diferenças mais marcantes são vistas nas Figuras 5 e 6, as quais revelam as distintas maneiras encontradas pelos ingredientes e o segundo elastômero de interagir com a borracha inicialmente escolhida – NR ou SBR.

De acordo com os experimentos de VISCONTE et al. (2001, 2004), em termos de propriedades mecânicas, os valores de dureza Shore A dos vulcanizados foram intermediários entre os valores dos elastômeros puros (31 para NR e 47 para SBR) e não diferiram quanto ao modo de processamento. No entanto, em relação a resistência ao rasgo, os vulcanizados processados pelos métodos M1 e M3 alcançaram valores próximos ao da borracha natural pura (21,1 kN/m), ao passo que M4 mostrou o pior desempenho (cerca de 9% inferior). Por sua vez, a mistura NR/SBR conduzida pelo método M2 foi a que alcançou maior resistência, aproximadamente 5,7% superior à NR pura. Quanto à resistência à tensão, os valores encontrados, em ordem decrescente, foram: NR pura, 16,2 MPa > NR/SBR, M2, 14,1 MPa > NR/SBR, M1 $\cong$ M4, 12,7 MPa e 12,6 MPa, respectivamente > NR/SBR, M3, 11,1 MPa > SBR pura, 2,6 MPa.

VISCONTE et al. (2001, 2004) verificaram a diferença na reatividade das borrachas de NR e SBR pelos dados reométricos de torque máximo (M_h), 4,7 N.m para NR pura contra 3,5 N.m para SBR pura. Além de atribuírem tal diferença à maior suscetibilidade da borracha natural a formação de ligações cruzadas durante a cura, os autores apontaram um desafio na mistura dos elastômeros: alcançar uma melhora de desempenho da borracha de SBR sem ocasionar efeito deletério sobre as boas propriedades da borracha de NR.

Tais observações podem ser capazes de respaldar a simulação aqui conduzida. Na mistura NR/SBR realizada pelo método M2, os ingredientes são inicialmente adsorvidos pela matriz de SBR (Figura 6, M2a) formando uma espécie de “aglomerado” único. Posteriormente, a borracha natural (Figura 6, M2b) aproxima-se substancialmente deste aglomerado e uma interface contendo os ingredientes, à exceção do ZnO, é criada com a matriz de SBR. O acelerador TBBS, incorporado por último, permanece isolado deste “bloco elastômeros-aditivos”, conforme exhibe a Figura 6 M2f. Estes arranjos talvez permitam que as reações de reticulação sejam conduzidas de forma prioritária na fase SBR, menos

reativa, o que daria condições para uma resposta apropriada ao desafio citado por VISCONTE et al. (2001, 2004). Além disso, em termos de E_{ads} , o processo também encontraria um meio-termo entre fisissorção (pronunciado no preparo de NR/SBR por M3) e quimissorção (em evidência na mistura NR/SBR através de M4).

Ainda de acordo com VISCONTE et al. (2001, 2004), a maior afinidade dos aditivos pela fase NR ocasiona a dispersão inadequada dos mesmos pela mistura NR/SBR e problemas de degradação termo-oxidativa (cisão ou despolimerização e oxidação das ligações duplas C=C com aumento de radicais livres), ou seja, o modo de preparo da mistura tem efeito direto no desempenho dos vulcanizados. Desta forma, uma maior densidade de ligações cruzadas, aferida através de ensaios de inchamento em solvente, da mistura NR/SBR preparada por M1 em relação à mistura de NR/SBR realizada através de M2, não se traduz em melhores propriedades mecânicas.

Em nossa análise do processo de adsorção, a mistura M1 (Figura 5) propicia uma interação efetiva dos ingredientes e, posteriormente, uma assimilação pela matriz de SBR em detrimento à matriz de NR. Uma vez que a fase NR é a mais reativa, os ingredientes podem ter interagido com esta mediante as reações iniciais da vulcanização, conforme descrito em CAMPBELL (2016). Isto geraria um grau de reticulação significativo na fase NR e apenas o residual, aditivos não assimilados, estaria disponível para a cura da fase SBR. O resultado líquido seria manifestado, então, em um desempenho inferior dos vulcanizados. Explicação similar pode ser usada para as misturas NR/SBR processadas por M4, conforme visualizado na Figura 8. Convém ressaltar que o modo de preparo M4 SBR/NR (Figura 9) talvez pudesse propiciar propriedades mecânicas mais significativas, pois qualitativamente aproxima-se da disposição de ingredientes e elastômeros discutida no preparo por M2 (Figura 6).

Os vulcanizados de NR/SBR preparados mediante M3 foram os de pior desempenho, segundo VISCONTE et al. (2001, 2004). Nesta forma de processamento, os aditivos são incorporados às borrachas previamente misturadas. VISCONTE et al. (2001, 2004) assumem que os aditivos podem, preferencialmente, ter migrado para a fase NR, de maior afinidade, e, desta forma, terem sido consumidos essencialmente na reticulação apenas da fase NR.

Em nossa simulação molecular do processo de adsorção (Figura 7), independentemente da escolha da matriz elastomérica inicial (M3 NR ou M3 SBR), há o surgimento de “aglomerados” isolados. Em M3 NR, além de uma segregação inicial entre as borrachas, o processamento culmina em uma disposição de ingredientes aglomerados e uma pequena área superficial de contato apenas com o SBR. No que diz respeito ao M3 SBR, embora surja um contato íntimo entre as borrachas; os aditivos, ao final,

mostram-se distante deste aglomerado. Além disso, os baixos valores calculados de E_{ads} (Figura 10) predizem interações de caráter mais fraco, o que, presumivelmente, impõe maior grau de dificuldade na aproximação e reação das espécies químicas para a geração de uma rede de ligações cruzadas satisfatória na mistura NR/SBR. Tais especulações podem ser ratificadas nos dados experimentais de VISCONTE et al. (2001, 2004).

CONCLUSÕES

A modelagem molecular foi utilizada para o estudo teórico de misturas de borracha natural (NR) / copolímero de estireno-butadieno (SBR) preparadas de diferentes formas. A análise da energia de adsorção e do aspecto final de distribuição de ingredientes e matrizes elastoméricas, após a simulação, permitiu as seguintes conclusões:

- O método de preparo da mistura NR/SBR apresenta considerável efeito sobre o desempenho final do vulcanizado;
- Entre os métodos testados experimentalmente por VISCONTE et al. (2001, 2004) e simulados através da modelagem molecular com os campos de forças AMBER, a metodologia de preparo M2 é a escolha mais adequada. Em tal processamento, os aditivos, com exceção do acelerador, são misturados inicialmente com a SBR e, após a homogeneização, a borracha NR é adicionada. Por último, o acelerador é acrescentado à mistura homogênea; e,
- O processamento através de M2 parece encontrar o balanço energético adequado entre os processos de adsorção físico e químico, segundo a modelagem molecular. Além disso, a distribuição final dos ingredientes e matrizes elastoméricas visualizados na Figura 6 é corroborado pelos apontamentos de VISCONTE et al. (2001, 2004) sobre as diferenças de reatividade entre NR e SBR durante a cura.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem aos órgãos de fomento CNPq e FAPERJ, e ao programa Bolsa Pesquisa & Produtividade 2023 da Universidade Estácio de Sá (UNESA).

BIBLIOGRAFIA

- Amber – MCPLWiki. Disponível em: <http://www.iq.usp.br › mcplwiki › amber>. Consulta em janeiro de 2023.
- ABREU JUNIOR, H. M. B.; NUNES, R. C. R.; VISCONTE, L. L. Y. – Misturas NR/SBR: Influência da composição e do modo de preparação sobre propriedades mecânicas e reométricas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.21(03), p.204-209. 2011. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.20(01), p.1-5. 2010.
- BROWN, T. L.; LEMAY Jr., H. E.; BURSTEN, B. E.; BURDGE, J. R. – Química, A Ciência Central. Pearson Education do Brasil, 9^{ed}, São Paulo, SP, 2005.
- BRUICE, P. Y. – Química Orgânica. Pearson Education do Brasil, 4^{ed}, vol.1, São Paulo, SP, 2006.
- CAMPBELL, B. C. – Análise térmica aplicada ao estudo das reações de vulcanização em elastômeros – efeito de óleos vegetais e da cera de abelha. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico (IPRJ), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Nova Friburgo, RJ, 2016.
- CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. – Química. AMGH Editora Ltda., 11^{ed}, Porto Alegre, RS, 2013.
- CTB – Ciência e Tecnologia da Borracha. Endereço eletrônico: <https://www.ctborracha.com/>. Consulte em julho de 2023.
- COELHO, D. B.; MARIANO, R. M.; ZINE, C. L. G.; NUNES, R. C. R.; VISCONTE, L. L. Y. – Misturas NR/SBR: Influência da ordem de adição dos aditivos da mistura e do tipo de carga sobre propriedades mecânicas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.21(03), p.204-209. 2011.
- NASCIMENTO, Z. S. C.; PINTO, P. R.; SIRQUEIRA, A. S. – Misturas elastoméricas de SBR/borracha nitrílica carboxilada compatibilizadas com poliacroleína. *The Journal of Engineering and Exact Sciences (JCEC)*, v.05(01), p.0037-0042, 2019.
- RUSSEL, J. B. – Química Geral. Pearson Education do Brasil, 2^{ed}, v.2, São Paulo, SP, 2000.
- SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B. – Química Orgânica. LTC Editora, 7^{ed}, vol.1, Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- STORPIRTIS, S.; GAI, M. N.; CAMPOS, D. R.; GONÇALVES, J. E. – Farmacocinética Básica e Aplicada. Editora Guanabara Koogan, 1^{ed}, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- VISCONTE, L. L. Y.; MARTINS, A. F.; NUNES, R. C. R.; SUAREZ, J. C. M. – Misturas NR/SBR: Modos de preparação e propriedades. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.11(02), p.76-81, 2001.
- VISCONTE, L. L. Y.; MARTINS, A. F.; NUNES, R. C. R.; SUAREZ, J. C. M. – Different preparative modes for the incorporation of additives in NR/SBR Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, v.93(2), p.483-489, 2004.

Capítulo 8



10.37423/230808121

MODELAGEM MATEMÁTICA DE CINÉTICAS DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA DE PRODUTOS NATURAIS

Ana Paula de Souza e Silva

Universidade Federal do Pará

Jean Maurício Leão Pinheiro

Universidade Federal do Pará

Flávia Cristina Seabra Pires

Universidade Federal do Pará

Maria Caroline Rodrigues Ferreira

Universidade Federal do Pará

Letícia Maria Martins Siqueira

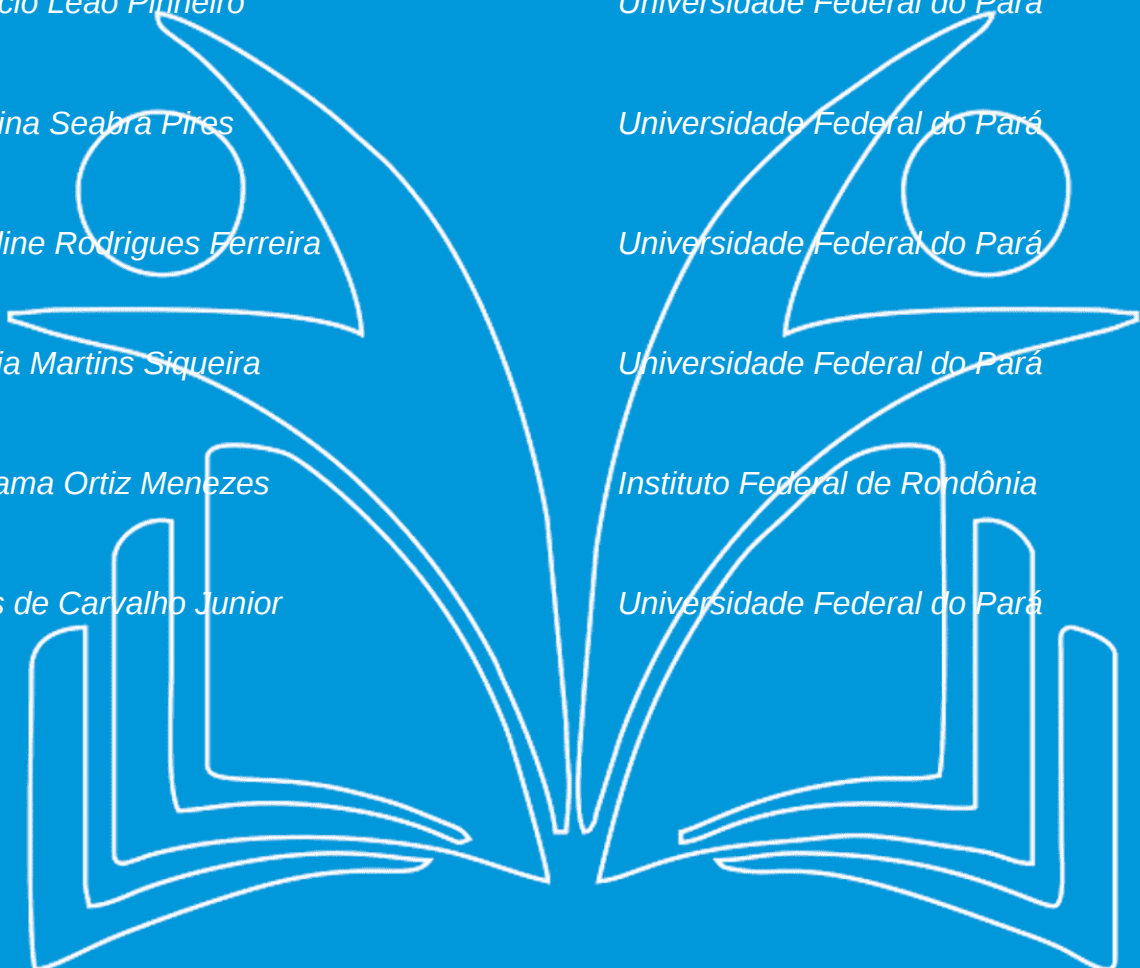
Universidade Federal do Pará

Eduardo Gama Ortiz Menezes

Instituto Federal de Rondônia

Raul Nunes de Carvalho Junior

Universidade Federal do Pará



Resumo: O objetivo deste trabalho é determinar parâmetros de transferência de massa a partir das cinéticas de extração dos óleos de sementes de maracujá (*Passiflora edulis*) e polpa de pupunha (*Guilielma speciosa*), através da avaliação dos modelos matemáticos de Tan e Liou (1989), Goto et al. (1993) e Martínez et al.(2003). As cinéticas foram realizadas utilizando-se 400g de sementes do maracujá e 20g de polpa da pupunha nas condições de 250 Bar e 50°C para pupunha e 250 Bar e 70°C para o maracujá e diferentes configurações de leito. Consequentemente, foi elaborada uma base de dados com os resultados obtidos através da comparação e avaliação das previsões dos modelos aos dados experimentais. Os modelos foram analisados de acordo com os erro relativo (e), erro médio relativo (*Em*), desvio padrão (S) e faixa de erro (R). O modelo de Martínez et. al.(2003) foi o que apresentou os melhores ajustes para o maracujá e para a pupunha, os modelos de Tan e Liou (1989) e Martínez et al.(2003) apresentaram melhores resultados.

1. INTRODUÇÃO

A região amazônica possui uma vasta diversidade de plantas e animais, e com isso, vem recebendo especial atenção pelas indústrias alimentícias, principalmente por conta de suas plantas, que possuem alto poder antioxidante e excelente valor nutritivo.

A pupunha (*Guilielma speciosa*) é um fruto rico em proteínas, carboidratos, e vários elementos minerais, como cálcio, ferro, fósforo, entre outros. Também se destaca como fonte rica em pró-vitamina A. (CAVALCANTE, 1991.). Possui elevado conteúdo de óleo e grande valor nutritivo, essas características podem fazer do fruto da pupunheira, um produto com imenso valor de mercado e de grande valor na segurança alimentar (ZUMBADO e MURILLO, 1984).

O maracujá (*Passiflora edulis*) é um fruto cultivado em diversas regiões do mundo. E apesar de não se ter comprovação de sua natividade, acredita-se que o fruto seja nativo do Brasil. Seu cultivo se dá em larga escala no Brasil, através da produção de sucos. Cerca de 60 espécies produzem frutas comestíveis, duas destas, são cultivadas em todo o mundo e podem ser usadas, direta ou indiretamente como alimento, ou para obtenção de doces, licores, refrescos, sorvetes, sucos e em misturas com bebidas alcoólicas. Atribui-se ao maracujá propriedades médico-farmacêuticas tais como: ação anti-helmíntica e sedativa. (CORRÊA, 1994).

A utilização de compostos sintéticos nos produtos industrializados vem sofrendo cada vez mais rejeições por parte das indústrias tanto alimentícia quanto farmacêutica. Desta forma, a comunidade científica tem buscado alternativas de melhoria na obtenção de compostos naturais. O problema da extração com outros métodos convencionais, como o solvente orgânico, é que além de deixar resíduos frequentemente proibidos em alimentos, apresenta o problema da transformação oxidativa que o extrato sofre quando o solvente é eliminado. (SEBASTIÁN et. al., 1998).

Por ser uma tecnologia limpa, a Extração com fluido supercrítico (SFE, Supercritical fluid extraction) vem sendo difundida nas mais diversas áreas industriais, dadas às suas vantagens únicas tais como temperaturas baixas, extração seletiva, simplicidade e a recuperação do produto livre do solvente.

O maior obstáculo ao uso da tecnologia supercrítica na indústria é o alto investimento necessário para a instalação de uma unidade de extração. A minimização do custo é possível através da otimização do processo, que envolve o dimensionamento do equipamento e a definição das condições operacionais. Para a otimização destas condições, é de fundamental importância a modelagem matemática dos processos de extração e separação. A análise de uma curva de extração para um determinado processo pode ajudar a definir o volume do extrator, a vazão requerida de solvente para a taxa de extração desejada, entre outros. Para tanto, os modelos matemáticos devem ajustar parâmetros cujo valor

possa ser predito como função das condições operacionais, de forma que seja possível a partir de curvas modeladas projetar um processo de extração supercrítica em escala industrial. (MARTÍNEZ, 2005)

O objetivo deste trabalho consiste na determinação de parâmetros de transferência de massa aplicados à SFE a partir do tratamento de dados cinéticos obtidos com a extração de dois diferentes extratos vegetais através da utilização de ferramentas computacionais. Consequentemente, elaborar um banco de dados destes parâmetros, possibilitando a utilização destes para futuros estudos de aumento de escala de produção e servindo de base para as indústrias que utilizam essas matérias-primas em seus processos produtivos.

2. METODOLOGIA

2.1 EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA

Curvas globais de extração: As curvas globais de extração do maracujá foram obtidas por Corrêa (1994) e da pupunha por Araújo et. al.(2000), conforme descrito nas seguintes etapas:

a) para obtenção das curvas globais do maracujá (*Passiflora edulis*) foram utilizadas sementes da mesma, fornecidas pela AMAFRUTAS (Benevides – Pará - Brasil). O diagrama esquemático da unidade de extração está descrito em Corrêa (1994). Foram utilizadas 400g de sementes de maracujá. As condições de extração foram 70°C e 250bar com vazão de CO₂ de 0,025Kg/s. O leito fixo apresentou as seguintes características físicas: densidade real 929,7 Kg/m³, densidade aparente 744,7 Kg/m³, diâmetro médio das partículas 0,000319m, porosidade do leito 0,2 e volume do leito 0,0035m³. b) para obtenção das curvas globais da pupunha (*Guiljelma speciosa*) foram utilizadas 20g de polpa adquiridas em lojas locais de Belém (Pará- Brasil). O diagrama esquemático da unidade de extração utilizada está descrito em Araújo et. al. (2000). As condições de operação foram de 50°C e 250bar com vazão de CO₂ de 0,31Kg/s. As configurações do leito fixo foram as seguintes: densidade real 960Kg/m³, densidade aparente 10Kg/m³, diâmetro médio das partículas 0,0004745m, porosidade do leito 0,99 e volume do leito 0,002m³. Estes resultados foram utilizados como dados de entrada para os modelos da literatura.

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os dados experimentais (massa de extrato versus tempo de extração) das condições operacionais de 250bar, 70°C, vazão de CO₂ de 0,025Kg/s do maracujá e 250bar, 50°C, vazão de CO₂ de 0,31Kg/s da pupunha com suas respectivas configurações de leito, foram utilizados para o ajuste dos parâmetros

de processo utilizando os modelos de Goto et. al. (1993), Tan e Liou (1989) e Martínez et. al. (2003). Na tabela 1, encontram-se as equações dos modelos utilizados.

Tabela 1 – Equações dos modelos

Modelo	Equação
Goto et. Al. (1993)	$m = \frac{A[\frac{P}{K} + (1 - \beta)]X_0 Q_{CO_2}}{\rho} \left\{ \frac{1 - \exp(-a_1 t)}{a_1} + \frac{1 - \exp(-a_2 t)}{a_2} \right\}$
Tan e Liou (1989)	$m = \frac{A}{K_d} [1 - \exp(K_d B)] [\exp(-K_d t) - 1]$
Martínez et. Al. (2003)	$m = \frac{X_0 F_0}{\exp(b t_{mi})} \left\{ \frac{1 + \exp(b t_{mi})}{1 + \exp[b(t_{mi} - t)]} - 1 \right\}$

Foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos para a análise dos resultados da modelagem matemática: erro relativo (e), erro médio relativo (Em), desvio padrão (S), faixa de erro (R) expressos nas equações de 1 a 4, respectivamente.

$$e = \frac{m_{cal} - m_{exp}}{m_{exp}} \quad (1)$$

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_i e \quad (2)$$

$$S = \left[\frac{1}{N-1} \sum_i (e - E_m)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$R = e_{max} - e_{min} \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de processo referentes aos leitos fixos das sementes de maracujá e polpa da pupunha, necessários para o ajuste de parâmetros dos modelos de transferência de massa de Goto et. al. (1993), Tan e Liou (1989) e Martínez et. al. (2003) estão apresentados na tabela 2.

Na tabela 3 estão apresentados os valores dos parâmetros dos modelos ajustados as curvas de cinética de extração.

Tabela 2 – Parâmetros de processo para a extração de óleo das matrizes vegetais

Parâmetro	Condições	
	Maracujá (400g)	Pupunha (20g)
T (°C)	70	50
P (bar)	250	250
A (m ²)	0,069	0,000000176833
V (m ³)	0,0035	0,002
Q _{CO₂} (Kg/s)	0,025	0,31
H (m)	0,275	0,044
D (m)	0,08	0,029
ρ _s (Kg/m ³)	929,7	960
ρ _{CO₂} (Kg/m ³)	811,18	
ε (-)	0,2	0,99

Tabela 3 – Parâmetros dos modelos de transferência de massa

	Goto <i>et. al.</i> (1993)		Tan e Liou (1989)	Martínez <i>et. al.</i> (2003)	
	Φ	K	K _d (min ⁻¹)	bi (min ⁻¹)	t _{mi} (min)
Maracujá	229,46	7,31	8,08256E-5	4,8793E-4	2871,20
Pupunha	2172,42	0,93	5,28142E-4	4,30564E-4	-70813,01

Nas tabelas 4 e 5 estão descritos os parâmetros estatísticos determinados a partir dos valores calculados, com os respectivos parâmetros ajustáveis, das curvas de cinética de extração dos óleos de maracujá e pupunha empregando CO₂ supercrítico. Os modelos de Tan e Liou (1989), Martínez et al.(2003) e Goto et al. (1993) ajustaram quantitativamente as cinéticas de extração, apresentando baixos erros médios relativos.

O modelo de Martínez et al. (2003) apresentou os menores erros médios relativos e desvios padrão, para a cinética de extração do maracujá. O modelo de Tan e Liou (1989) apresentou o menor desvio padrão e o de Martínez et al.(2003) apresentou o menor erro médio relativo para a cinética de extração da pupunha.

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos da curva de extração do óleo de maracujá

Modelos	Parâmetros Estatísticos		
	Erro Médio	Faixa de Erro	Desvio Padrão
Tan e Liou (1989)	0,0909	1,0420	0,2462
Martínez <i>et al.</i> (2003)	0,0025	0,2592	0,0483
Goto <i>et al.</i> (1993)	0,0382	0,8437	0,1906

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos da curva de extração do óleo de pupunha

Modelos	Parâmetros Estatísticos		
	Erro Médio	Faixa de Erro	Desvio Padrão
Tan e Liou (1989)	-0,0174	0,3471	0,0887
Martínez <i>et al.</i>(2003)	-0,0212	0,3303	0,0922
Goto <i>et al.</i> (1993)	-0,0073	0,3443	0,0895

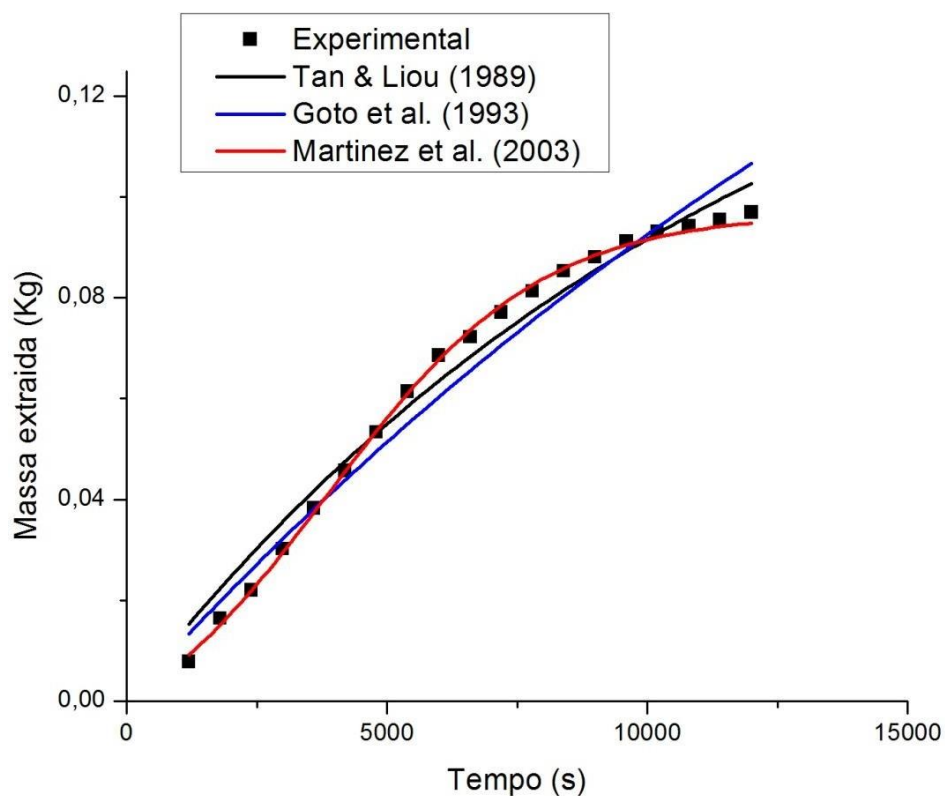


Figura 1 - Modelagem das cinéticas de extração do óleo de sementes de maracujá.

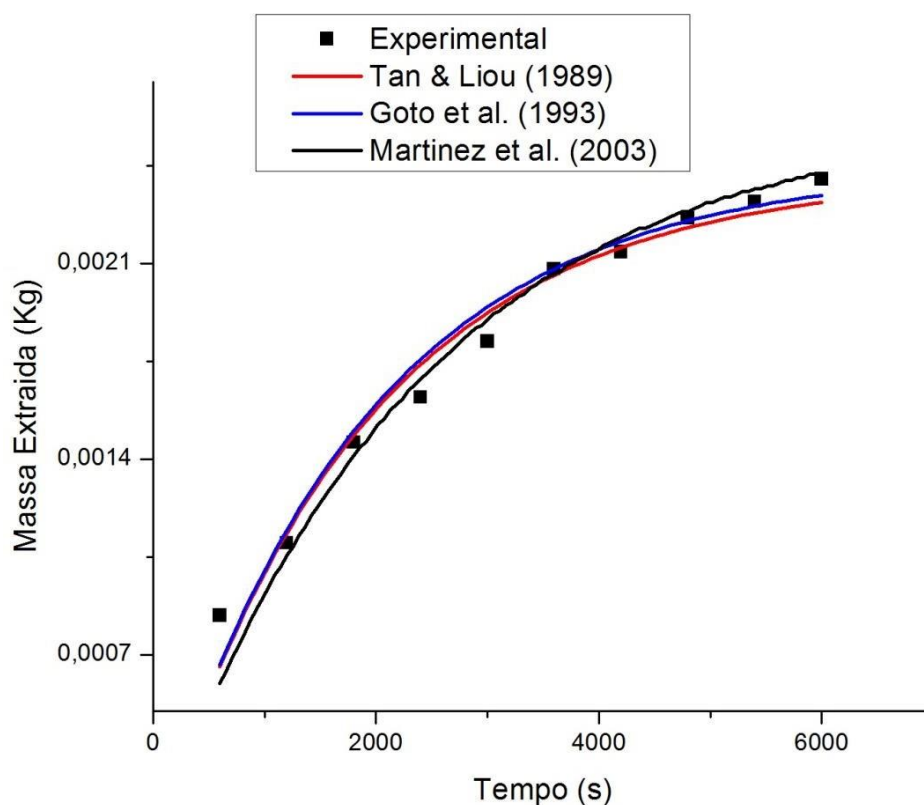


Figura 2 - Modelagem das cinéticas de extração do óleo da polpa da pupunha.

4.CONCLUSÕES

Conclui-se neste trabalho que todos os modelos de transferência de massa utilizados para modelagem das curvas globais de extração dos extratos de Maracujá e Pupunha descreveram satisfatoriamente as cinéticas de extração apresentando baixos desvios médios. Para o maracujá, o modelo de Martínez et.al. (2003) apresentou menores erros médios relativos e desvios padrão. Para a pupunha, os modelos de Tan e Liou (1989) apresentou o menor desvio padrão e o de Martínez et. al.(2003) apresentou o menor erro médio relativo.

5.REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. E.; MACHADO, N. T.; FRANÇA, L. F.; MEIRELES, M. A. A. Supercritical Extraction of Pupunha (*Guilielma speciosa*) oil in a fixed bed using carbono dioxide. *Braz. J. of Chem. Eng.*, v. 17, n. 3, 2000.
- CAVALCANTE, P. B., *Frutas Comestíveis da Amazônia*, Edições CEJUP, Museu Paraense Emílio Goeldi, 1991.
- CORRÊA, N. C. F. Estudo da Cinética de Extração de Óleo da Semente de Maracujá com CO₂ Supercrítico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Pará, Belém, 1994.
- GOTO, M.; SATO, M.; HIROSE, T. Extraction of Peppermint Oil by Supercritical Carbon Dioxide. *J. of Chem. Eng. of Japan*. n. 26, p. 401 - 407, 1993.
- MARTÍNEZ, J. Extração de Óleos Voláteis e Outros Compostos com CO₂ Supercrítico: Desenvolvimento de uma Metodologia de Aumento de Escala a partir da Modelagem Matemática do Processo e Avaliação dos Extratos Obtidos. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.
- MARTÍNEZ, J.; MONTEIRO, A. R.; ROSA, P. T. V.; MARQUES, M. O. M.; MEIRELES, M. A. A. Multicomponent Model to Describe Extraction of Ginger Oleoresin with Supercritical Carbon Dioxide. *Industrial and Engineering Chemical Research*, n. 42, p. 1057- 1063, 2003.
- SEBASTIÁN, S. L.; RAMOS, E.; IBÁÑEZ, E.; BUENO, J. M.; BALLESTER, L.; TABERA, J.; REGLERO, G. Dearomatization of Antioxidant Rosemary Extracts by Treatment with Supercritical Carbon Dioxide. *J. of Agric. and Food Chem.*, n. 46, p. 13, 1998.
- TAN, C.; LIOU, D. Modeling of Desorption at Supercritical Conditions. *Am. Inst. of Chem. Eng. J.*, v. 6, n. 35, p. 1029 - 1031, 1989.
- ZUMBADO, M.; MURILLO, M. Composition and nutritive value of pejibaye (*Bactris gasipaes*) in animal feeds (Composição e valor nutritivo de pupunha em ração animal). *Revista de Biología Tropical*, v. 32, p. 51-56, 1984.

Capítulo 9



10.37423/230808132

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DE SUCOS DE FRUTAS

Marcelo Bacci da Silva

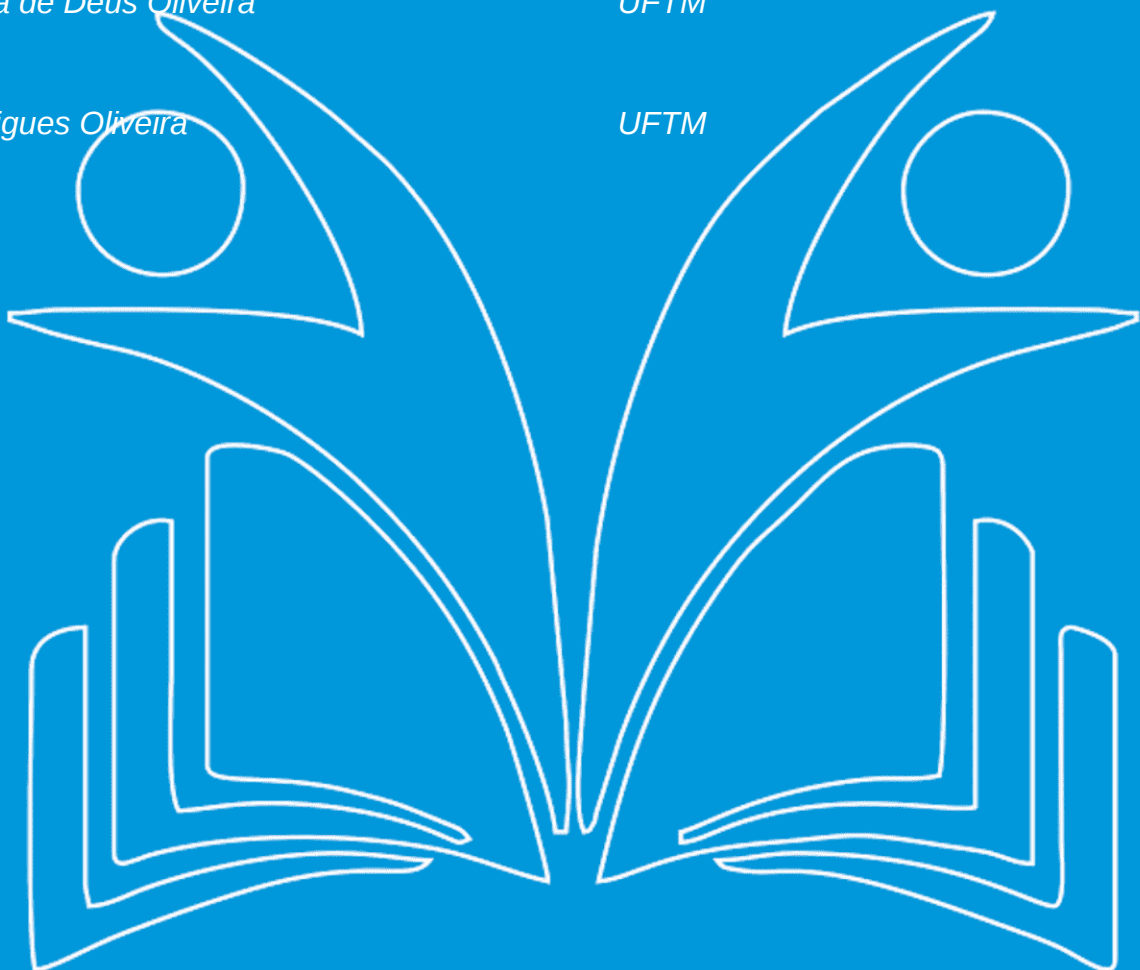
UFTM

Laura Vieira de Deus Oliveira

UFTM

Nicoli Rodrigues Oliveira

UFTM



Resumo: Dados referentes às propriedades térmicas de sucos de frutas são ainda escassos na literatura. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo determinar experimentalmente o calor específico do suco de laranja pelo método proposto por Hwang e Hayakawa, através da modificação de uma garrafa térmica como calorímetro. Os resultados obtidos foram coerentes quando comparados aos da literatura, comprovando a eficácia deste método.

Termos de indexação: Calorímetro, garrafa térmica, propriedades térmicas, suco de frutas.

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por alimentos no país e no mundo faz com que haja aumento também na necessidade de modernização e um maior desenvolvimento tecnológico, com o objetivo de produzir mais, além de melhorar e conservar de maneira mais duradoura os produtos.

A indústria de sucos tropicais no país necessita dimensionar os equipamentos utilizados no processamento, principalmente aqueles destinados à transferência de calor e isto exige dados precisos de propriedades térmicas dos produtos, tais como condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico.

O objetivo deste trabalho foi aplicar uma adaptação do método desenvolvido por Hwang & Hayakawa (1979) para determinar o calor específico do suco de laranja, utilizando-se uma garrafa térmica adquirida no comércio local, adaptada para servir como calorímetro, preenchida com um líquido inerte. O cálculo é feito através de um balanço global de energia em um sistema considerado isolado termicamente.

REVISÃO TEÓRICA

Polpas de frutas estão sujeitas a processos de resfriamento e aquecimento. Quando o alimento não é consumido imediatamente, existe a necessidade de ele ser processado, incluindo ser resfriado ou congelado para conservação de suas características.

Na literatura já existem trabalhos publicados sobre propriedades térmicas. Polley et al. (1980), por exemplo, publicaram tabelas dessas propriedades para diversos alimentos, entre eles carnes, frutas, legumes, cereais e também diversos sucos, porém estão incompletas.

Valores experimentais de difusividade térmica de sucos de frutas tropicais, tais como maçã, cereja, uva, laranja e tomate foram publicados no trabalho de George (1990). Resultados significativos na determinação das propriedades termofísicas de diversos sucos foram apresentados por Telis-Romero et al. (1998).

Apesar da existência de trabalhos científicos já publicados, vale ressaltar que o Brasil é o maior produtor e exportador de laranja, detendo 50% de toda produção mundial, sendo que apenas 3% é destinada ao mercado interno. Há um crescente aumento da demanda por produtos alimentícios no país. Visando atender as exigências de modernização, aumentando a qualidade técnica dos processos industriais, maiores informações sobre propriedades físicas são necessárias. Dados já publicados para muitos produtos alimentícios não são adequados, na maioria das vezes, para os produtos nacionais, conforme Moura et al. (2003).

Os autores consideram como inovação do trabalho o fato de serem utilizados equipamentos simples, de baixo custo para a aquisição, facilmente encontrados no mercado brasileiro e adaptados para o uso com a metodologia proposta, além disso não foram encontrados dados experimentais para o calor específico da laranja, mas apenas aqueles preditivos baseados na composição da fruta. Estes modelos não podem ser empregados de forma indiscriminada, pois estão sujeitos aos desvios causados pela complexidade dos produtos alimentícios.

MATERIAL E MÉTODOS

O calor específico do suco de laranja foi determinado experimentalmente através de uma adaptação do método proposto por Hwang & Hayakawa,(1979). Um calorímetro foi construído através da modificação de uma garrafa térmica, marca INVICTA, de capacidade volumétrica de 1 litro. Uma tampa foi construída de tecnil, usinada para se adaptar à parte superior da garrafa, com abertura para colocação de um termopar. Na parte inferior da garrafa, um furo apropriado foi feito para inserir um segundo termopar. O calorímetro usado para medição do calor específico é apresentado esquematicamente na **figura 1**.

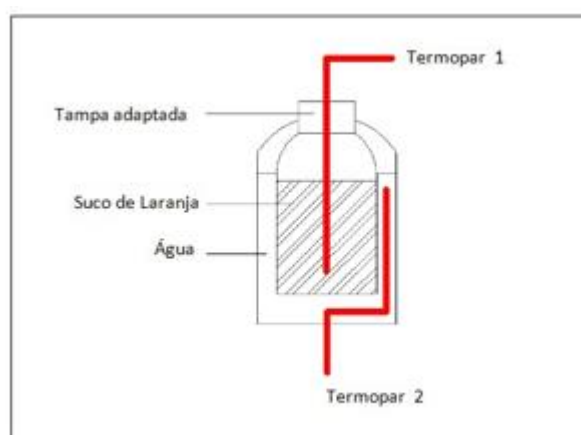


Figura 1. Esquema do calorímetro utilizado para medição do calor específico.

Uma massa de água de 418,0 g foi colocada na parte externa da garrafa, no espaço entre a garrafa e o corpo de plástico, de modo que o nível de água foi até cerca de 2,0 cm abaixo da borda da tampa. O sistema foi apropriadamente vedado para evitar fugas de água. A temperatura dessa massa de água foi medida pelo termopar 2 da **Figura 1**.

No interior da garrafa térmica foi inserido o suco de laranja, preparado a partir de seis laranjas adquiridas no mercado local, sem adição de água, com massa total de 510,0 g. A temperatura do suco de laranja foi medida pelo termopar 1 da **figura 1**.

ANÁLISE

A capacidade térmica do calorímetro foi necessária como um fator de correção para a determinação do calor específico do suco de laranja. Um procedimento foi então desenvolvido para essa determinação, sendo realizado em triplicata.

A massa de água, inicialmente a 60°C, foi colocada no espaço entre a garrafa de vidro e o corpo plástico da garrafa térmica, adaptada como calorímetro. As temperaturas da água e do calorímetro foram registradas continuamente por cerca de uma hora. Foi observado que, após aproximadamente 30 minutos, os conteúdos atingiram uma taxa de calor com o meio ambiente constante.

A partir da lei da conservação de energia, o calor total da água e do calorímetro, no estado inicial, deverá ser igual ao calor no estado final, após o equilíbrio, mais a taxa de calor que é perdida para a vizinhança. Adotando então o índice i para representar o estado inicial e o índice f para o estado final, quando o sistema atingiu o equilíbrio, tem-se a **equação 1**:

$$C_{Pa}m_aT_{Oa} + C_{Pc}m_cT_{Oc} = C_{Pa}m_aT_e + C_{Pc}m_cT_e - R$$

O calor perdido para a vizinhança é considera-do constante durante o experimento e pode ser determinado pela **equação 2**:

$$R = \frac{dq}{dt} = [m_c C_{Pc} + m_a C_{Pa}] \left(\frac{dT}{dt} \right) t_e \quad (2)$$

Substituindo a **equação 2** na **equação 1**, tem-se uma expressão apropriada para a determinação do calor específico do calorímetro, que é a **equação 3**:

$$m_c C_{Pc} = \frac{m_a C_{Pa} \left[T_{Oa} - T_{fa} + \left(\frac{dT}{dt} \right) t_e \right]}{\left[T_{fc} - T_{Oc} - \left(\frac{dT}{dt} \right) t_e \right]} \quad (3)$$

Na **equação 3** o termo $\left(\frac{dT}{dt} \right)$ representa a inclinação da curva da temperatura em função tempo, apresentada na **figura 2**, com unidade (°C/s).

O experimento é novamente realizado, agora usando o suco de laranja no interior do calorímetro. As temperaturas do suco de laranja, da água e do calorímetro são novamente monitoradas, até que se atinja o equilíbrio térmico com o meio ambiente.

Usando novamente a lei da conservação da energia, a quantidade de calor total do sistema no estado inicial deverá ser igual ao conteúdo de energia no estado final menos a parcela que é perdida para o ambiente, que dessa vez será dada pela **equação 4**.

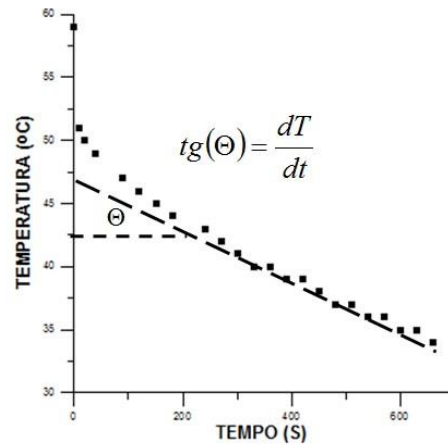


Figura 2. Variação da temperatura da água durante o experimento com o calorímetro.

$$R = [Cp_a m_a + Cp_c m_c + Cp_s m_s] \left(\frac{dT}{dt} \right) t_e \quad (4)$$

O termo $\left(\frac{dT}{dt} \right)$ da **equação 4** é obtido pelo gráfico de variação da temperatura da água com o tempo, conforme mostra a **figura 3**.

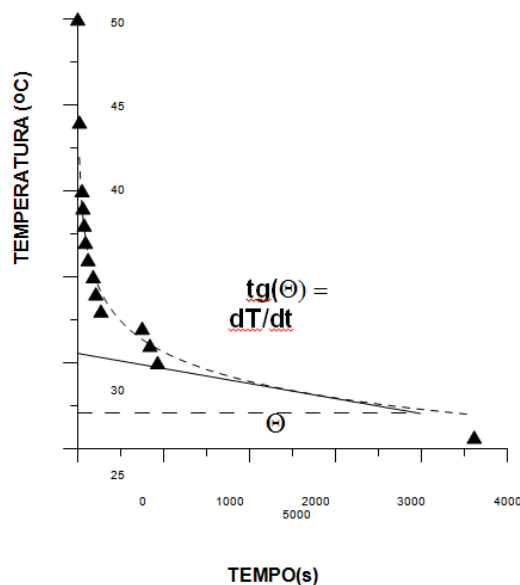


Figura 3. Variação da temperatura da água com o tempo.

Novamente, o balanço de energia total, agora para o processo envolvendo o suco de laranja, resulta na **equação 5**:

$$Cp_s m_s = \frac{Cp_a m_a \left[Tf_a - To_a - \left(\frac{dT}{dt} \right) t_f \right] - Cp_c m_c \left[\left(\frac{dT}{dt} \right) t_f + To_c - Tf_c \right]}{\left[To_s - Tf_s + \left(\frac{dT}{dt} \right) t_f \right]}$$

A **equação 5** representa a expressão matemática que fornece o calor específico do suco de laranja.

RESULTADOS

Após a realização dos experimentos, e considerando o resultado apresentado na **figura 1**, inicialmente a **equação 3** foi utilizada para a determinação do calor específico do calorímetro utilizado, com uma inclinação encontrada de $\left(\frac{dT}{dt} \right) = 0,0194 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ na figura 1, o que resultou no valor do calor específico do calorímetro dado por $Cp_c = 526,42 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

Na **figura 2** a inclinação encontrada foi de $\left(\frac{dT}{dt} \right) = 0,00233^\circ\text{C/s}$, o que resulta, substituído na **equação 5** no calor específico do suco de laranja de $C_{ps} = 3494,85 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

Para comparação do valor experimental obtido através do método, o modelo proposto por (Siebel,1982), apropriado para o suco de laranja foi utilizado, conforme a **equação 6**:

$$Cp = 1,424X_H + 1,549X_P + 1,675X_F + 0,837X_A + 4,187X_W \quad (6)$$

Nessa equação, uma composição da laranja analisada em laboratório fornece os seguintes valores para os termos, conforme apresenta a **tabela 1**:

Tabela 1. Valores apropriados das frações usadas na **equação (6)**.

Carboidratos (X_H)	Proteínas (X_P)	Gorduras (X_G)	Cinzas (X_C)	Umidade (X_U)
0,111	0,008	0,002	0,004	0,875

O resultado obtido para o calor específico do suco de laranja, através do uso da **equação 6**, é igual a $C_{ps} = 3,840 \text{ J / kg } ^\circ\text{C}$. Sendo assim, valor predito pela literatura é bem próximo ao resultado experimental encontrado neste trabalho, apresentando um erro da ordem de 9,88%.

CONCLUSÃO

O resultado experimental para o calor específico do suco de laranja, obtido através de uma metodologia de simples execução em laboratório, aproximou-se do valor predito por correlações recomendadas pela literatura. O erro encontrado, inferior a 10%, é bastante razoável para aplicações de engenharia e pode ser atribuído a possíveis descuidos na manipulação dos dispositivos para

medição de temperatura e tempo. Embora todos os pontos experimentais sejam médias de repetições, melhorias na metodologia podem ainda ser realizadas em trabalhos futuros. A metodologia pode, então, ser usada para determinações de propriedades térmicas de outros sucos de frutas, cujos valores são ainda desconhecidos, permitindo o desenvolvimento de processos industriais onde tais propriedades são necessárias ao dimensionamento de equipamentos.

NOMENCLATURA

Cp Calor específico: J/kg^{°C}

dq/dt Taxa de calor perdido: W/m.s.°C

dT/dt Taxa de variação da temperatura: °C/s

m Massa da substância: kg

R Termo de correção para perda ou ganho de energia durante o experimento

T Temperatura: °C

To Temperatura inicial: °C

Tf Temperatura final: °C

t Tempo: s

θ Ângulo representando a inclinação da curva experimental

SUBSCRITO

A Cinzas

a Água

c Calorímetro

e Equilíbrio

F Gordura

f Estado final

H Carboidrato

P Proteína

S Suco

W Umidade

REFERÊNCIAS

- GEORGE, R. M. A Literature Survey of Thermal Diffusivity of Food Products, Technical Bulletin, v.73, n. 2. P. 1-23, 1990.
- HWANG, M. P.; HAYAKAWA, K. A Specific Heat Calorimeter for Foods, Journal of Food Science, v. 44, n.2, p. 435-448, 1979.
- MOURA et al. Propriedades Termofísicas de Soluções Modelo Similares a Sucos-Parte I, Ciênc. Tecnol. Aliment., 23(1): 62-68, jan-abr, 2003.
- POLLEY, S. L. et al. A Compilation of Thermal Properties of Foods, Food Technology, v. 34, n. 11, p. 76-94, 1980.
- SIEBEL, J. E. Specific Heat of Various Products, Ice Refrig., v. 2, p. 256-257, 1982.
- TELIS-ROMERO et al. Thermophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by Temperature and Water Content, Journal of Food Engineering, v. 38, p. 27-40, 1998.

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XV



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE