

organizadores:

André Barros de Oliveira

Patricio Moreira de Araújo Filho

ENGENHARIA

Produção científica e tecnológica



2021


Pascal
Editora

VOL 2

ANDRÉ BARROS DE OLIVEIRA
PATRÍCIO MOREIRA DE ARAÚJO FILHO
(Organizadores)

ENGENHARIA
produção científica
e tecnológica

VOLUME 2

EDITORA PASCAL
2021

2021 - Copyright© da Editora Pascal

Editor Chefe: Prof. Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: Patrício Moreira de Araújo Filho

Conselho Editorial

Prof. Dr. Ernane Rosa Martins

Prof. Dr. Glauber Túlio Fonseca Coelho

Prof. Dr. William de Jesus Ericeira Mochel Filho

Prof. Dr. Will Ribamar Mendes Almeida

Prof. Dr. Raimundo Luna Neres

Prof. Dr. Saulo José Figueredo Mendes

Prof^a. MSc. Rosany Maria Cunha Aranha

Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P654engv2

Coletânea Engenharia: produção científica e tecnológica. / André Barros de Oliveira e Patrício Moreira de Araújo Filho (Orgs.). — São Luís: Editora Pascal, 2021.

219 f.; il. – (Engenharia: produção científica e tecnológica; v. 2)

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-86707-58-8

D.O.I.: 10.29327/540556

1. Engenharia. 2. Tecnologias. 3. Produção científica e tecnológica. I. Oliveira, André Barros de. II. Araújo Filho, Patrício Moreira de.

CDU: 62:088

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2021

www.editorapascal.com.br

contato@editorapascal.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, produção científica e tecnológica” é uma série especialmente preparada para conter as produções científicas de graduandos de Engenharia da Universidade CEUMA. Neste segundo volume, concentramos estudos na área temática de Engenharia Mecânica, relacionando os temas aprovados em bancas de TCC e de maior relevância, critério este que marcou a harmonização e organização dos capítulos ao longo desta obra. Nos estudos apresentados, respeitando sua particularidade, o leitor poderá absorver novos conhecimentos que o proporcione uma abertura teórica /prática auxiliando no bom desempenho de atividades acadêmicas ou no pátio de operações nas empresas. Os quatro primeiros capítulos abordam análises em diferentes aspectos, passando por tópicos de aerodinâmica, redes neurais, confiabilidade à eficiência energética. Nos quatro últimos capítulos, busca-se a aplicação, avaliação e implicação da FMEA, processo de eficiência, manutenção e robótica. Cabe ressaltar que os pesquisadores fazem uso de diferentes ferramentas e procedimentos de estudo, buscando uma reflexão nova para a temática ali desenvolvida, expandindo o conhecimento na área de Engenharia Mecânica. Assim, ao oportunizar este canal de disseminação do conhecimento, a Editora Pascal a reafirmando a importância da publicação dos trabalhos de fim de curso de Engenharia com o fito de promover suas métricas de visibilidade acadêmica e científica, tais como “RG Score”, “Índice h”, “Qualis Capes, etc. Vale dizer que o trabalho da equipe de organizadores e conselho editorial tornou possível a apreciação de textos selecionados, cuidadosamente, para enfatizar a temática e que os artigos que compõe esta obra, fazem parte dos resultados de pesquisa e estudos de campo vivenciados pelos autores, aos quais enfocam sua sapiência e desenvolvimento de técnico e científico. Portanto, prestamos aqui o reconhecimento a sua valorosa contribuição para a educação nacional, boa leitura.

Os organizadores

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	7
CRIAÇÃO E ANÁLISE DE UMA ESTRUTURA TUBULAR PARA A FABRICAÇÃO DE UM VEÍCULO DE ALTO DESEMPENHO	
Felipe dos Santos Azevedo	
Diego Rosa dos Santos	
CAPÍTULO 2.....	27
FMEA COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO NA ELABORAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO APLICADO EM UM MISTURADOR DE ARGAMASSA	
Leôncio Pereira de Deus Neves	
Marco André Matos Cutrim	
Rialberth Matos Cutrim	
CAPÍTULO 3.....	48
ANÁLISE AERODINÂMICA DE ESTRUTURAS DESENVOLVIDAS EM INTERFACE DO SOFTWARE XFLR5	
André Barros de Oliveira	
Patrício Moreira de Araújo Filho	
CAPÍTULO 4.....	69
PROCESSOS DE FABRICAÇÃO PARA A CONFECÇÃO DE UMA LÂMINA UTILIZANDO AUSTÊMPERA SELETIVA EM AÇO SAE 5160 PARA SOBREVIVÊNCIA NA SELVA	
Mateus Batista de Sousa	
Hilton Seheris da Silva Santos	
CAPÍTULO 5.....	87
DOWNSIZING EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: INFLUÊNCIA DE UM TURBOCOMPRESSOR NO DESEMPENHO DE AUTOMÓVEIS	
Iank Anderson de Oliveira Barbosa	
Rialberth Matos Cutrim	
CAPÍTULO 6.....	107
PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID) EM MECANISMO DE GARRA ROBÓTICA	
Vinícius Duarte Santos	
Hilton Seheris da Silva Santos	
CAPÍTULO 7.....	133
MODELAGEM DE UM SISTEMA DINÂMICO VIA REDES NEURAS ARTIFICIAIS	
Bruno Silva Oliveira	
Hilton Seheris da Silva Santos	

CAPÍTULO 8..... 157

A EFICIÊNCIA DO ALUMÍNIO COMO FONTE DE HIDROGÊNIO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Matias Alencar da Silva
Rialberth Matos Cutrim

CAPÍTULO 9..... 173

MODELO PARA APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE PARA OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO PLANEJADA NA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL

Daniel Ayrton Cirino Pires
José Ribamar Santos Moraes Filho

CAPÍTULO 10..... 201

A IMPORTÂNCIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Eyder de Jesus Castro Júnior
Rialberth Matos Cutrim

ORGANIZADORES 201

CAPÍTULO 1

CRIAÇÃO E ANÁLISE DE UMA ESTRUTURA TUBULAR PARA A FABRICAÇÃO DE UM VEÍCULO DE ALTO DESEMPENHO

CREATION AND ANALYSIS OF A TUBULAR STRUCTURE FOR THE
MANUFACTURING OF A HIGH PERFORMANCE VEHICLE

Felipe dos Santos Azevedo¹

Diego Rosa dos Santos²

¹Aluno Concludente do Curso de Engenharia Mecânica – felipeazevedo252@gmail.com

² Orientador – Mestre – diego.santos@ceuma.com.br

Resumo

O presente trabalho se trata de um estudo qualitativo sobre a prototipagem de um chassi do tipo *spaceframe* resistente e confiável e segura para o condutor, pensado para a utilização diária e esportiva, em autódromos. Sendo feito uma pesquisa e aprofundamento no assunto do tema para embasar e facilitar todo o processo de modelagem e dimensionamento da estrutura no qual se deu em ambiente virtual, através de softwares de engenharia (*Solidworks*) para a criação da estrutura e posterior simulação. A partir dos dados gerados pelas simulações ter a certeza se a estrutura cumpre os objetivos pela qual foi projetada e pensada, através da análise, tratamento e filtração deles.

Palavras-chave: Simulação, *Chassi*, Software. (separadas e finalizadas por ponto, fonte 12)

Abstract

The present work is a qualitative study on the prototyping of a spaceframe chassis, resistant and reliable and safe for the driver, designed for daily and sporting use in race tracks. A research and deepening of the subject of the theme was done to support and facilitate the entire process of modeling and dimensioning the structure in which it took place in a virtual environment, through engineering software (*Solidworks*) for the creation of the structure and subsequent simulation. From the data generated by the simulations, you can be sure that the structure fulfills the objectives for which it was designed and thought, through its analysis, treatment and filtration.

Key-Words: Simulation, *Chassi*, Software.



1. INTRODUÇÃO

A palavra estrutura remete à organização, ordem de elementos no qual compõem um corpo sólido e aquilo a qual dá sustentação a algo/alguma equipamento ou objeto, para a engenharia estrutura é uma das partes fundamentais, seja de um prédio seja de automóvel. Como passar dos anos as estruturas evoluíram bastante seja na área de construção civil, seja na automotiva, porém o seu objetivo continua o mesmo, fornece uma base sólida, resistente e segura aos seus usuários.

Em relação à evolução das estruturas automotivas, mais conhecidas como chassis, estas possuem variações voltadas para cada propósito e aplicação, tal evolução só foi possível através de estudos e análise das mesmas, e com o advento da tecnologia a evolução passa a ser cada vez mais significativa. Pois se encurtou o tempo de projetar e testar elas, enquanto as tecnologias de método de fabricação e materiais embarcados nelas aumentaram.

Tendo em vista isto, o presente trabalho irá abordar a prototipagem de uma estrutura (chassi) tubular em ambiente virtual, para a fabricação de um carro esportivo diário, no qual será feita a abordagem dos objetivos e justificativa, metodologia do trabalho, estrutura do trabalho, fundamentação teórica, modelagem da estrutura, análise da estrutura via software, interpretação dos resultados, exposição dos resultados, conclusão e bibliografia utilizada.

Nisto o objetivo deste trabalho é projetar um *SpaceFrame* capaz de ser resistente e ao mesmo tempo seguro para a utilização nas vias públicas e autódromos. Para alcançar tal feito, dividimos o objetivo principal em subobjetivos, que são: projetar um *spaceframe* usando programas de modelagem 3D (*Solidworks*), analisar sua estrutura em termos de torção, tensão e deformação, validar sua estrutura em termos de engenharia (torção, tensão e deformação) e aprovar os dados gerados a partir da validação.

Com isso a justificativa de tal trabalho se dá em por que não se comercializa carros de alto desempenho com sua estrutura em forma de treliça em território nacional? há exemplo: Ariel Atom e BAC Mono. Como ocorre a comercialização dos mesmos no exterior, nas pesquisas realizadas não houve uma resposta concreta, entretanto, um dos problemas seria a importação destes e um elevado preço na hora da venda. Nisto este projeto pretende projetar e analisar uma estrutura tubular automotiva para a fabricação, construção e venda de um veículo de alto desempenho usável tanto em pistas como no dia a dia, com a meta da estrutura a ser projetada (*chassi*) ser resistente e de confiança em relação a modelos similares já citados antes (Ariel Atom, BAC Mono e entre outros), sendo um produto nacional.

2. REFERENCIAL TEORICO

2.1 Chassi

Segundo a etimologia da palavra, *Chassi* é: “Quadro ou Cercadura de Madeira, Metal etc. Em que se fixa uma superfície de Vidro, pano, papel etc.”. Este, pode ser feito de muitos materiais, porém segundo Soares (2012), *chassi* é o principal componente de qualquer veículo automotivo. No qual este (*chassi*) deve ser uma estrutura capaz de suportar os esforços solicitantes sobre ele garantindo segurança para ocupantes, além de entregar um bom funcionamento dos demais componentes nele instalados.

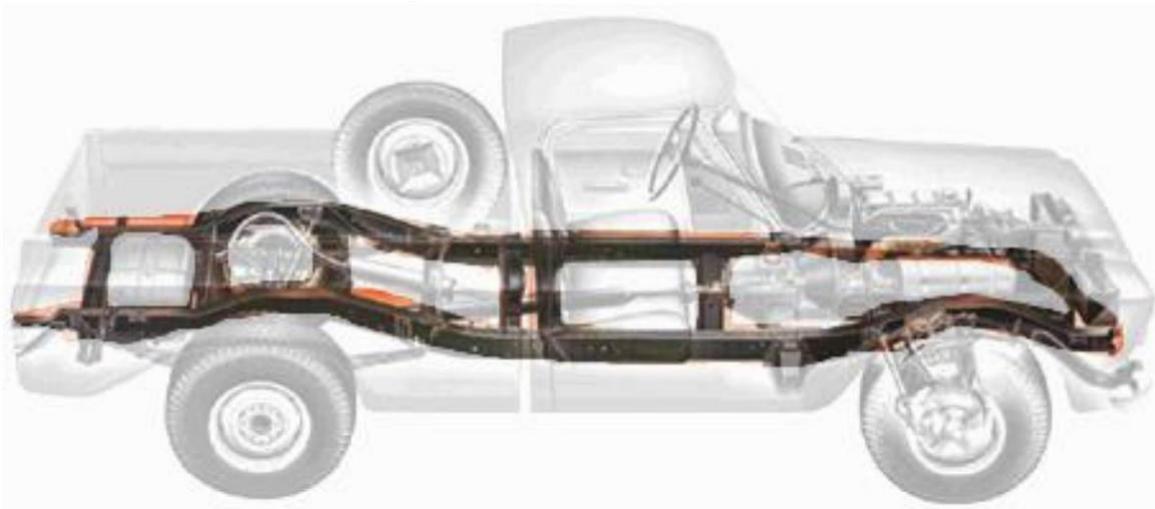
Nisto temos uma grande variedade de *chassis* cada uma com sua própria característica, pontos fortes e fracos e suas áreas de aplicações, nos itens abaixo iremos abordar cada um.

2.1.1 Tipo Escada

O *chassi* tipo escada é um dos mais antigos e usados, pois a maneira como sua estrutura é construída e segundo Happian-Smith (2002) lhe concede boa resistência a flexão, elevada rigidez de peso, baixa rigidez à torção e menor capacidade de torção, figura 1.

Devido isso, ele é bastante utilizado em veículos como: *Pick-ups* (ex: Hillux, S10 etc.) e Caminhões. Visto que a aplicação desses veículos é o transporte de cargas.

Figura 1 - Chassi Tipo Escada



Fonte: Adaptado de Daniel (2013)

2.1.2 Monobloco

O chassi do tipo Monobloco é caracterizado pelo fato do Chassi e a Carroceria serem uma estrutura única. Altamente utilizado mundialmente, cerca de 95% dos veículos produzidos, pois apresenta uma boa eficiência na proteção contra impactos. Visto que a sua estrutura junta chapas (feita através de estampagem), longarinas, transversinas e tubos, figura 2.

O seu processo de construção é feito através de soldas a ponto, porém só viável em larga escala industrial. Segundo Oliveira Fernando (2007) uma das principais vantagens que uma estrutura monobloco oferece é o espaço interno bastante eficiente, proporcionando a ocupação de um número maior de passageiros, facilitada pela presença de um túnel central para o conjunto da transmissão não muito grande.

Figura 2 - Chassi Tipo Monobloco



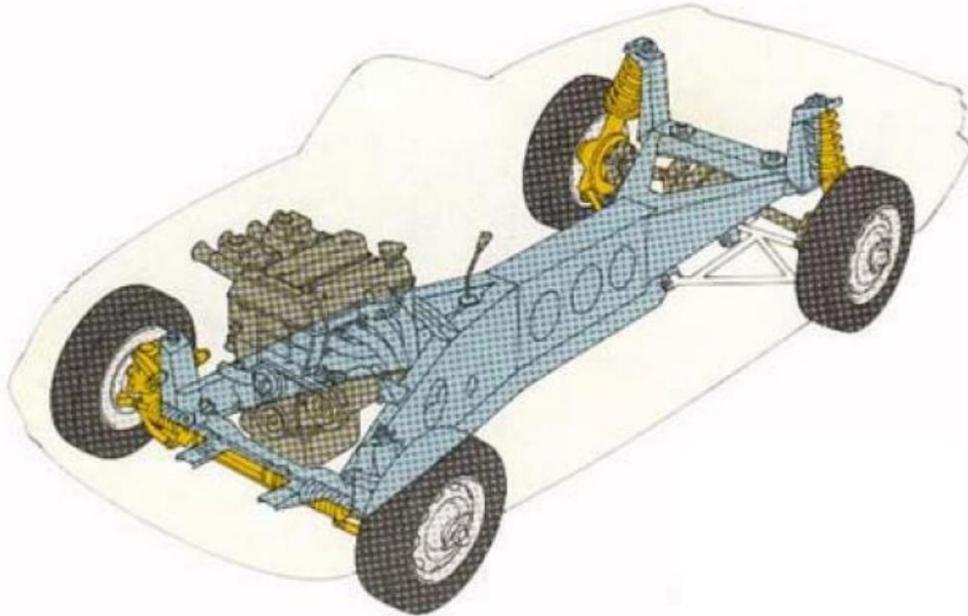
Fonte: Adaptado de Daniel (2013)

2.1.3 *Blackbone* ou Coluna Vertebral

Esse tipo de estrutura é constituído por, segundo Fernando César (2007), “constitui-se de uma peça única cujo principal membro estrutural é um túnel central bastante robusto feito em aço disposto em um formato aproximadamente retangular”. Capaz de unir o motor, transmissão e o conjunto de suspensão dianteiro e traseiro, figura 3.

Ainda segundo Fernando César (2007), tal estrutura apresenta uma excelente rigidez torsional, porém uma baixa segurança ao passageiros, sendo mais voltados para veículos esportes menores. E, sendo mais economicamente viável em baixos volumes de produção.

Figura 3 - Chassi Tipo Backbone



Fonte: Adaptado de Daniel (2013)

2.1.4 Chassi Spaceframe

Por fim os Chassis do tipo Spaceframe, no qual são constituídos por treliças. Uma das vantagens dessa estrutura, segundo Fernando César (2007), "Um chassi tipo spaceframe é composto por membros tubulares redondos de pequeno diâmetro e/ou quadrados posicionados em diferentes posições a fim de oferecer uma altíssima rigidez contra diversos tipos de carregamento. Uma estrutura tipo spaceframe verdadeira é composta de pequenos tubos submetidos apenas à tração e compressão como mostra a figura 4 (não são submetidos a carregamentos de torção ou flexão)".

Figura 4 - Chassi Tipo Spaceframe



Fonte: Adaptado de Daniel (2013)

2.2 Análise Estrutural Estática

A análise estrutural estática segundo Daniel (2013) a análise estática de estruturas é feita aplicando forças casuais, não levando em conta os efeitos de inercia e amortecimento, com tal procedimento se é capaz de mensurar os esforços internos e de deslocamento sofrido por tal estrutura.

Fazendo uso dos dados gerados e analisando. Tais dados podem ser de: tensão, deformação, o limite máximo de força suportada pelo material utilizado, analisar o coeficiente de segurança da estrutura e a torção sofrida.

2.2.1 Tensão

O conceito de Tensão segundo Beer (2011) é força por unidade de área, aplicada em um objeto ou determinada seção do objeto, e é calculada dividindo a Força aplicada pela área no qual ela é aplicada (equação 1):

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde, (σ) representa a tensão, P ou F a força e A área.

Nisto temos, a utilização do sinal + para indicar tração (o corpo é puxado) e o sinal - para indicar compressão (onde o corpo é comprimido).

2.2.2 Tensão Admissível

Segundo Ugural (2009) representa a tensão de trabalho do material antes de chegar à tensão real do material. Essa Tensão é usada para dimensionar um material de forma segura estipulando valor antes do valor máximo do material fraturar. O seu valor é calculado pegando a tensão de escoamento e dividindo pelo valor do coeficiente de segurança do material, como mostra a equação 2.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{k} \quad (2)$$

2.2.3 Tensão de Escoamento

Segundo Hibbeler (2004) é a tensão que se excedida provoca a deformação plástica no material. Usualmente tabelada de acordo com cada material.



2.2.4 Deformação

Segundo Beer (2011) a deformação de um material acontece quando aplicamos uma força P nele e a tal força faz uma deformação e alteração no comprimento do corpo. Com isso temos que a deformação específica normal (equação 3):

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (3)$$

Onde (ϵ) é a deformação específica normal, o (δ) é a variação de comprimento de referência e L é o Comprimento inicial.

Segundo Callister (2016) temos dois tipos de deformações, as plásticas e as elásticas. Nas deformações plásticas o material não volta ao seu estado de origem, contudo nas elásticas o material retorna a sua forma original quando a força aplicada para.

2.2.5 Torção

Segundo Hibbeler (2004) A torção é o momento no qual deforma (torce) o corpo em torno do seu eixo longitudinal. Isto ocorre quando uma força é aplicada em um eixo e este tem sua deformada, no qual o ângulo de deformação é formado entre o estado inicial (antes da deformação) e o estado final (depois da deformação). O fenômeno de torção é comum em eixos de transmissão. Diante disto temos o cálculo de Torção para eixos maciços e vazados.

Para o cálculo de eixos maciços temos a equação 4:

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (4)$$

Onde o τ é a tensão de cisalhamento, T é o torque atuante no eixo, ρ é o raio da barra circular e J é o momento de inercia polar de inercia.

Caso a barra circular seja vazada o cálculo do J (equação 5):

$$J = \frac{1\pi(c_2^4 - c_1^4)}{2} \quad (5)$$

Nisso o cálculo para a obtenção do ângulo de torção (equação 6):

$$\phi = \frac{TL}{JG} \quad (6)$$

Onde o ϕ (ϕ) é o ângulo de torção (expresso em radianos), T é o torque atuante no eixo, L é o comprimento da barra, J o momento de inercia do corpo e G o modulo de elasticidade do corpo.



2.2.6 Coeficiente de Segurança

Segundo Melconian (2018) O coeficiente de segurança ou fator de segurança é utilizado no dimensionamento de elementos de construção, visando o desempenho de um bom material para a construção e um custo acessível para o projeto. O coeficiente de segurança pode ser obtido através normas ou determinando o seu valor através da circunstância do projeto, as circunstâncias podem ser:

1. Cargas Estáticas: A força é aplicada na peça e permanece constante, um exemplo dessa carga é um suporte de ar-condicionado
2. Intermitentes: A carga aplicada vai aumentando seu grau gradativamente até atingir o seu máximo e ser retirada gradativamente, um exemplo dessa aplicação são os dentes de uma engrenagem.
3. Cargas Alternadas: São cargas que variam do máximo positivo até o máximo negativo, exemplo de uma situação envolvendo Cargas Alternadas são os amortecedores de um automóvel.

Em caso de obtenção do coeficiente de segurança via as situações apresentadas temos a equação 7.

$$K = x \cdot y \cdot z \cdot w \quad (7)$$

Onde:

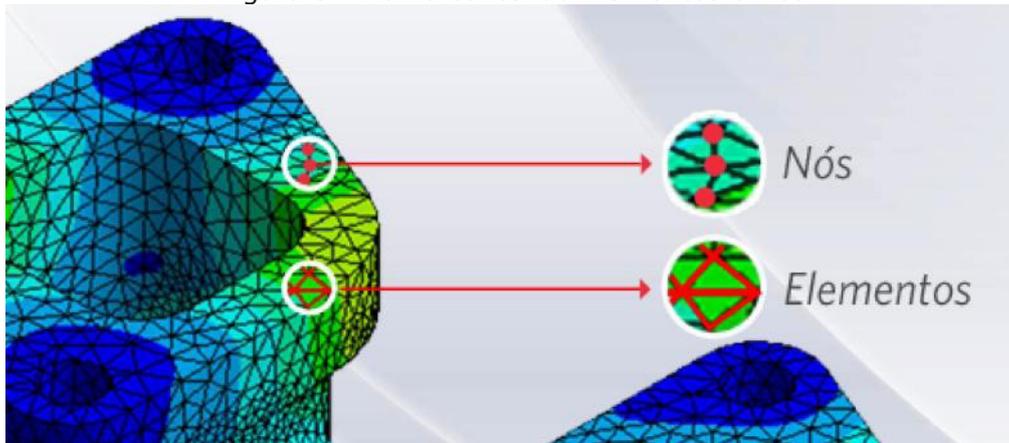
- k é o coeficiente de segurança.
- x é o fator de tipo de material, podendo ser 2 para materiais comuns ou 1,5 para aços de qualidade e aços-liga.
- y o fator de tipo de solicitação, sendo 1 para carga constante, 2 para carga intermitente e 3 para carga alternada.
- z o tipo de carga, sendo 1 para carga gradual, 1,5 para choques leves e 2 para choques bruscos.
- w sendo o fator de possíveis falhas de fabricação, no qual 1 a 1,5 para aços e 1,5 a 2 para fofo.

2.3 Análise Numerica

2.3.1 Método dos Elementos Finitos

Segundo Azevedo (2003) o método dos Elementos Finitos se baseia na discretização do problema em questão, seja ele a análise de uma estrutura, seja a análise fluidodinâmica por meio da fragmentação do problema em pequenas partes fáceis e rápidas de resolução, essa discretização. Sendo a fragmentação utilizando elementos e nós, tais elementos podem ser triângulos e/ou quadriláteros (no caso de 2 dimensões), para problemas de 3 dimensões são utilizados tetraedros e/ou hexaedros entre outros, tais conjuntos Elemento e Nó é denominado Malha. Como mostra a figura 5.

Figura 5 - Malha contendo Elementos e Nós



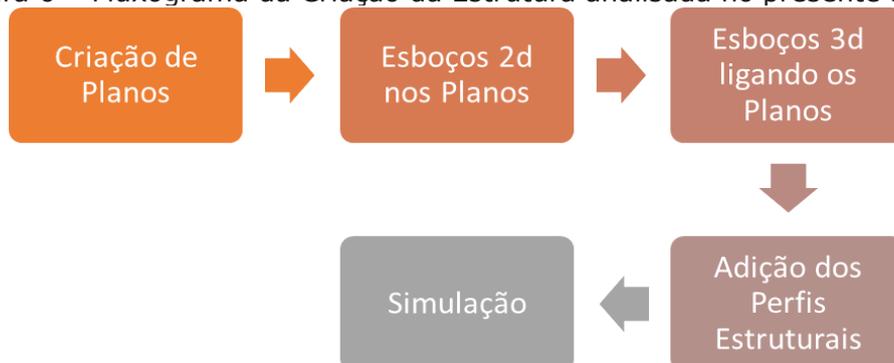
Fonte: Adaptado de ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software) (2016)

Tais elementos e nós visam facilitar na hora de resolução dos problemas. A resolução pode ser feita de diversos métodos já estabelecidos, porém a comumente utilizada é a forma Matricial, no qual se consiste em interpolar e resolver cada equação presente no "nó" no qual está presente em cada elemento do problema.

3. METODOLOGIA

A criação do Modelo do projeto e seus processos de criação tanto do modelo como das simulações se deu em ambiente virtual através do programa *Solidworks*. A metodologia está exposta no fluxograma (figura 6).

Figura 6 - Fluxograma da Criação da Estrutura analisada no presente artigo



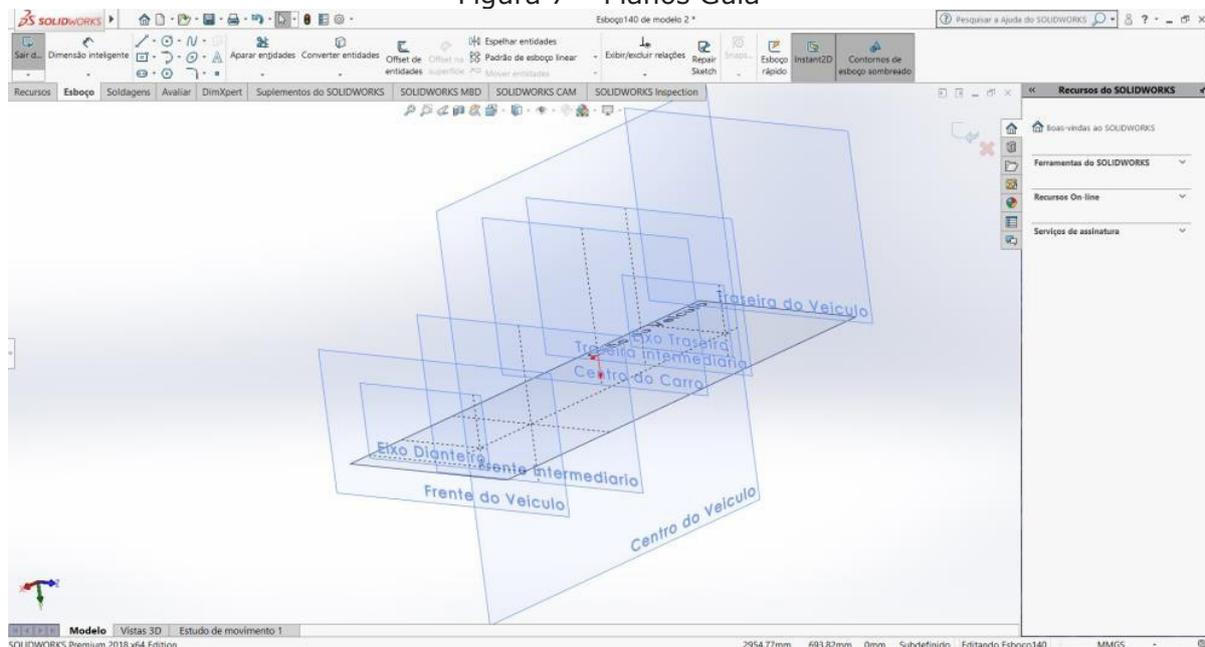
Fonte: Autor

A criação do modelo em 3d foi sequenciada em:

1. Criação de planos guia de cada parte do modelo, exemplo, frente do carro, meio do carro e traseira do carro (figura 7).
2. Esboços (desenhos) 2d nos planos criados (figura 8).
3. Esboços 3d ligando os desenhos 2d e finalizando a parte de desenho da estrutura. (figura 9).
4. Adição de perfis estruturais, no qual se usou o recurso componente estrutural na aba de soldagem do programa, finalizando o modelo 3d (figura 10).

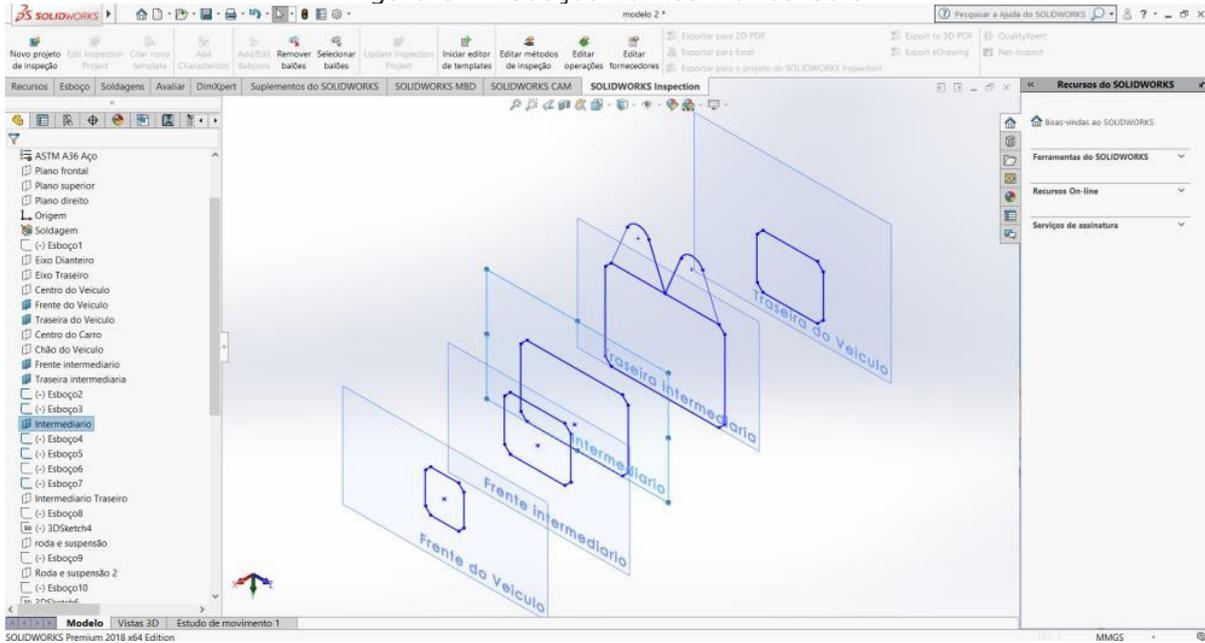
Os perfis estruturados utilizados foram 3: Tubos quadrados de 50x50x5 mm, Tubos redondos de 38.1 mm por 3 mm de espessura e Tubos Redondos de 25,4 mm por 2,65 mm de espessura. E o material utilizado foi o Aço ASTM A36.

Figura 7 – Planos Guia



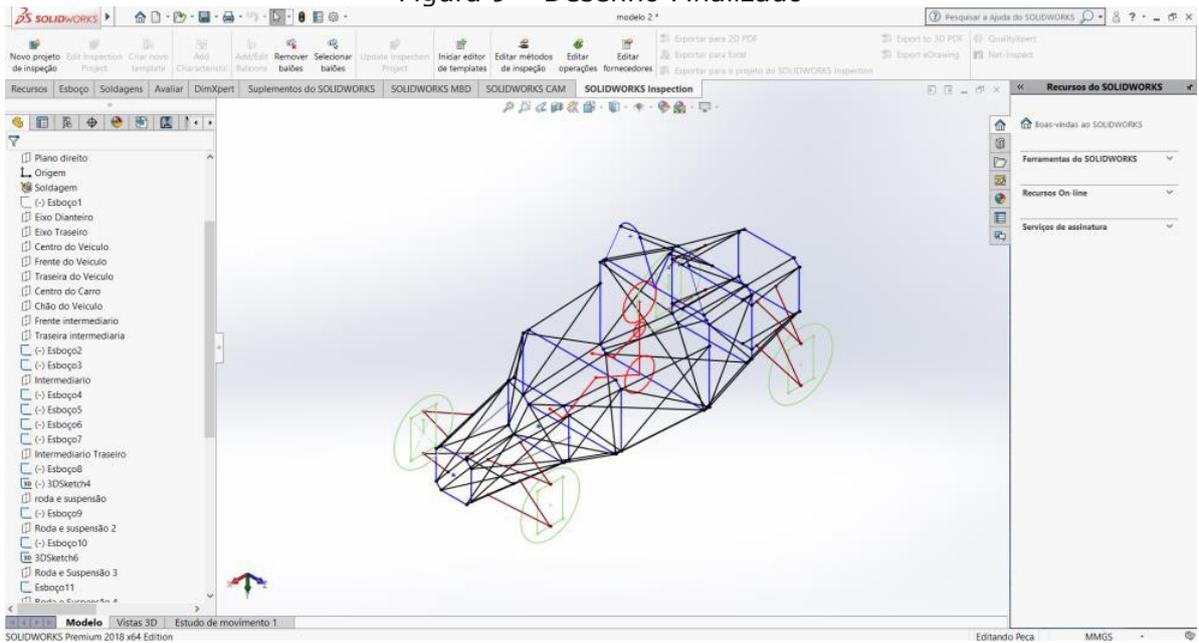
Fonte: Autor

Figura 8 – Esboços 2d nos Planos Guia



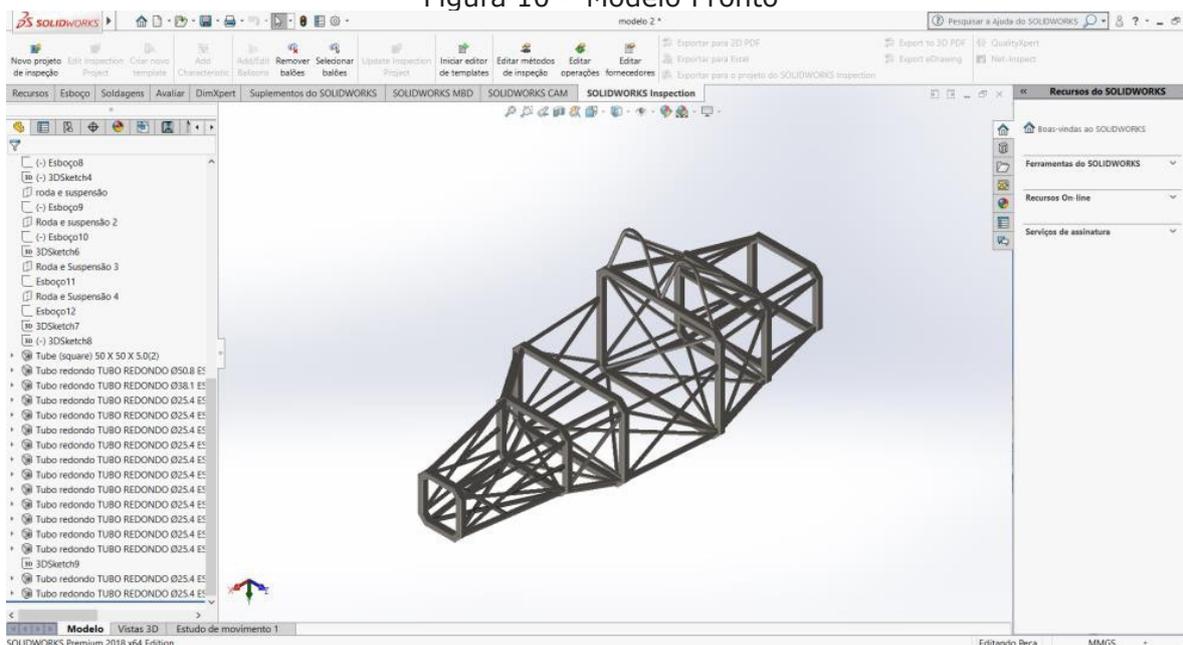
Fonte: Autor

Figura 9 – Desenho Finalizado



Fonte: Autor

Figura 10 – Modelo Pronto



Fonte: Autor

Na parte de simulação foi definido 5 cargas para se analisar as reações da estrutura a cada uma. As cargas são: 50N, 150N, 250N, 350N e 500N junto com a carga da gravidade. Com as cargas já definidas foi estabelecidos 6 situações para a aplicação delas, são elas:

1. Impacto Frontal
2. Impacto Traseiro
3. Impacto Lateral
4. Torção no Corpo
5. Torção Frontal
6. Torção Traseira

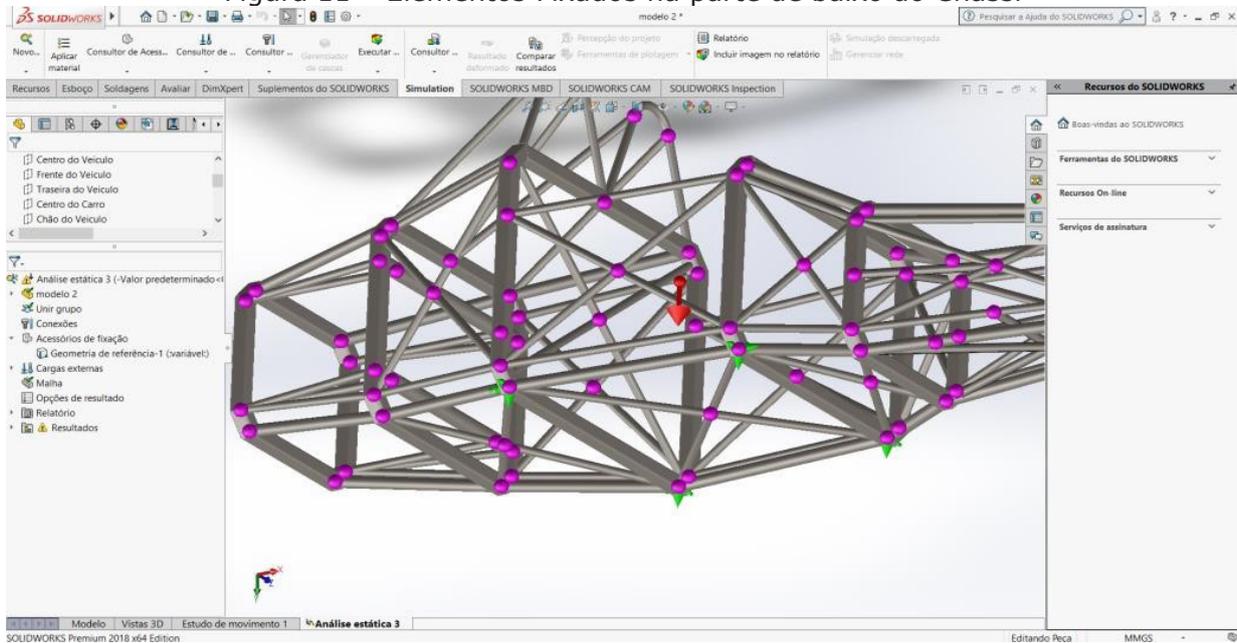
Para a realização das simulações foi feitos os seguintes preparativos no corpo de prova:

1. Fixação dos Pontos no corpo, restringindo o seu deslocamento nos eixos X, Y e Z. Os pontos fixados para as análises de Impacto Frontal, Impacto Lateral, Impacto Traseiro e Torção no Corpo foram os pontos localizados embaixo da cabine do motorista como mostra a figura 11, onde as esferas roxas com setas verdes são os pontos fixados escolhidos. Já os pontos fixos na Simulações de Torção Frontal e Traseira foram os pontos onde vai ficar os braços da suspensão.
2. Gerar Malha (figura12).
3. Aplicar as cargas no corpo segundo cada situação. Impacto Frontal foi aplicada na

frente do carro, Lateral na lateral do carro, na Torção no Corpo foi aplicado cargas em sentidos contrários (simulando uma situação de torção) uma na lateral esquerda da frente do carro e outra na lateral direita traseira do carro. As forças são representadas por meio das setas alaranjadas (figura 13).

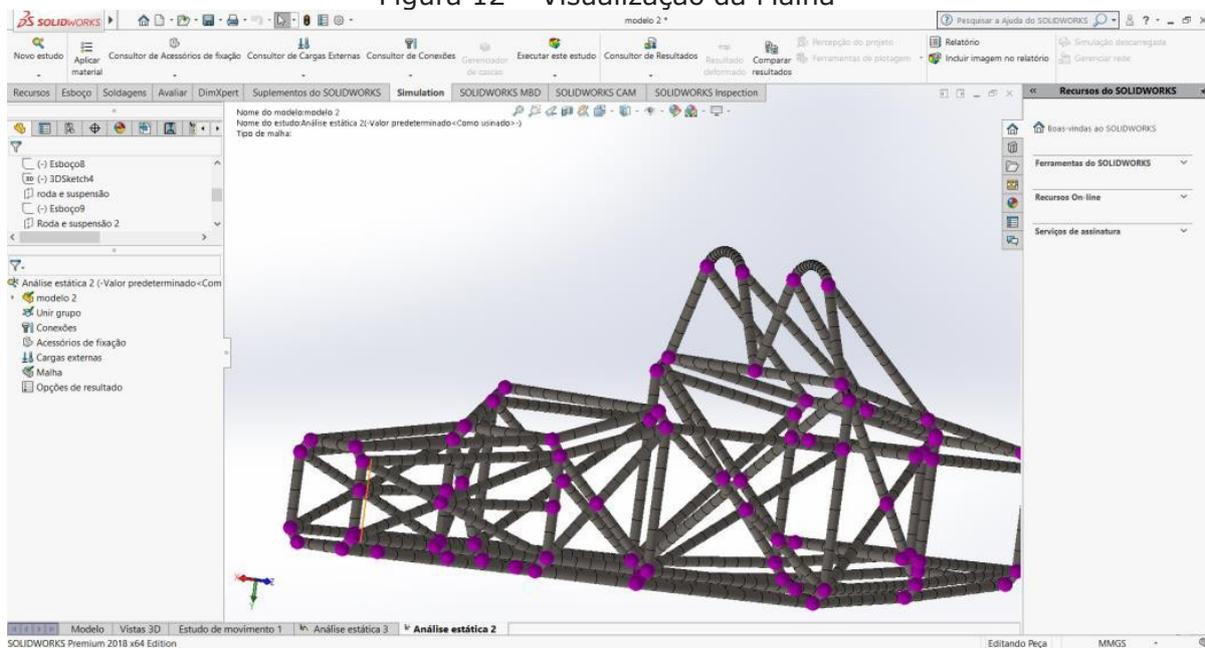
4. Executar Simulação.

Figura 11 – Elementos Fixados na parte de baixo do Chassi



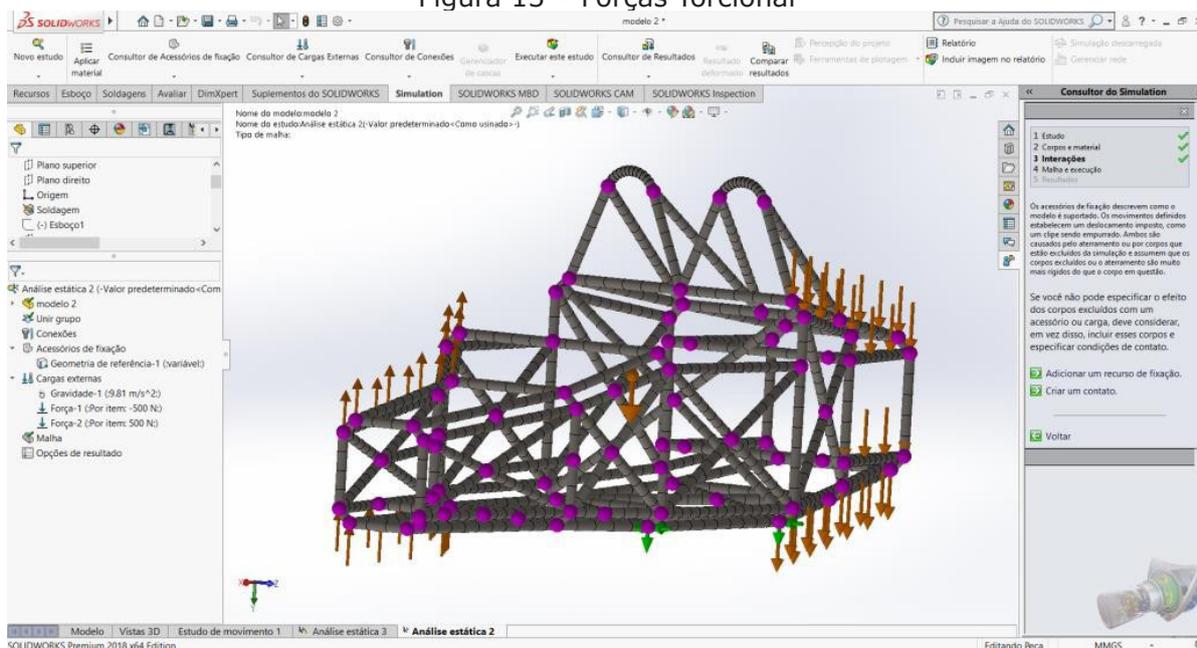
Fonte: Autor

Figura 12 – Visualização da Malha



Fonte: Autor

Figura 13 – Forças Torcional



Fonte: Autor

No Cálculo do Coeficiente de Segurança foi usando os seguintes dados:

1. Para X, foi 1,5 para aços de qualidade e aços ligas. Visto que foi usado o Aço ASTM A36.
2. Para Y, 1, pois a carga é constante durante a simulação.
3. Z, 2, os choques foram brutos.
4. W, 1,5, para possíveis falhas na fabricação do aço.

Para se obter a Tensão Admissível pegamos a Tensão de escoamento do Material, 250 MPa para o Aço ASTM A36 e dividimos pelo resultado encontrado calculado no Coeficiente de Segurança.

4. RESULTADOS

Os resultados e dados gerados pelas simulações foram inspecionados e listados em forma das tabelas, para cada situação simulada e analisada. Foram resultados bem promissores, apresentando 2 Coeficiente de Segurança, o proveniente da simulação e o calculado (apresentado no referencial teórico). Se usar o Coeficiente de Segurança calculado como medida oficial.

Na tabela 1 temos os dados organizados da simulação de Torção no Corpo. Onde o deslocamento máximo sofrido nas simulações pela estrutura foi 0,995mm quando submetido a uma carga de 500N, sendo a sua tensão máxima das 5 cargas sofridas foi de 43,946 MPa. Sendo o Fator de Segurança Calculado foi de 4,5 para a estrutura e a Tensão Admissível calculado a parte da simulação foi de 55,55 MPa para estrutura.

Tabela 1 – Resultados para Torção no Corpo

Resultados Torção no Corpo											
Carregamentos	50 N	Tensão Máxima	6,574 Mpa	Deformação Máxima	0,173 mm	Fator de Segurança	3,803e+01 ate 3,612e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	150 N	Tensão Máxima	14,774 MPa	Deformação Máxima	0,354 mm	Fator de Segurança	1,692e+01 ate 1,795e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	250 N	Tensão Máxima	23,139 Mpa	Deformação Máxima	0,536 mm	Fator de Segurança	1,080e+01 ate 7,917e+02	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						
	350 N	Tensão Máxima	31,504 Mpa	Deformação Máxima	0,717 mm	Fator de Segurança	7,935e+00 ate 6,766e+01	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	500 N	Tensão Máxima	43,946 Mpa	Deformação Máxima	0,995 mm	Fator de Segurança	5,689e+00 ate 4,398e+02	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						

Fonte: Autor

A Tabela 2 apresenta os resultados para a simulação de Torção Frontal. Temos sua tensão máxima levando em conta as 5 cargas, que foi de 48,895 MPa e seu maior deslocamento das 5 cargas, no qual foi 0,917mm. O seu fator de segurança da simulação e o calculado de 4,5 junto com a sua tensão admissível, calculada fora da simulação, de 55,55 MPa.

Tabela 2 – Resultados para Torção Frontal

Resultados Torção Frontal											
Carregamentos	50 N	Tensão Máxima	4,809 Mpa	Deformação Máxima	0,060 mm	Fator de Segurança da Simulação	5,18e+1 ate 1,554e+04	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						
	150 N	Tensão Máxima	14,428 Mpa	Deformação Máxima	0,180 mm	Fator de Segurança da Simulação	1,733e+01 ate 5,178e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						
	250 N	Tensão Máxima	24,046 Mpa	Deformação Máxima	0,300 mm	Fator de Segurança da Simulação	1,040e+1 ate 3,107e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						
	350 N	Tensão Máxima	33,665 Mpa	Deformação Máxima	0,420 mm	Fator de Segurança da Simulação	7,426 ate 2,219e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	500 N	Tensão Máxima	48,895 Mpa	Deformação Máxima	0,917 mm	Fator de Segurança da Simulação	5,113e+00 ate 1,322e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						

Fonte: Autor

Na tabela 3 é para a Torção Traseira, que apresenta Tensão mais alta 22,314 MPa e maior deslocamento de 1,028 mm, junto com os dados dos dois coeficiente de segurança além da Tensão Admissível.

Tabela 3 – Torção Traseira

Resultados Torção Traseira											
Carregamentos	50 N	Tensão Máxima	10,341 Mpa	Deformação Máxima	0,471 mm	Fator de Segurança	2,418e+1 ate 2,185e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	150 N	Tensão Máxima	12,003 Mpa	Deformação Máxima	0,582 mm	Fator de Segurança	2,083e+01 ate 1,519e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						
	250 N	Tensão Máxima	13,742 Mpa	Deformação Máxima	0,703 mm	Fator de Segurança	1,819e+01 ate 1,435e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						
	350 N	Tensão Máxima	16,846 Mpa	Deformação Máxima	0,830 mm	Fator de Segurança	1,484e+01 ate 1,068e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						
	500 N	Tensão Máxima	22,314 Mpa	Deformação Máxima	1,028 mm	Fator de Segurança	1,120e+01 ate 9,679e+02	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 MPa	Deformação Mínima	0 mm						

Fonte: Autor



A Tabela 4 apresenta os resultados para o Impacto Frontal. Com 8,208 MPa sendo a Tensão Máxima e 0,123 mm o deslocamento máximo. Apresentando os fatores de segurança (calculado e da simulação) somando com a Tensão Admissível.

Tabela 4 – Impacto Frontal

Resultados Impacto Frontal											
Carregamentos	50 N	Tensão Máxima	3,582 Mpa	Deformação Máxima	0,087 mm	Fator de Segurança	6,979e+01 ate 2,641e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	150 N	Tensão Máxima	3,646 Mpa	Deformação Máxima	0,095 mm	Fator de Segurança	6,856e+01 ate 2,830e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	250 N	Tensão Máxima	4,799 Mpa	Deformação Máxima	0,103 mm	Fator de Segurança	5,209e+01 ate 2,904e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	350 N	Tensão Máxima	5,965 Mpa	Deformação Máxima	0,111 mm	Fator de Segurança	4,191e+01 ate 2,455e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	500 N	Tensão Máxima	8,208 Mpa	Deformação Máxima	0,123 mm	Fator de Segurança	3,046e+01 ate 2,418e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						

Fonte: Autor

Na Tabela 5 são os resultados proveniente da simulação de Impacto Lateral. Onde os valores máximos são de 39,976 MPa para a Tensão Máxima e 0,506 mm para o deslocamento, contendo os 2 fatores segurança e a Tensão Admissível.

Tabela 5 – Impacto Lateral

Resultado Impacto Lateral											
Carregamentos	50 N	Tensão Máxima	3,962 Mpa	Deformação Máxima	0,051 mm	Fator de Segurança	6,310e+01 ate 4,761e+04	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	150 N	Tensão Máxima	11,886 Mpa	Deformação Máxima	0,153 mm	Fator de Segurança	2,103e+01 ate 1,587e+04	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	250 N	Tensão Máxima	19,810 Mpa	Deformação Máxima	0,255 mm	Fator de Segurança	1,262e+01 ate 9,522e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	350 N	Tensão Máxima	27,734 Mpa	Deformação Máxima	0,356 mm	Fator de Segurança	9,014e+00 ate 6,801e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	500 N	Tensão Máxima	39,976 Mpa	Deformação Máxima	0,506 mm	Fator de Segurança	6,254e+00 ate 1,625e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						

Fonte: Autor

A Tabela 6 apresenta os resultados de Impacto Traseiro, onde a Tensão Máxima é 10,214 MPa e o Deslocamento máximo é 0,193 mm, tendo consigo os 2 fatores de segurança (o da simulação e o calculado) e a Tensão Admissível.

Tabela 6 – Impacto Traseiro

Resultados Impacto Traseiro											
Carregamentos	50 N	Tensão Máxima	1,369 Mpa	Deformação Máxima	0,026 mm	Fator de Segurança	1,826e+02 ate 1,715e+05	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	150 N	Tensão Máxima	4,108 Mpa	Deformação Máxima	0,078 mm	Fator de Segurança	6,086e+01 ate 5,717e+04	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	250 N	Tensão Máxima	6,846 Mpa	Deformação Máxima	0,131 mm	Fator de Segurança	3,652e+01 ate 3,430+04	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	350 N	Tensão Máxima	9,584 Mpa	Deformação Máxima	0,183 mm	Fator de Segurança	2,608e+01 ate 2,450e+04	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						
	500 N	Tensão Máxima	10,214 Mpa	Deformação Máxima	0,193 mm	Fator de Segurança	2,448e+01 ate 3,130e+03	Fator de Segurança Calculado	4,5	Tensão Admissível	55,55 Mpa
		Tensão Mínima	0 Mpa	Deformação Mínima	0 mm						

Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

Com tais resultados temos que os objetivos do presente trabalho foram alcançados, criar uma estrutura resistente e confiável ao usuário. Visto que sua Tensão Máxima, levando em conta as 6 situações de simulação e suas 5 cargas cada, é de 48,895 MPa na Torção Frontal (figura 17) seguida pela Torção no Corpo que é de 43,946 MPa e das demais situações, permanecem dentro Tensão Admissível no qual é de 55,55MPa da estrutura e não à superando. E seu deslocamento máximo de 1,028 mm (figura 18), com o fator de segurança de 4,5, permite dizer mais uma vez que a estrutura e o presente trabalho alcançaram os seus objetivos propostos.

6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por nunca ter me deixando e está me guiando nessa caminhada, aos meus pais e a minha família por sempre me apoiarem e me motivar, aos meus amigos que me ajudaram com um simples palavra de animo e encorajamento, tirando uma dúvida em relação a formatação e ajuda na formação desse TCC e ao meu Orientador e Professor Diego Rosa pela ajuda. Meus sinceros Muito Obrigado Fernando, Thais, Daniel Estevão, Daniel Almeida, Guilherme, Júlio, João Gabriel, Leoncio, Dalva, Lucas e a todos que acreditaram e acreditam em mim, muito obrigado mesmo.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, Álvaro F. M. **Metodo dos Elementos Finitos**. 1. Ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2003. 258 p.
- BEER, P. Ferdinand; JR, E. R. Johnston; D, T. John; M. F. David. **Mecânica dos Materiais**. Ed. São Paulo: São Paulo, 2011. 800 p.
- CALLISTER, Willian Jr. D; RETHWISCH. David. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTG. 2016. 868 p.
- CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. **Dynamics Of Structures**. 3. Ed. California: Berkeley, 2003. 752 p.
- COSTIN, Michael; PHIPPS, David. **Racing And Sports Car Chassis Design**. 2. Ed. Great Britain: B. T. Batsford LTD. 1974. 160 p.
- DANIEL, C. Furtado. **Análise Estrutural De Chassi De Veículos Automotivos**. 2013. 88 f. Monografia (Graduação em Engenharia Automotiva) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- DINIZ, Saulo Miguel S. **Desenvolvimento De Estrutura De Kartcross**. 2019. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2019.
- FAKURY, Ricardo H.; SILVA, E Castro Ana L. R.; CALDAS, Rodrigo H. **Dimensionamento De Elementos Estruturas De Aço E Misto De Aço E Concreto**. 1. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016. 514 p.
- GENTA, Giancarlo; MORELLO, Lorenzo. **The Automotive Chassis Vol.1: Components Desing**. 1. Ed. Estados Unidos: Springer Science & Business Media, 2008. 633 p.
- GENTA, Giancarlo; MORELLO, Lorenzo. **The Automotive Chassis Vol.2: System Desing**. 2. Ed. Estados Unidos: Springer Science & Business Media, 2020. 996 p.
- HIBBELER, R.C. **ESTÁTICA: Mecânica Para Engenharia**. 14. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2017. 618 p.
- HIBBELER, R. C. **Resistencia dos Materiais**. 5. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2004. 690 p.
- HUCHO, Wolf-Heinrich. Et al. **Aerodynamics of Road Vehicles**. 1. Ed. Vogel-Verlar: Wurzburg. 1981. 572 p.
- LOPES, Pedro Samuel B. **Análise Estrutural Do Chassi De Uma Viatura Formula Livre FIA**. 2014. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Portugal, 2014.
- MARTHA, Luiz Fernando. **Metodos Basicos Da Análise De Estruturas**. 2. Ed. São Paulo: Elsevier. 2017. 600 p.
- MARQUES, Pedro Azevedo. **Otimização Das Características De Um Chassi Tubular De Automovel De Competição Com Tração Integral**. 2014. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, 2014.
- MELCONIAN, Sarkis. **Mecânica Técnica e Resistencia dos Materiais**. 20. Ed. São Paulo: Érica. 2012. 377 p.
- NORTON, Robert L. **Cinemática E Dinâmica Dos Mecanismos**. 1. Ed. Rio Grande do Sul: Porto Alegre. 2009. 791 p.
- OLIVEIRA, Fernando C. G. **Contribuição Ao Desenvolvimento De Uma Estrutura Veicular Tipo Spaceframe Usando Metodo Dos Elementos Finitos E Metodos Heuristicos De Otimização Numerica**. 2007. 160 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Uberlândia, Minas Gerais, 2007.
- SMITH, Julian Happian. **An Introduction To Modern Vehicle Desing**. 1. Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 600 p.



SOARES, Fernando. S; GERTZ. Luiz. C; CERVIERI, Andre; AIRES, Antônio. F. R; SILVEIRA, Marilia. A. **Desenvolvimento de um Chassi Automotivo para um Veículo Elétrico de Pequeno Porte**. 2012. 12 f. Revista de Iniciação Científica de ULBRA. 2012

UGURAL, Ansel. C. **Mecânica dos Materiais**. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTG. 2009. 640 p.



CAPÍTULO 2

FMEA COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO NA ELABORAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO APLICADO EM UM MISTURADOR DE ARGAMASSA

Leôncio Pereira de Deus Neves¹

Marco André Matos Cutrim²

Rialberth Matos Cutrim³

1 Universidade Ceuma – Aluno do Curso de Engenharia Mecânica

2 Universidade Ceuma – Aluno do Curso de Engenharia de Produção

3 Universidade Ceuma – Coordenador do Curso de Engenharia de Produção

Resumo

Em uma indústria de argamassa o misturador é um equipamento fundamental para uma boa qualidade da produção. Logo, falhas nesse equipamento impactam fortemente no resultado final do produto oferecido ao consumidor. A Análise de Modo e Efeito de Falhas (FMEA) é uma ferramenta largamente utilizada na indústria com o intuito de avaliar o provável efeito de cada falha sobre todo o sistema operacional do objeto em estudo, buscando encontrar melhorias para o processo como um todo. Para a realização deste trabalho, foi feito um estudo de caso em uma fábrica, utilizando o método FMEA para um misturador de argamassa, considerado um equipamento com alto índice de criticidade para o processo de fabricação, tendo como objetivo a elaboração de um plano de manutenção eficaz, obtendo indicadores operacionais mais confiáveis para o equipamento.

Palavras-chave: FMEA; Manutenção; Misturador de argamassa.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a necessidade por melhores produtos e a crescente exigência de qualidade pelo mercado consumidor fez com que as indústrias e empresas buscassem aperfeiçoar seus sistemas operacionais de forma contínua, enxugando processos e gerindo de maneira mais eficaz seu tempo e recursos. Um dos principais motivos de gastos e perda de tempo e qualidade de produto são as ocorrências de falhas nos equipamentos, que causam transtornos tanto para a empresa, quanto para quem consome o produto produzido.

A Gestão da Manutenção busca analisar quando a manutenção será tecnicamente factível e efetiva, permitindo reduzir e evitar a¹ ocorrência de falhas, elevar a eficiência das atividades de manutenção e preservar as funções do sistema, através da utilização de diversas técnicas. Uma delas, de uso amplamente difundido e confiável, é a Análise de Modos e Efeitos de Falhas – FMEA, que oferece um melhor conhecimento dos equipamentos e ajuda na geração de um plano integrado de manutenção, otimizando o tempo de manutenção e aumentando a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos presentes na fábrica em geral, um incremento positivo na qualidade e na produtividade dos ativos em que são empregados.

Desse modo, o presente trabalho é apresentado como um estudo de caso e tem como objetivo utilizar a ferramenta FMEA com o intuito de auxiliar na definição de estratégias de manutenção para uma rosca helicoidal de um misturador em uma fábrica de argamassa. O equipamento foi escolhido por se tratar do componente de um equipamento crítico e de suma importância para o processo de produção da planta produtiva e uma falha funcional não planejada neste componente ocasionará uma queda drástica na qualidade do produto final e também uma parada de produção.



2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Gestão da Manutenção

A Gestão da Manutenção busca, de maneira inteligente, otimizar ao máximo as paradas e intervenções na matriz de produção, diminuindo custos desnecessários e agilizando os processos de reparos e inspeções em máquinas, sistemas, equipamentos e processos, enxugando essa atividade o máximo possível. Busca, também, equilibrar o benefício e custo de cada operação, inspeção e/ou intervenção nos ativos. Para Sousa (2018), uma gestão da manutenção eficiente deve ser compatível com as ações e decisões que são tomadas para o controle e gerenciamento de todos os recursos disponíveis.

De acordo com Mouta (2011, p. 2), uma gestão da manutenção eficiente irá regularizar os gastos que acabam por produzir custos elevados. Além disso, existem algumas expectativas econômicas decorrentes da gestão da manutenção eficiente:

- a) Menores custos diretos – devido à maior produtividade do trabalho planejado e ao menor custo acarretado por paradas para reparos, pois operações de reparos chegam a custar até três vezes mais do que operações de inspeções;
- b) Menor imobilizado em peças de reserva – num ambiente planejado, procura-se ter somente o necessário, diminuindo o material excedente;
- c) Economia de energia – resultante do melhor rendimento dos equipamentos;
- d) Disponibilidade para a empresa – os conhecimentos intrínsecos da empresa, adquiridos ao longo dos anos, ficam facilmente arrumados e disponíveis para consultas e serem usados em futuras referências;
- e) Intangíveis – quebras na produção, na qualidade, nos prazos de entrega, agressões ao Ambiente e acidentes de trabalho, podem traduzir-se na perda de um contrato de um cliente, de um negócio e/ou na extinção da própria empresa.

2.2 Tipos de Manutenção

Cada equipamento, componente ou sistema possui um tipo de manutenção que se sobressai sobre o outro, garantindo menores custos e tempo de serviço. Em algumas situações, é preferível realizar a troca de um componente quebrado do que realizar um monitoramento constante preditivo, por exemplo. Para Costa (2015), o que irá definir o tipo de manutenção preferível será o modo de interferência a ser realizada, conforme a Figura I.



Figura I: Tipos de manutenção



Fonte: Adaptado de Campbel (2017)

2.3 Manutenção Corretiva

A NBR-5462 (1996, p. 7) define manutenção corretiva como sendo aquela realizada após a ocorrência de uma falha funcional, e que se destina a recolocar o item que entrou em pane em situação de que possa realizar a função a qual foi destinado. É o tipo de manutenção mais onerosa e que se deve evitar ao máximo, visto que o equipamento pode entrar em uma parada não programada, caso não haja meios de continuar a operação com um equipamento reserva, e afetar diretamente na atividade da empresa, interferindo na lucratividade.

É o tipo de manutenção mais simples e antiga, sendo usada somente quando for constatado que algo foi quebrado ou danificado, devendo ser feita sua reposição imediatamente para que as atividades produtivas possam retornar. (ALMEIDA, 2015 *apud* PLAZZI; VENTURA, 2017, p. 22). Campbell (2017) ainda destaca que esse tipo de manutenção é bastante onerosa, visto que necessita de peças sobressalentes, exige um trabalho extra e possui uma baixa disponibilidade de produção.

2.4 Manutenção Preventiva

Segundo a NBR-5462 (1996, p. 7), Manutenção Preventiva será realizada em intervalos de tempos pré-estabelecidos, ou de acordo com outros critérios que venham a ser estabelecidos. É destinada a reduzir as probabilidades de falha do ativo que estiver sendo monitorado, garantindo um funcionamento contínuo do maquinário. Almeida (2015) afirma que a implantação desse tipo de manutenção reduz significativamente o custo com peças sobressalentes, aumenta a disponibilidade da mão-de-obra e evita paradas indesejadas na cadeia produtiva. É comumente usada em componentes que ainda possuem uma vida funcional ativa, mas que apresentam uma alteração nos seus índices de desempenho.

2.5 Manutenção Preditiva

A Manutenção Preditiva age prevenindo falhas por meio do monitoramento de diversos indicadores e inspeções constantes nos equipamentos e ativos, permitindo que sua operabilidade seja a maior possível. Esse tipo de manutenção irá se basear nas informações existentes para realizar uma manutenção mais precisa, resultando em melhores índices de indisponibilidade e minimização dos custos relacionados à manutenção (KARDEC & NASCIF, 2009 *apud* CAMPBELL, 2017, p. 23).

É o tipo de manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (NBR- 5462, 1996, p. 7). Sua utilização se dará quando algum dos indicadores adotados para o monitoramento do ativo em questão apresentar alguma alteração, permitindo que a manutenção seja feita antes mesmo que esse fator possa evoluir para um problema ou uma falha.

2.6 Matriz de Criticidade

Na matriz industrial, há diversos equipamentos e sistemas em operação. Por vezes, componentes e ativos semelhantes realizam atividades diferentes, o que acaba os submetendo a diferentes esforços. Logo, os níveis de desgaste e de falha serão diferentes. Devido a isso, se faz necessário o estabelecimento de ordens de prioridade em as equipes de manutenção devem agir com mais energia e imediatismo. Para se definir a ordem de prioridade das intervenções e manutenções utiliza-se a Matriz de Criticidade.

Santos (2012) afirma que os equipamentos variam sua criticidade conforme de seu impacto na produção, segurança ou meio ambiente, em caso de falha. Ele ainda classifica os equipamentos, de acordo com o grau de importância em:

- a) Equipamentos Grau 1 (Classe A) – aqueles que caso haja uma falha, irão causar redução da capacidade produtiva e impactam na qualidade do produto final. Esses equipamentos devem receber atenção especial e devem ser tratados com Manutenção Preventiva, Manutenções Preditiva e Inspeções Diárias;
- b) Equipamentos Grau 2 (Classe B) – não causam transtornos ou paradas significativas em caso de falha, mesmo sendo importantes para o processo produtivo. Geralmente são tratados com Manutenção Preditiva com base no tempo e Inspeções Programadas;
- c) Equipamentos Grau 3 (Classe C) – equipamentos que mesmo sendo necessários ao processo produtivo, não trazem transtornos. Possuem fácil reposição e não causam grandes prejuízos financeiros e produtivos em caso de falha funcional. Normalmente são tratados com Manutenção Preventiva com base no tempo, Manutenção Corretiva ou substituição em caso de quebra.



2.4 FMEA

FMEA, sigla abreviada para *Failure Modes and Effects Analysis*, ou Análise de Modos e Efeitos de Falhas, em português, é uma ferramenta que foi desenvolvida para que se possa avaliar e analisar as potenciais falhas em um sistema, e como essas falhas podem afetar o sistema como um todo. Moubray (1996) ressalta que Modo e Efeito de Falha são, respectivamente, qualquer evento que possa causar uma falha funcional e a consequência de uma falha.

Reid (2005) diz que o FMEA é capaz de quantificar os maiores riscos do processo, fazendo com que sejam mais facilmente detectados e, assim, sendo de suma importância no momento de tomada de decisão e de priorização. É uma ferramenta essencial no processo de manutenção, pois, quando bem aplicada, é possível listar, sistematicamente, todas as possíveis falhas, e suas causas, para que a equipe de manutenção possa se adiantar e elaborar as melhores estratégias de manutenção para cada componente em que ela for aplicada.

Ao se elaborar o FMEA de um equipamento é feita uma análise iniciada a nível de componente e expandindo até o equipamento. São listadas as potenciais falhas e as consequências dessas falhas no produto final, com dados coletados tanto em campo, com o apoio da equipe operacional, quanto por meio de informações do fabricante. Essas informações serão anotadas e registradas em uma planilha documental, que irá associar cada falha funcional de cada componente com sua respectiva causa, frequência, modo de falha, modo de detecção, severidade, efeito e as ações recomendadas para se evitar ou diminuir a frequência de ocorrência. A Figura II ilustra as etapas do FMEA.

Figura II: Etapas do FMEA

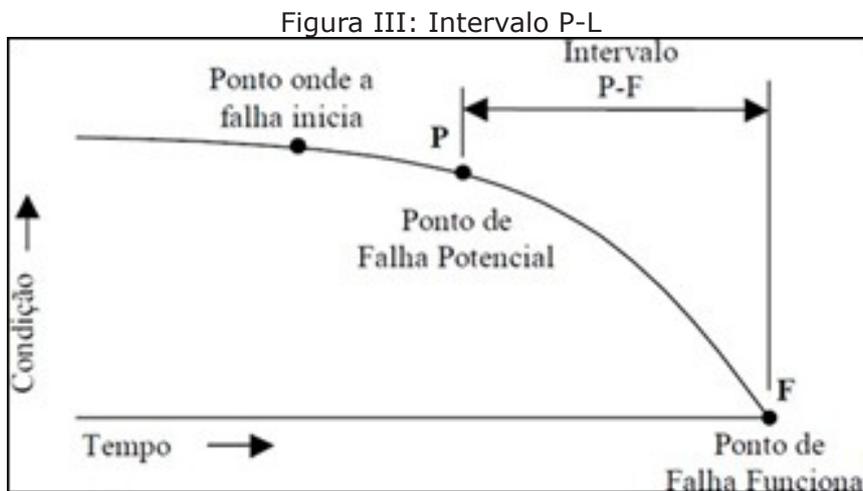


Fonte: Adaptado de Zaians (2003)

2.4.1 Falha, Falha Funcional e Falha Potencial

Teles (2019) define falha como sendo qualquer evento que cause uma interrupção no bom desempenho de uma função, ou funções, de um item. Falhas funcionais são as falhas que comprometem um ativo a ponto de ele ser incapaz de desenvolver a função ao qual se destina. Moubray (1996) complementa a definição, afirmando que essa incapacidade afeta um padrão definido de desempenho como aceitável pelo usuário.

Por fim, Teles (2019, p. 331) define a falha potencial como a condição identificável de uma falha estar próxima de ocorrer ou estar ocorrendo. A figura III apresenta a relação entre falha potencial e falha funcional. Pode-se perceber que a condição do ativo tende a cair conforme o tempo avança. Em um determinado momento, uma falha irá surgir. Do momento em que essa falha pode ser notada (ponto P), sendo aí o ponto de falha potencial, até o momento em que essa falha realmente ocorra (ponto F), que é o ponto de falha funcional, há um intervalo de tempo, chamado de Intervalo P-F.



Fonte: Adaptado de Zaijns (2003)

2.4.2 RPN

Após se definir e desenvolver o FMEA, atribuem-se valores para cada uma das variáveis analisadas. Com esses valores, pode-se, então, por meio de fórmulas matemáticas, calcular o seu RPN.

O RPN – *Risk Priority Number* ou Número de Prioridade de Risco – é um valor de risco calculado para determinado componente que está associado à cada modo de falha. Atribui valores quantitativos para cada dado qualitativo no processo de tomada de decisão na hierarquização das falhas, onde quanto maior for o RPN, maior será a prioridade necessária que se deverá dar ao componente analisado. De acordo com Teles (2019, p. 106), esse indicador é uma forma de descobrir qual modo de falha oferece ao sistema maior risco e, conseqüentemente, qual deverá ter prioridade na prevenção.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho apresenta-se na forma de um estudo descritivo, procurando realizar uma análise feita com base em dados quantitativos, fundamentando-se em um estudo de caso, e coleta de dados documentais junto ao fabricante do instrumento e documentos da empresa estudada. A técnica de coleta de informações mais importante dela é a observação participante, que, às vezes, aparece como sinônima de enfoque qualitativo. (TRIVIÑOS, 1987, p.187)

O estudo foi realizado em uma fábrica de pequeno porte que conta com 5 funcionários, situada em Paço do Lumiar-MA e atua no ramo da construção civil, na fabricação de argamassa. Primeiramente, foi feito um levantamento sobre o inventário com todos os ativos existentes na unidade de produção, organizando-os em níveis hierárquicos. A partir de então, foi feita a decomposição em subsistemas, passando pela planta, contemplando a máquina, o conjunto, o equipamento e, por fim, os componentes. Por meio dessas etapas, é possível ter uma visão mais detalhada de todos os componentes presentes no local.

Após isso, para se definir os níveis de criticidade de um equipamento, foram elaboradas matrizes de criticidade, adotando-se como pontos avaliativos 5 fatores, considerados primordiais, segundo o modelo de Teles (2019): Produção, Segurança e meio ambiente, Custos, Back-up e Qualidade. Para cada um dos fatores em análise, atribuiu-se uma nota de 1 a 4,5, de acordo com critérios determinados, conforme ilustra o Quadro I.

Quadro I: Critérios de avaliação para cada ponto da matriz de criticidade

PRODUÇÃO	
NOTAS	CRITÉRIO
1	Caso o equipamento falhe, irá interromper o processo de produção, provocar lucro cessante e custos induzidos (multas).
1,5	Caso o equipamento falhe irá interromper o processo de produção de forma irreversível.
3,5	Se o equipamento falhar irá interromper a produção de forma recuperável.
4,5	Se o equipamento falhar não interromperá o processo de produção.
SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE	
NOTAS	CRITÉRIO
1	Caso o equipamento falhe, provoca risco de morte e/ou danos graves ao meio ambiente.
1,5	Caso o equipamento falhe, causa lesões corporais não permanentes.
3,5	Caso o equipamento falhe, causa riscos controláveis a segurança e meio ambiente.
4,5	Caso o equipamento falhe, não causa riscos à segurança e meio ambiente.
CUSTOS	
NOTAS	CRITÉRIO
1	Impacta em mais que 30% dos custos mensais de manutenção.
1,5	Impacta entre 20% e 29% dos custos mensais de manutenção.
3,5	Impacta entre 10 e 19% os custos mensais de manutenção.

4,5	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.
BACK-UP	
NOTAS	CRITÉRIO
1	Não possui viabilidade técnica ou econômica para <i>backup</i> .
1,5	Não possui <i>backup</i> .
3,5	Possui <i>backup</i> , mas não instalado em paralelo.
4,5	Possui <i>backup</i> instalado em paralelo.
QUALIDADE	
NOTAS	CRITÉRIO
1	Impacta na qualidade do produto final e na experiência do cliente externo.
1,5	Impacta na qualidade do produto final de forma irre recuperável.
3,5	Impacta na qualidade do produto final de forma recuperável.
4,5	Não traz impactos na qualidade.

Fonte: Adaptado de Teles (2019)

Após a atribuição das notas, foi realizada uma multiplicação, obtendo-se o valor de criticidade do equipamento, conforme a equação 1, onde NP, NS, NC, NB, NQ e NG são, respectivamente, as Notas de Produção, Notas de Segurança, Notas de Custo, Notas de Back-up, Notas de Qualidade e Nota de Gravidade.

$$NP * NS * NC * NB * NQ = NG \quad (1)$$

Após a caracterização e os cálculos, foi avaliado o nível de criticidade, utilizando como referência os valores considerados por Teles (2019), conformemostrado no Quadro II.

Quadro II: Níveis de criticidade

Nota	Criticidade
< 55	A = Alta Criticidade
Entre 56 e 161	B = Média Criticidade
> 162	C = Baixa Criticidade

Fonte: Adaptado de Teles (2019)

Em posse dos valores de criticidade e uma tabela de referência para classificar cada equipamento, foi possível elencar cada um dos componentes em uma escala de criticidade, do mais crítico para o menos crítico. Definido o componente de confecção do FMEA, após a avaliação da lista de equipamentos por ordem de criticidade, escolheu-se pelo equipamento com maior valor.

Para o FMEA, procurou-se encontrar as possíveis falhas para cada componente do equipamento em análise, avaliando as suas frequências de ocorrências, o modo como se apresenta, a capacidade de detecção, o que pode ocasionar, ou seu efeito, o nível de severidade que irá ocasionar para o equipamento e as ações necessárias a se tomar quando a falha for detectada. Para as variáveis Ocorrência (O), Detecção (D) e Severidade (S), atribuíram-se valores, elencados no Quadro III, de modo que se possa calcular o RPN, que será dado pela fórmula:

$$O * D * S = RPN \quad (2)$$



Quadro III: Valores para as variáveis do FMEA

Ocorência	Deteção	Severidade	Nota
Chance Remota de Falha	Controles certamente detectarão.	Sem efeito relevante.	1
Frequência muito baixa: 1 vez a cada 5 anos	Controles quase certamente detectarão.	Sem gravidade e/ou risco de acidade, parada de produção ou problemas de qualidade.	2
Pouco Frequente: 1 vez a cada 2 anos	Controles têm boas chances para detectar.	Há risco controlável de segurança, produção ou qualidade, com certeza de aviso prévio.	3
Frequência baixa: 1 vez por ano	Controles têm boas chances para detectar.	Há risco controlável de segurança, produção ou qualidade, com possibilidade de aviso prévio.	4
Frequência ocasional: 1 vez por semestre	Controles podem detectar.	Há risco controlável de segurança, produção ou qualidade, sem aviso prévio.	5
Frequência moderada: 1 vez por mês	Controles podem detectar.	Equipamento operável, mas item(s) de segurança inoperável(is).	6
Frequente: 1 vez por semana	Controles têm pouca chance de detecção.	Equipamento inoperável, mas com níveis de desempenho reduzido.	7
Frequência elevada: algumas vezes por semana	Controles têm pouca chance de detecção.	Equipamento totalmente inoperável (perda das funções primárias).	8
Frequência muito elevada: 1 vez ao dia	Controles provavelmente não irão detectar.	Risco incontrolável de acidente e parada de produção, com aviso prévio.	9
Frequência máxima: várias vezes ao dia	Certeza absoluta de não detecção.	Risco incontrolável de acidente e parada de produção, sem aviso prévio.	10

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Após a determinação do RPN dos componentes estudados, foi elaborado um plano de manutenção, detalhado no Apêndice D, listando os componentes do equipamento e estabelecendo um período de tempo em que devem ser realizadas as atividades de monitoramento ou de realização de paradas programadas para que manutenções preventivas sejam feitas. Baseado nesse plano de manutenção, foi criado um *check-list* para o misturador, Apêndice C, contemplando as causas e os modos mais comuns de falhas em cada um dos componentes para que estes sejam constantemente monitorados de maneira mais enfática.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o apêndice A, que apresenta a matriz de criticidade dos componentes dos equipamentos, foi observado que a rosca helicoidal do misturador e o comando elétrico da ensacadora apresentaram menores valores pela equação (1), sendo componentes de criticidade A. Escolheu-se por trabalhar com o misturador por ser um equipamento que, em caso de falha, afetará diretamente, de forma negativa, na qualidade do produto.

O misturador utilizado na fábrica, apresentado na Figura IV, é do tipo vertical, modelo MGV – 1000, operando com um motor de 7,5 cv. Sua rosca misturadora é do tipo helicoidal e com capacidade de 1000Kg por batida. A rosca helicoidal do misturador, material alvo desse estudo, junto do comando elétrico da ensacadora, foram os componentes que apresentaram níveis de criticidade A, fazendo com que a elaboração de um plano de manutenção tivesse uma necessidade mais imediata.

Figura IV: Misturador dos insumos da argamassa



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

A seta 1 mostra o local de admissão da areia peneirada junto com cimento, provenientes da moega de armazenagem. A seta 2 mostra o motor elétrico de acionamento da rosca helicoidal do misturador, que está ligado por meio de duas polias e correias triplas, formando o sistema de transmissão motor-eixo principal. Já a seta 3 aponta a saída da argamassa, já misturada, para o silo de armazenagem e, posterior, ensacamento.

No apêndice B é apresentado o FMEA desenvolvido, elencando as prováveis falhas e os seus modos e efeitos resultantes, bem como seus respectivos números de RPN e as ações recomendadas para se evitar, ou retardar, cada uma dessas falhas. Observa-se que trincas e fraturas no rolamento superior do eixo principal; trincas, fraturas e desgaste no rolamento inferior do eixo principal; fraturas nos mancais dos rolamentos do eixo principal obtiveram maiores números de RPN (RPN = 168, RPN = 350, RPN = 210, RPN = 350, RPN = 175).

e RPN = 200, respectivamente), o que indica que essas falhas são as mais críticas ao ocorrer no componente e que necessitam de constante monitoramento e uma intervenção rápida em caso de ocorrência.

De acordo com a empresa fabricante do misturador, recomenda-se uma manutenção geral a ser realizada anualmente no equipamento, como mostra a Quadro IV, e baseado nos resultados obtidos pelo FMEA, foi elaborado *check-list* de inspeção para o misturador, que consta no apêndice C.

Quadro IV: Plano de manutenção dos equipamentos da fábrica de acordo com o fabricante

Plano de Manutenção	
Equipamento - Misturador	
Itens:	Período para manutenção:
Transportador de areia para Moega	9 meses
Transportador da Moega para Misturador	14 meses
Misturador	12 meses
Transportador do Misturador para Silo	16 meses
Transportador do Silo para Ensacadeira	18 meses
Ensacadeira	3 meses

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Foi sugerido também a troca dos rolamentos existentes por rolamentos blindados, para evitar a entrada de detritos provenientes do processo de fabricação da argamassa e garantir maior durabilidade a esses componentes, principalmente para o rolamento inferior, além de um acompanhamento mais intenso às condições da peça, fazendo um melhor controle das condições do lubrificante ali aplicado. Foi ainda sugerido fazer um acompanhamento dos índices de desempenho tanto dos rolamentos quanto dos mancais, visto que esses componentes são críticos, visando reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas, desgastes e danos gerais. Levando em conta as recomendações do fabricante, sugeriu-se que seja feita uma revisão do conjunto do misturador a cada 12 meses.

De acordo com os resultados obtidos durante a análise e elaboração do FMEA, o apêndice D apresenta uma sugestão de um plano de manutenção que foi desenvolvido para o misturador com um período de validade de 52 semanas, com sugestão de início de aplicação a partir do segundo semestre de 2021, começando na primeira semana de julho, onde foram definidas as atividades desde inspeção e o ativo a ser inspecionado, além do tipo de atividade e a frequência em que serão realizadas. Considerando-se que os componentes mais críticos estão localizados na parte interna do equipamento, e sua desmontagem para uma análise visual demandaria bastante tempo e mão-de-obra especializada, o que ocasionaria uma parada da produção, e conseqüente perda do lucro, é recomendada a utilização de métodos de inspeção não invasivos.

Com relação ao conjunto de polias e correias, do eixo de transmissão motor- eixo, foi sugerida uma análise visual para as correias, visto que por serem componentes externos e de mais fácil inspeção, além de que estão sujeitas ao ressecamento e um mal tensionamento nas polias, definiu-se uma frequência semanal, verificando sempre as condições operacionais e obedecendo as especificações de tensionamento sugeridas pelo fabricante. Já para as polias, além da análise visual, uma análise termográfica também é sugerida, com intervalos de 2 em 2 meses, para avaliar o nível de desgaste, corrosão e de abrasão

pela entrada de elementos estranhos nos espaços entre as correias e as polias. Esse fator pode, também, ser detectado pelo aumento anormal da temperatura local durante o seu funcionamento, o que causaria uma diminuição do torque transferido para o eixo principal do misturador, diminuindo a eficiência operacional global da máquina.

Analisando os rolamentos superiores do eixo principal, percebeu-se que as falhas mais críticas são trincas e fraturas, com seus modos de falha se apresentando por aquecimento anormal da região e aumento do ruído e da vibração produzidos durante o funcionamento. Para tanto, foi recomendado o uso de métodos de análise vibracional e termográfica, a serem realizadas com intervalos de 6 em 6 meses.

No caso dos rolamentos inferiores do eixo principal, que estão sujeitos à falhas decorrentes de fraturas, trincas e desgaste, análises vibracionais e termográficas são bastante indicadas para seu monitoramento, bem como uma avaliação da carga de operação a qual estão submetidos. Além disso, uma análise do lubrificante utilizado, observando o nível de contaminação, se faz necessária, sendo realizada em um período de 6 meses, que, de acordo com o comportamento apresentado, esse período pode ser flexibilizado para um período de 12 meses, pois como estão sujeitos a esforços e riscos de falhas maiores, se faz necessário um acompanhamento mais detalhado.

Para os mancais do rolamento do eixo principal, recomenda-se o uso de análise vibracional e termográfica, com um planejamento de realização em uma frequência semestral, pois o risco de ocorrência de fraturas se apresenta por um aumento incomum da vibração, pelo aquecimento anormal na região e do ruído produzido durante seu funcionamento. Foi recomendada ainda uma reavaliação da carga de operação a qual são submetidos. Essa recomendação de atividades de manutenção e inspeção são válidas tanto para o mancal superior do rolamento quanto para o mancal inferior.

Relacionado à rosca helicoidal do misturador, os métodos não invasivos são os mais indicados para se monitorar suas condições operacionais, visto que é um componente interno da máquina e de difícil acesso. Foram sugeridas análises de vibração, análise termográfica e o método de ultrassom, a serem realizados anualmente, conforme recomendação do fabricante, para monitorar os níveis de corrosão, desgaste e embuchamento do eixo, que podem ser causados pelo excesso de volume de carga admitido no momento da mistura. Não é descartada também uma análise visual do produto ao sair do misturador, pois todas as falhas descritas terão efeito direto nas características e qualidade do produto final. Ademais, é considerado ainda um monitoramento do material antes da admissão no misturador, avaliando suas características físicas, o que implicará em um melhor tratamento dos insumos a serem adicionados.

Foi ainda sugerida uma análise do lubrificante usado, a ser realizada com uma frequência bimestral, avaliando a sua qualidade, a presença de elementos externos indesejados e possíveis desgastes nos mancais e rolamentos do maquinário.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Num primeiro momento, o plano de manutenção e o *check-list*, com o roteiro de visita e monitoramento do misturador, em decorrência da falta de informações precisas no ambiente fabril, foram elaborados de acordo com os dados que o fabricante disponibilizou e com os resultados obtidos pelo FMEA. Vale ainda ressaltar que os períodos de ocorrência das falhas foram estimados conforme informações obtidas pelo próprio fabricante do equipamento, pois a fábrica não possui um registro catalogado do histórico de falhas e manutenções realizados nos equipamentos. Tanto o FMEA, quanto o *check-list* e o plano de manutenção deverão passar por futuras revisões de ajuste a fim de aumentar a acurácia e adequá-los de acordo com a realidade operacional presente na fábrica.

Foi feita a recomendação da criação de um memorando, contendo todas as informações de futuras falhas e intervenções a serem realizadas em toda a planta fabril, de modo que se tenha um maior controle das condições operacionais e os tipos de manutenção a serem adotados em diferentes situações que venham a ocorrer. Além disso, será possível ter um acompanhamento mais acurado sobre os equipamentos para refinamento dos resultados obtidos durante esse estudo, a fim de atualizar as informações contidas nos documentos de avaliação, *check-list* e planos de manutenção, para obter uma maior assertividade e confiabilidade nos dados registrados.

As frequências para a realização das atividades descritas no plano de manutenção para cada componente, também têm a possibilidade de sofrerem alterações, conforme o registro de falhas for desenvolvido e alimentado dentro da unidade. Como não há uma linearidade no tempo de vida útil dos componentes críticos, acredita-se que o uso de uma Manutenção Proativa, onde é feita uma inspeção preditiva seguida de uma ação corretiva programada, quando os indicadores apontarem uma queda considerável nos parâmetros de eficiência do componente, seja a melhor alternativa para se manter os ativos operantes satisfatoriamente pelo maior espaço de tempo possível.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, p. 7. 1994.
- ALMEIDA, S. P. **Manutenção mecânica industrial**. Conceitos Básicos e tecnologia aplicada. São Paulo: Editora Érica, 2015.
- CAMPBELL, H. C. **Orientação para resultados**: um estudo aplicado à área de planejamento e controle da manutenção. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 23. 2017.
- COSTA, D. C. **Ferramentas e métodos de manutenção**: um estudo de caso em uma máquina de corte e solda em uma indústria de plásticos. XXII Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, SP, 2015.
- MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. São Paulo: Aladon Ltda, 1996.
- MOUTA, C. S. **Gestão da manutenção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletromecânica) - Universidade da Beira Interior. Covilhã, p. 2, 2011.
- PLAZZI, T. S.; VENTURA, K. M. **Aplicação das ferramentas da qualidade no gerenciamento de manutenção industrial para melhoria e consolidação de resultados** - estudo de casos. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 15. 2017.



são de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Faculdades Integradas de Aracruz. Aracruz, p.22, 2017.

REID, R. D. **FMEA** — something old, something new. Quality Progress. v. 38, n. 5, p. 90- 93, 2005. Disponível em: <<http://www.generalpurposehosting.com/updates/dec08/FMEA%97Something%20Old%20Something%20New.PDF>>. Acesso em: 14 abr. 2021.

SANTOS, T. A. D. **Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade em Aciaria de Usina Siderúrgica**. Monografia (MBA em Engenharia da Manutenção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 29, 2012.

TELES, J. **Bíblia do RCM: O guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na indústria 4.0**. Brasília: ENGETELES Editora, p.143-144; 128-132, 2019.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, p. 187, 1987.

ZAIONS, D. R. **Consolidação da metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma planta de Celulose e Papel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 58, 2003.



APÊNDICE A - Resultados das Matrizes de criticidade

Matriz de Criticidades							NG	CRITICIDADE
Equipamento	Produção	Segurança e Meio Ambiente	Custos	Back-Up	Qualidade			
Motor elétrico peneira	Ir impactar a produção de forma recuperável.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Possui backup, mas não instalado em paralelo.	Não traz impactos na qualidade.	316,40625	C	
Comando elétrico peneira	Ir impactar a produção de forma recuperável.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	189,84375	C	
Peneira	Ir impactar a produção de forma recuperável.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Possui backup, mas não instalado em paralelo.	Não traz impactos na qualidade.	316,40625	C	
Transportador moega/misturador	Ir impactar a produção de forma recuperável.	Não provoca riscos.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Possui backup, mas não instalado em paralelo.	Não traz impactos na qualidade.	569,53125	C	
Motor elétrico moega/misturador	Ir impactar a produção de forma recuperável.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Possui backup, mas não instalado em paralelo.	Não traz impactos na qualidade.	316,40625	C	
Comando elétrico moega/misturador	Ir impactar a produção de forma recuperável.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	189,84375	C	
Motor elétrico misturador	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	113,90625	B	
Comando elétrico misturador	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	113,90625	B	
Rosca helicoidal misturador	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Não provoca riscos.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Impacta na qualidade do produto final e na experiência do cliente externo.	45,5625	A	
Transportador misturador/silo	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Não provoca riscos.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Possui backup, mas não instalado em paralelo.	Não traz impactos na qualidade.	341,71875	C	
Motor elétrico misturador/silo	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	113,90625	B	
Comando elétrico misturador/silo	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	113,90625	B	
Transportador silo/ensacadora	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Não provoca riscos.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Possui backup, mas não instalado em paralelo.	Não traz impactos na qualidade.	341,71875	C	
Motor elétrico silo/ensacadora	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	113,90625	B	
Redator silo/ensacadora	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Não provoca riscos.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	205,03125	C	
Transportador ensacadora	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Não provoca riscos.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	205,03125	C	
Motor elétrico ensacadora	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Podê provocar riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Não traz impactos na qualidade.	113,90625	B	
Comando elétrico ensacadora	Ir impactar a produção de forma irrecuperável e terá lucro cessante.	Provoca riscos controláveis de acidente.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Impacta na qualidade do produto final de forma recuperável.	37,96875	A	
Balança	Ir impactar a produção de forma recuperável.	Não provoca riscos.	Impacta menos que 10% dos custos mensais de manutenção.	Não possui backup.	Impacta na qualidade do produto final de forma recuperável.	189,84375	C	



APÊNDICE B - FMEA do misturador

FMEA - Análise dos Modos e Efeitos de Falha													
FMEA nº:	0001/01	Data da Elaboração:	13/05/2021	Revisão:		Data da Revisão:							
Processo:	0000-01	Responsável:	LEÔNIO PEREIRA DE DEUS NEVES	Revisor:									
Equipamento	Função	Componente	Falha	Ocorrência	0	Modo de Falha	D	Efeito de Falha	S	RPN	Ação Recomendada:		
Misturador	Realizar a mistura dos insumos para produção de argamassa	Pólas de acionamento do eixo principal	ABRAÇÃO PELA ENTRADA DE ELEMENTOS ESTRANHOS	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	AQUECIMENTO	2	DIMINUIÇÃO DO TORQUE TRANSFERIDO PARA O EIXO PRINCIPAL	3	18	Realizar limpeza periódica nas superfícies de contato entre as pólas e correia.		
			DESGASTE	Freqüência baixa: 1 vez por ano	4	FOLGA ENTRE A POLIA E CORREIA	2	DIMINUIÇÃO DO TORQUE TRANSFERIDO PARA O EIXO PRINCIPAL	6	48	Monitoramento das condições operacionais e profundidade do canal da polia.		
			CORROÇÃO	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	FOLGA ENTRE A POLIA E CORREIA	2	DIMINUIÇÃO DO TORQUE TRANSFERIDO PARA O EIXO PRINCIPAL	6	36	Monitoramento regular das condições da polia, utilizar pólas com revestimento anticorrosivo na superfície.		
			RESSECAMENTO	Freqüência ocasional: 1 vez por semestre	5	RACHADURAS NA CORREIA	1	AUMENTO NA RIGIDEZ DA CORREIA, PODENDO LEVAR À SUA RUPTURA.	8	40	Monitoramento constante das condições operacionais da correia.		
			TENSIONAMENTO INADEQUADO	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	DIMINUIÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMITIDA AO EIXO PRINCIPAL	1	PODE PROVOCAR DESGASTE E SUPERaquecimento OU COMPROMETER EIXOS MANCAIS E ROLAMENTOS POR FADIGA PREMATURA.	8	24	Monitoramento visual constante da correia e tensionamento de acordo com o especificado pelo fabricante.		
			DESGASTE	Freqüência moderada: 1 vez por mês	6	FOLGA NA TRANSMISSÃO POLIA-CORREIA	1	REDUÇÃO DA ESPESURA DA CORREIA, PODENDO OCASIONAR DESLIZAMENTO ENTRE A POLIA E A CORREIA.	3	18	Monitoramento constante das condições operacionais da correia.		
		Rosa helicoidal	DESGASTE	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	DIMINUIÇÃO DA CAPACIDADE OPERACIONAL PRIMÁRIA	2	PRODUTO FINAL MAL MISTURADO	6	36	Acompanhamento do nível de deterioração e uso de equipamentos de ultrassom para monitoramento de desgaste.		
			EMBUICHAMENTO	Freqüência muito baixa: 1 vez a cada 5 anos	2	RUIDOS INDESEJADOS/AUMENTO NA PRESSÃO DE OPERAÇÃO	1	AUMENTO DO ESFORÇO EXERCIDO PELO COMPONENTE PODENDO OCASIONAR A QUEBRA DE OUTROS COMPONENTES QUE ATUAM EM CONJUNTO COM ELE	8	16	Monitoramento do material antes da admissão no misturador e controle do volume admitido por operação.		
			CORROÇÃO	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	DIMINUIÇÃO DA CAPACIDADE OPERACIONAL PRIMÁRIA	2	PRODUTO FINAL MAL MISTURADO	7	42	Acompanhamento do nível de corrosão; melhor preparação e tratamento dos insumos a serem adicionados; uso de equipamentos de ultrassom para monitoramento de desgaste.		

Apêndice B - FMEA do misturador

FMEA - Análise dos Modos e Efeitos de Falha																																																
FMEA nº: Processo:	Data de Elaboração: Responsável:	Falha	Ocorrência	O	Modo de falha	Revisão: Revisor:	D	Efeito de falha	S	RPN	Ação Recomendada:																																					
												Componente	Função	Componente	Função																																	
0001/01 0000-01	14/05/2021 LEONARDO FERREIRA DE DEUS NEVES	FOLGA	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	VIBRAÇÃO	Controles têm boas chances para detectar.	3	AUMENTO DA FADIGA NOS COMPONENTES DESGASTANDO OS DE MANEIRA MAIS RÁPIDA	6	54	Utilizar rolamentos de qualidade e substituí-los assim que for constatado esse defeito de fábrica.																																					
												TRINCA	Frequência baixa: 1 vez por ano	4	VIBRAÇÃO/ RUIDOS INDESEJADOS	Controles têm pouca chance de detecção.	7	RESULTA EM UM CONCENTRADOR DE TENSÕES E DIMINUI A DURABILIDADE DO COMPONENTE, PODENDO LEVAR À SUA RUPTURA	6	168	Uso de equipamentos para monitorar as condições do componente (ultrassom); reter a carga de operação a qual é submetido.																											
																						FRATURA	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5	VIBRAÇÃO/ AQUECIMENTO	Controles têm pouca chance de detecção.	10	SE NÃO CONTROLADA A TEMPO, HAVERÁ RUPTURA DO COMPONENTE	350	Melhorar método de montagem; reajustar a carga de operação; fornecer melhor apoio para a estrutura do rolamento.																		
																															CORROÇÃO	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	VIBRAÇÃO/ DESLIZAMENTO DOS COMPONENTES	Controles têm boas chances para detectar.	7	DIMINUIÇÃO DA PAREDE PODENDO LEVAR À SUA RUPTURA	63	Resolução do lubrificante utilizado; aplicação de uma película de lubrificante entre as superfícies de contato; revisar as técnicas de lubrificação; melhorar o método de armazenagem e manipulação dos insumos utilizados.									
																																								DESGASTE	Frequência baixa: 1 vez por ano	4	AQUECIMENTO	Controles podem detectar.	5	SOBRECARGA NO EIXO, PODENDO LEVAR À	120	Melhor filtragem do lubrificante usado; redoplar o lubrificante utilizado e método de lubrificação; melhorar mecanismo de vedação.
		TRINCA	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5	VIBRAÇÃO/ RUIDOS INDESEJADOS	Controles têm pouca chance de detecção.	7	RESULTA EM UM CONCENTRADOR DE TENSÕES E DIMINUI A DURABILIDADE DO COMPONENTE, PODENDO LEVAR À SUA RUPTURA	210	Uso de equipamentos para monitorar as condições do componente (ultrassom); reter a carga de operação a qual é submetido.																																						
											FRATURA	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5	VIBRAÇÃO/ AQUECIMENTO	Controles têm pouca chance de detecção.	10	SE NÃO CONTROLADA A TEMPO, HAVERÁ RUPTURA DO COMPONENTE	350	Melhorar método de montagem; reajustar a carga de operação; fornecer melhor apoio para a estrutura do rolamento.																													
																				CORROÇÃO	Pouco Freqüente: 1 vez a cada 2 anos	3	VIBRAÇÃO/ DESLIZAMENTO DOS COMPONENTES	Controles têm boas chances para detectar.	7	DIMINUIÇÃO DA PAREDE, PODENDO LEVAR À SUA RUPTURA	63	Resolução do lubrificante utilizado; aplicação de uma película de lubrificante entre as superfícies de contato; revisar as técnicas de lubrificação; melhorar o método de armazenagem e manipulação dos insumos utilizados.																				
																													DESGASTE	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5	AQUECIMENTO	Controles podem detectar.	5	SOBRECARGA NO EIXO, PODENDO LEVAR À DESGASTE ACENTUADO	175	Melhor filtragem do lubrificante usado; redoplar o lubrificante utilizado e método de lubrificação; melhorar mecanismo de vedação.											



Apêndice B - FMEA do misturador

FMEA - Análise dos Modos e Efeitos de Falha

FMEA nº: 0001/01		Data de Elaboração: 13/05/2021		Revisão:		Data de Revisão:							
Processo: 0000-01		Responsável: LEÔNICO PEREIRA DE DEUS NEVES		Revisor:									
Equipamento	Função	Componente	Falha	Ocorrência	Modo de Falha	Deteção	D	Efeito de Falha	Severidade	S	RPN	Ação Recomendada:	
Misturador	Realizar a mistura dos insumos para produção de argamassa	Mancos do rolamento do eixo principal	ABRASIÃO PELA ENTRADA DE ELEMENTOS ESTRANHOS	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5	AQUECIMENTO	Controles podem detectar.	5	DETERIORAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA	Hi risco controlável de segurança, produção ou qualidade, com certeza de aviso prévio.	3	75	Substituição dos mancais por mancais blindados; remoção dos corpos estranhos presentes por meio de filtros.
			FRATURA	Frequência baixa: 1 vez por ano	4	VIBRAÇÃO	Controles podem detectar.	5	SE NÃO CONTROLADA A TEMPO, HAVERÁ RUPTURA DO COMPONENTE	Risco incontrolável de acidente e parada de produção, sem aviso prévio.	10	200	Uso de equipamentos para monitorar as condições do componente (ultrassom); rever a carga de operação a qual é submetido.
			DESGASTE	Frequência baixa: 1 vez por ano	4	VIBRAÇÃO	Controles podem detectar.	5	DETERIORAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA	Hi risco controlável de segurança, produção ou qualidade, com certeza de aviso prévio.	3	60	Mantiver uma lubrificação adequada e utilizar revestimentos com maiores resistências ao atrito.
			CORROSÃO	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5	VIBRAÇÃO	Controles têm boas chances para detectar.	3	DETERIORAÇÃO DA SUPERFÍCIE METÁLICA	Hi risco controlável de segurança, produção ou qualidade, com certeza de aviso prévio.	3	45	Reavaliar a carga, a técnica de lubrificação e o lubrificante utilizados.

Apêndice C - Check list para o misturador

CHECK LIST - INSPEÇÃO PREVENTIVA						
NOME MISTURADOR		ANO DE FABRICAÇÃO	Nº DE SÉRIE	Nº DE PATRIMÔNIO	CAPACIDADE DA MÁQUINA	
ITEM	DESCRIÇÃO	TEMPO PARA REALIZAÇÃO	CONFORME	NÃO CONFORME	OBSERVAÇÃO	
1					Mancais e Rolamentos	
1.1	Mancais apresentam sinais de fadiga, trincas visíveis e/ou deformações?					
1.2	Rolamentos apresentam sinais de fadiga, trincas visíveis e/ou deformações?					
2					Sistema de Polias e Correias	
2.1	Verificar as condições físicas das correias (apresentam ressecamento, rachaduras, desgaste avançado ou rigidez?)					
2.2	Verificar as condições físicas das polias (apresentam rachaduras, desgaste ou deformações?)					
3					Eixo Principal	
3.1	Verificar as condições do eixo principal (apresenta vibrações ou ruídos fora da faixa usual de funcionamento, produz aumento de temperatura além do considerado aceitável?)					
4					Silo Misturador	
4.1	Verificar condições físicas dos parafusos para fixação (apresentam sinais de desgaste, oxidação, corrosão ou folgas?)					
4.2	Verificar condições físicas do silo (apresenta desgaste, oxidação, corrosão, amassados?)					

Realizado por:

Assinatura:



Apêndice D - Plano de manutenção

Área:	MANUTENÇÃO		Data de Elaboração:		Elaborado por:		Dias:		Semana:																				
	08/06/2021	01/07/2021	26	26	LEÔNICIO PEREIRA DE DEUS NEVES	01/07/2021	26	01/07/2021	26																				
ATIVIDADE	FREQÜÊNCIA	SEMANA INÍCIO	2021/2022																										
Kit de Correias	Semanal	26	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Kit de Correias	Bimestral	27																											
Rollamento Superior	Semestral	26																											
Rollamento Superior	Semestral	26																											
Mancal Superior	Semestral	26																											
Mancal Superior	Semestral	26																											
Rollamento Inferior	Semestral	26																											
Rollamento Inferior	Semestral	26																											
Mancal do eixo principal	Semestral	26																											
Mancal do eixo principal	Semestral	26																											
Análise de Óleo	Bimestral	27																											
Eixo Helicoidal	Anual	26																											
Eixo Helicoidal	Anual	26																											
Eixo Helicoidal	Anual	26																											

CAPÍTULO 3

ANÁLISE AERODINÂMICA DE ESTRUTURAS DESENVOLVIDAS EM INTERFACE DO SOFTWARE XFLR5

AERODYNAMIC ANALYSIS OF STRUCTURES DEVELOPED IN XFLR5
SOFTWARE INTERFACE

André Barros de Oliveira¹

Patrício Moreira de Araújo Filho²

1 Aluno Concludente do Curso de Engenharia Mecânica – Email: barroos_andree@hotmail.com

2 Orientador – Doutor em Engenharia Mecânica – Email: patricio004893@ceuma.com.br

Resumo

No presente trabalho, foi usado o conhecimento bibliográfico para definir e conceituar temas importantes sobre aerodinâmica, assim, começamos os conceitos básico de física clássica, para se familiarizar com dinâmica dos fluidos. Com isso, aprofundamos mais ainda nos conceitos de mecânica dos fluidos e foi-se estudado Bernoulli e Venturi, a partir desses estudos começamos a desenvolver o conhecimento de perfis alares e diagramas de forças que agiam sobre, conseqüentemente, foram aparecendo os coeficientes e forças que agiam sobre a asa, dessa maneira, fizemos o estudo do perfil NACA e selecionamos três, nas quais são mais comuns em competições. Por conseguinte, utilizamos o *software* XFLR5 para fazemos as análises aerodinâmicas nos perfis, desta forma, chegamos aos conhecimentos dos gráficos que apresentaram os coeficientes de sustentação, arrasto e eficiência aerodinâmica.

Palavras-chave: Aerodinâmica, software, coeficientes.

Abstract

In the present work, bibliographic knowledge was used to define and conceptualize important themes about aerodynamics, so we start the basic concepts of classical physics, to become familiar with fluid dynamics. With this, we deepened even more in the concepts of fluid mechanics and Bernoulli and Venturi were studied, from these studies we began to develop the knowledge of wing profiles and force diagrams that acted on, consequently, the coefficients and forces that acted on began to appear. acted on the wing, thus, we studied the NACA profile and selected three, which are more common in competitions. Therefore, we used the XFLR5 software to perform the aerodynamic analyzes on the profiles, in this way, we arrived at the knowledge of the graphics that presented the lift, drag and aerodynamic efficiency coefficients.

Key-Words: Aerodynamics, software, coefficients.



1. INTRODUÇÃO

O futuro da aviação passa por desafios desde Leonardo da Vinci (1452-1519) aos tempos modernos, entretanto, mesmo sendo compartilhadas as informações hoje em dia, a aviação necessita sempre de mudanças constantes para ter melhores resultados.

Com isso, aerodinâmica segundo Zag (2019) envolve o desenvolvimento de pesquisa aerodinâmica de técnicas de redes neurais, algoritmos genéticos e cruzamentos de dados em multiobjetos, com a finalidade de obter melhor coeficiente. Contudo, tais procedimentos podem ter um custo muito elevado se formos quantificar a formação de pessoal e o desenvolvimento de procedimento.

Os sistemas aerodinâmicos e analíticos que envolvem o projeto de sistemas aeroespaciais geralmente requerem informações detalhadas. Essa baixa confiabilidade às vezes pode falhar. Portanto, em atividades de desenvolvimento sustentável, um alto nível de segurança deve ser considerado. (PILCHER, 2011).

A aerodinâmica como ciência, passou a ganhar verdadeira importância apenas com o surgimento da necessidade de redução de atrito para os meios de transporte e aumento de rendimento no desempenho em serviço de veículos. A necessidade de criação de aerofólios que permitissem maiores velocidades e pouco atrito com o ar, provocou um salto no estudo da aerodinâmica. A inclusão de métodos numéricos, desenvolvimento da moderna tecnologia de dados, propiciaram o surgimento de diversas ferramentas que temporariamente desvendaram a compreensão de Mecânica dos fluidos, elementos finitos, vibrações em estruturas aerodinâmicas, (ANDERSON, 2001).

Ressalta-se que com o desenvolvimento do programa de competição SAE Brasil, a engenharia brasileira tem sido apresentada a diversos softwares para simulação aerodinâmica. Contudo, há pouca disponibilidade destas ferramentas no mercado nacional.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado um software livre, XFRL5 v6.09.05 beta, na qual será possível fazer análises de estruturas 2D desenvolvida no próprio software, sendo analisadas os coeficientes de sustentação, arrasto para cada ângulo necessário. Vale dizer que, para o estudo abrangente será separado em duas partes: a parte física e geométrica de uma aeronave para simulação. Na parte física, foi estudado a definição de aerodinâmica, força de sustentação e de arrasto, perfil e seu tipo, tuneis aerodinâmicos, teorema de Venturi e de Bernoulli, entre outros. Por outro lado, no desenvolvimento do software, foi estudado a metodologia do procedimento, na qual foi dividida em etapas e também definidos os parâmetros para as análises.



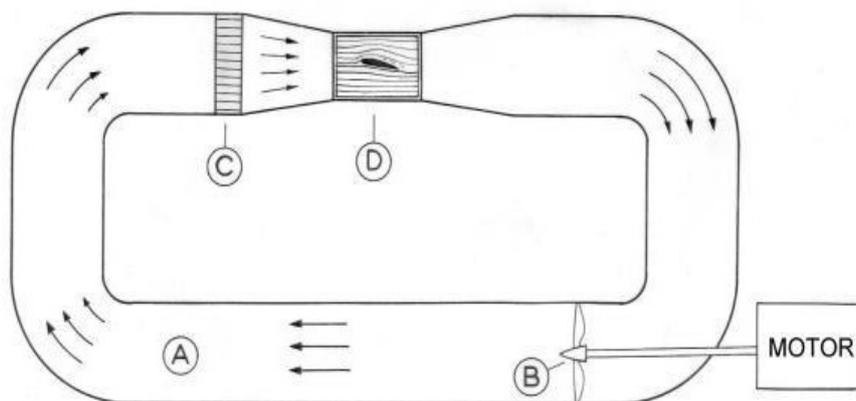
2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Teorema de Venturi

Considere um sistema fechado onde ocorre um determinado fluido em movimento constante e dentro de um duto uniforme se comprime momentaneamente ao encontrar uma zona de estreitamento, diminuindo sua pressão e, conseqüentemente, aumentando sua velocidade ao atravessar a zona estreitada onde ocorre também uma baixa pressão, e, se neste ponto, for introduzido um terceiro duto ou uma sonda, encontrará uma sucção do fluido contido nessa ligação, (NUSSENZVEIG, 1996)

Para Rodrigues (2004), Todos os corpos que se movem no espaço estão sujeitos a determinadas forças que determinam o seu comportamento pela tensão e pelo efeito do vento, sendo normalmente realizados testes relacionados com esse comportamento em turbinas eólicas é realizado em um laboratório de ar condicionado aprimorado na qual o clima é determinado e a eficiência do vento é estudada nos perfis das asas, eles são aviões artificiais. Mesmo em um avião real, conforme a figura 1:

Figura 1 – Tubo de Venturi de ensaio



Fonte: Rodrigues (2004)

Na figura, percebesse que há influência da área D com o ar-fluido gerado pela hélice B. No entanto, o perfil sofrendo esse tipo de influência, poderá apresentar dados de velocidade e quais tipos de forças vão agir e como vão agir.

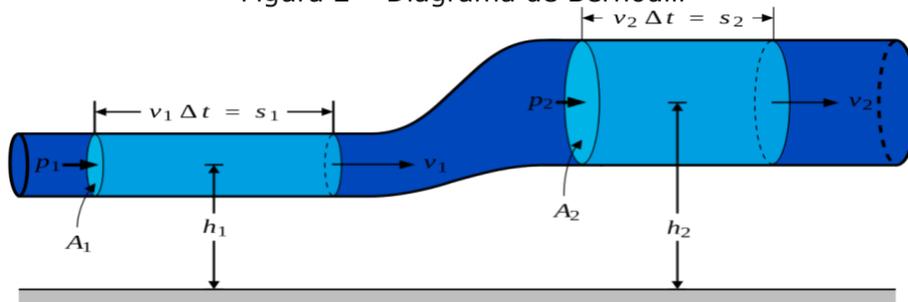
2.2 Teorema de Bernoulli

A equação de Bernoulli, na qual garante a igualdade para duas regiões distintas de um tubo por onde escoe um fluido só será mantida caso exista variação das pressões, (YOUNG, 2004). Sendo assim, como mostra na figura 2 a redução na pressão que ocorre simultaneamente com um aumento na velocidade, como previsível pela equação.

Essa dinâmica de funcionamento pode ser descrita pela equação (1) sugerida por Daniel Bernoulli em 1732 (FOX, 2001).

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = cte. \quad (1)$$

Figura 2 – Diagrama de Bernoulli



Fonte: <https://blogdaengenharia.com>

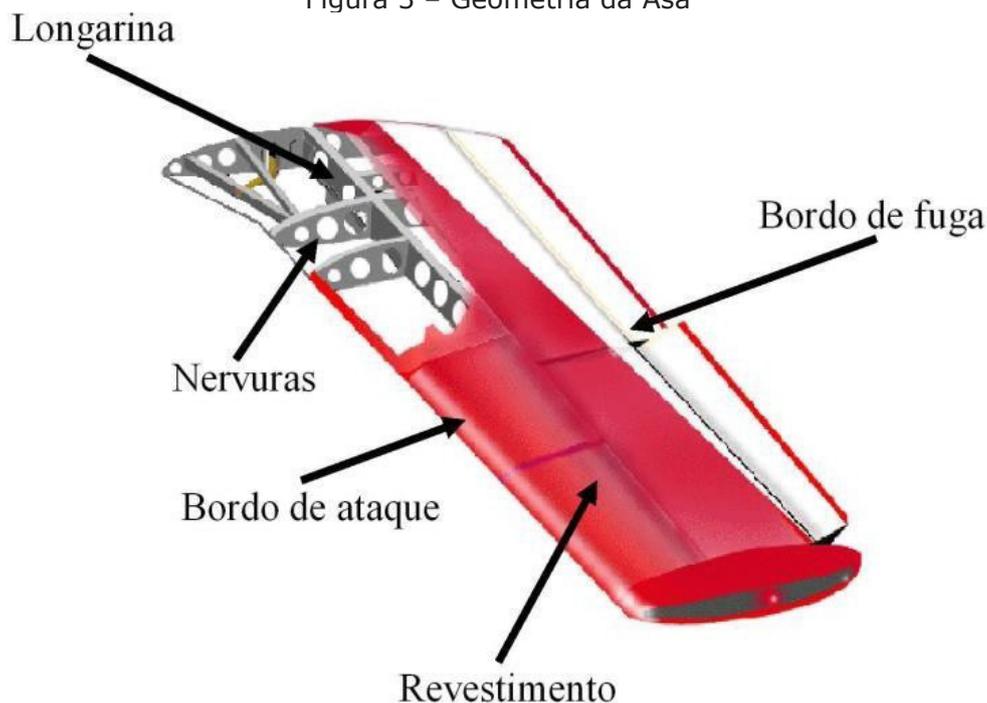
Portanto, para que aconteça esse mecanismo, o fluido precisa que o seu escoamento não tenha viscosidade, esteja em estado estacionário, incompressível, para fluxos de potencial de densidade constante.

2.3 ASA

É o principal componente que pode alimentar a aeronave durante o vôo. As asas são mostradas apenas para sentir as proporções. As asas são mostradas apenas para sentir as proporções etc, (GONÇALVES, 2016).

Com isso, para Miranda (2014) a estrutura das asas: dependendo das condições meteorológicas, as asas podem ter diversos formatos, que variam conforme a ação. Os formatos mais comuns são retangular, trapezoidal e elíptica. Asa retangular: é uma asa de baixa eficiência aerodinâmica, ou seja, a relação entre a força de sustentação e a força de arrasto (L/D) é menor quando comparada a uma asa trapezoidal ou elíptica, isso se deve à resistência na extremidade da asa também chamada de arrasto induzido, que no caso de uma asa retangular é maior do que uma asa trapezoidal ou elíptica, conforme a figura 3.

Figura 3 – Geometria da Asa



Fonte: Miranda (2014)

2.4 Forças Aerodinâmicas

O momento gerado em uma asa finita (M) é calculado através do seu coeficiente de momento (CM), bem como as forças aerodinâmicas de sustentação (L) e arrasto (D) são calculados através dos seus coeficientes de sustentação (CL) e arrasto (CD) respectivamente, (GONÇALVES, 2016).

2.4.1 Perfil Alar

Um perfil alar é constituído por duas linhas: uma superior, que forma o dorso e a que se chama extradorso, e uma inferior, que estabelece o ventre e toma o nome de intradorso. Os pontos de encontro dessas duas linhas determinam, na parte anterior, o bordo de ataque ou de entrada e, na posterior, o bordo de fuga ou de saída.

Para Freitas *et al.* (2015, p. 3), perfil alar é um componente aerodinâmico que é obtido através de corte efetuado num plano paralelo ao plano de movimento desse componente podendo ser asas, estabilizadores, caudas, pás de turbinas, rotores, entre outros objetos que desempenham uma função aerodinâmica.

2.4.2 Força de Sustentação

De acordo com Eberhardt (2006) a força aerodinâmica pode ser decomposta em duas componentes: a sustentação e o arrasto. Ele também acrescentou que a sustentação é geralmente um componente perpendicular à direção de deslocamento e que o feixe deslizando é um componente que tem ou ainda é uma direção relativa da corrente.

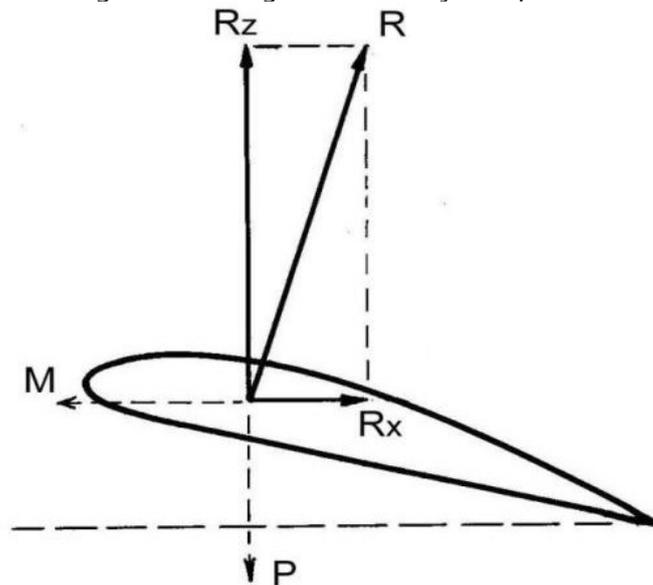
Vicente (2015) reforça que alguns fatores que influenciam na sustentação do avião em relação à asa são:

- a) Quanto maior curvatura e comprimento da asa, maior a sustentação;
- b) Quanto maior o alongamento, ou seja, a razão entre a envergadura e a corda média maior a eficiência.

Contudo, mesmo no sistema de perda as asas produzem sustentação suficiente para suportar o peso da aeronave. A força de levantamento não é zero em caso de perda. Na verdade, o coeficiente de levantamento é aumentado por um máximo de perdas. A perda é um problema que não vem da perda de peso. Mas causado pela perda de amortecimento vertical, (DENKER, 1995).



Figura 4 - Diagrama de força no perfil.



Fonte: Rodrigues (2004)

Na figura 4, a corrente de ar relativa é determinada pela direção do ar, em relação ao avião. Se o avião voa horizontalmente, a corrente de ar relativa é horizontal. Se o avião "pica" ou "cabra", a direção do vento relativo é oblíqua. Assim, a direção da corrente de ar relativa confundir-se-á com a direção da deslocação e o sentido será exatamente oposto ao do movimento do avião, (RODRIGUES, 2004).

A força de sustentação é a força causada pelo escoamento do ar através dos perfis aerodinâmicos. A força de sustentação (L) é calculada pela equação (2):

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \quad (2)$$

No qual,

ρ = densidade do ar v = velocidade da aeronave S = área de referência

C_L = coeficiente de sustentação

2.4.3 Força de Arrasto

Conforme escrito por Fox (2010), o arrasto é a componente da força que atua paralelamente à direção do movimento relativo. O coeficiente de arrasto, C_d , é definido pela equação (3), onde F_d é a força de arrasto, ρ é a massa específica do ar, U é a velocidade do escoamento e A é a área de referência que no caso de perfis aerodinâmicos é dada pelo produto da corda pela envergadura. A força de arrasto total é a soma do arrasto de atrito e do arrasto de pressão e pode ser entendido como coeficiente de resistências ao movimento relativo ao fluido.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3)$$

2.5 NACA MPXX

Os perfis NACA são classificados e codificados em um catálogo para uso por engenheiros de projeto. Neste catálogo, cada perfil é identificado pelas palavras NACA e um conjunto de dígitos, em determinada ordem, com os quais são determinadas suas dimensões geométricas.

O tratamento teórico progride de considerações elementares para métodos usados para o projeto de aerofólios de baixo arrasto NACA. Métodos e dados são apresentados para o uso de dados de seção de asas para prever as características das asas, e gráficos selecionados criteriosamente e gráficos cruzados de dados experimentais são apresentados para correlação prontamente útil de certas suposições simplificadoras feitas nas análises.

Segundo, Doenhoff (1959) as linhas de curvatura eram idênticas às da série de 4 dígitos, e uma distribuição de espessura mais geral foi definido, o que permitiu variações em o raio da borda de ataque e a posição de espessura máxima a ser investigada.

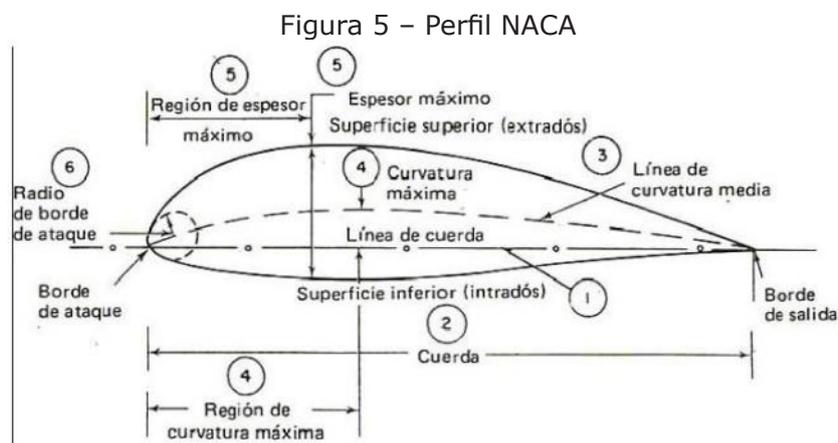
O sistema de numeração para esses aerofólios é definido por: NACA MPXX. Na qual, XX é a espessura máxima, x/c , em corda percentual, M é o valor máximo da linha média em centésimos de acorde, P é a posição do acorde da curvatura máxima em décimos do acorde como mostra a figura 5.

Um exemplo: NACA 2412

Onde:

Um aerofólio de 12% de espessura,

Um valor máximo da linha de curvatura de 0,02, em $x/c = 0,4$.



Fonte: <http://www.despegamos.es/perfiles-naca/>



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Procedimentos Metodológicos

De um modo geral, segundo Petrucci (2003), existem duas metodologias de projeto aerodinâmico, os métodos inversos e os métodos diretos. Os métodos inversos consistem, inicialmente, da especificação da distribuição requerida de pressões ou de velocidades. Através de um algoritmo inverso, que basicamente efetua a inversão de um modelo de análise de escoamento, a geometria que proporciona a distribuição especificada é recuperada. Já no método direto, a geometria é trabalhada diretamente, e as distribuições de pressões ou de velocidades são analisadas.

3.1.1 Etapas do *Software XFLR5*

O trabalho baseia-se em um estudo por meio de simulação computacional de método inverso, onde com auxílio de um software foi analisado o comportamento dos perfis em relação aos parâmetros aplicados, tais foram:

- Escolha dos perfis que foram analisados;
- Importar os dados dos perfis no *software XFLR5*;
- Montar o processo;
- Gerar gráficos e os interpretar.

Para isso, dividiu-se em três etapas para simular os perfis:

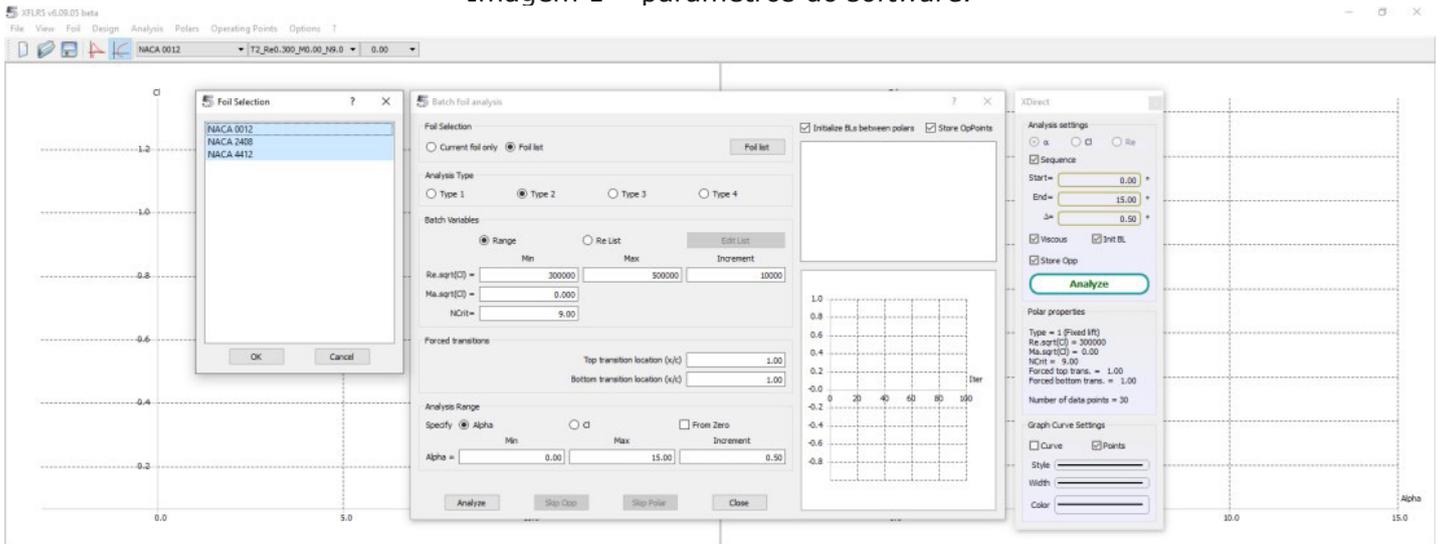
No primeiro, geramos as coordenadas por meio do comando do *software NACA Foils*. Em seguida, geramos os 3 NACA que iremos utilizar para gerar os gráficos e compara-los.

Para os parâmetros inseridos no *software* conforme a imagem 1:

- $3 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$; com incremento de 10.000
- Velocidade em Mach: 0
- Ncrit: 9 para média turbulência
- Ângulo de ataque: 0° a 15° ; com incremento de 0.5°
- Número máximo de interações: 100



Imagem 1 – parâmetros do software.



Fonte: Autor (2021)

3.2 Escolha Do Perfis

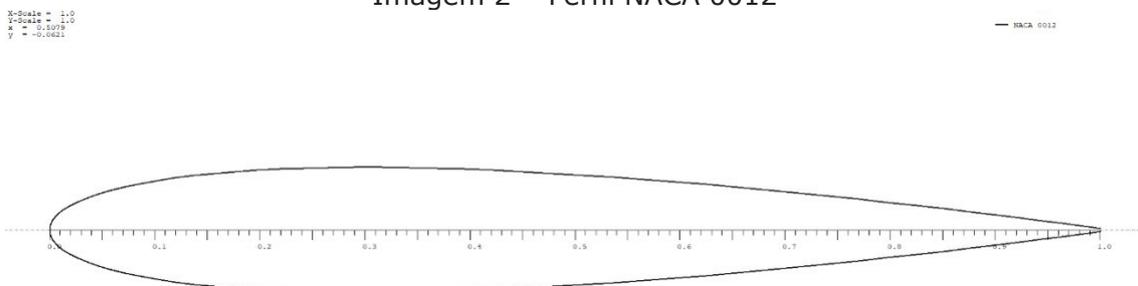
NACA 0012:

Um aerofólio de 12% de espessura,

Um valor máximo da linha de curvatura de 0,00, em $x / c = 0,0$. Points: 99

Conforme a imagem 2:

Imagem 2 - Perfil NACA 0012



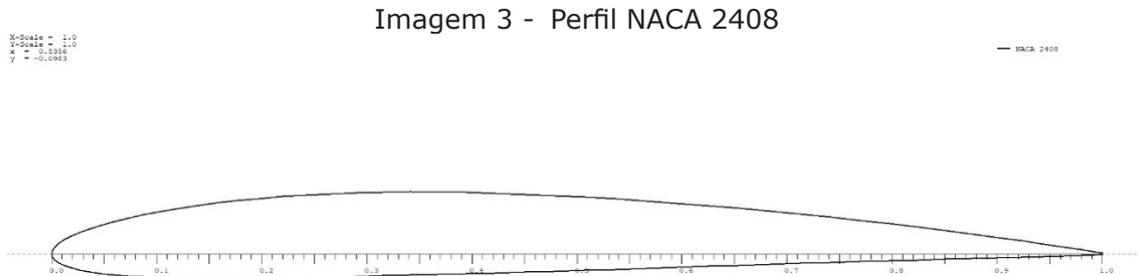
Fonte: Autor (2021)

NACA 2408

Um aerofólio de 08% de espessura;

Um valor máximo da linha de curvatura de 0,02, em $x / c = 0,4$. Points: 99

Conforme a imagem 3:



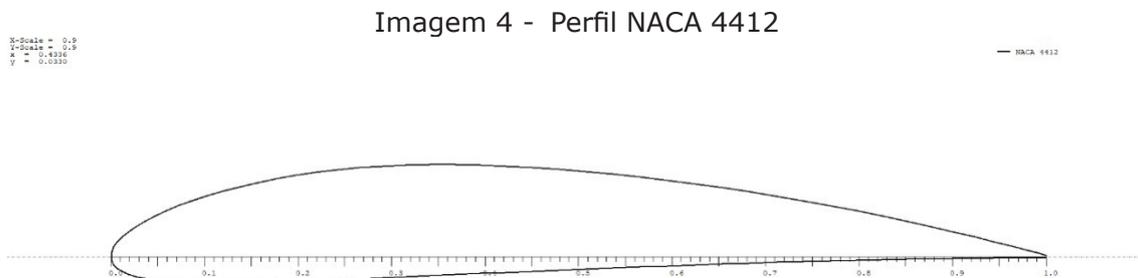
Fonte: Autor (2021)

NACA 4412

Um aerofólio de 12% de espessura;

Um valor máximo da linha de curvatura de 0,04, em $x / c = 0,4$. Points: 99

Conforme a imagem 4:



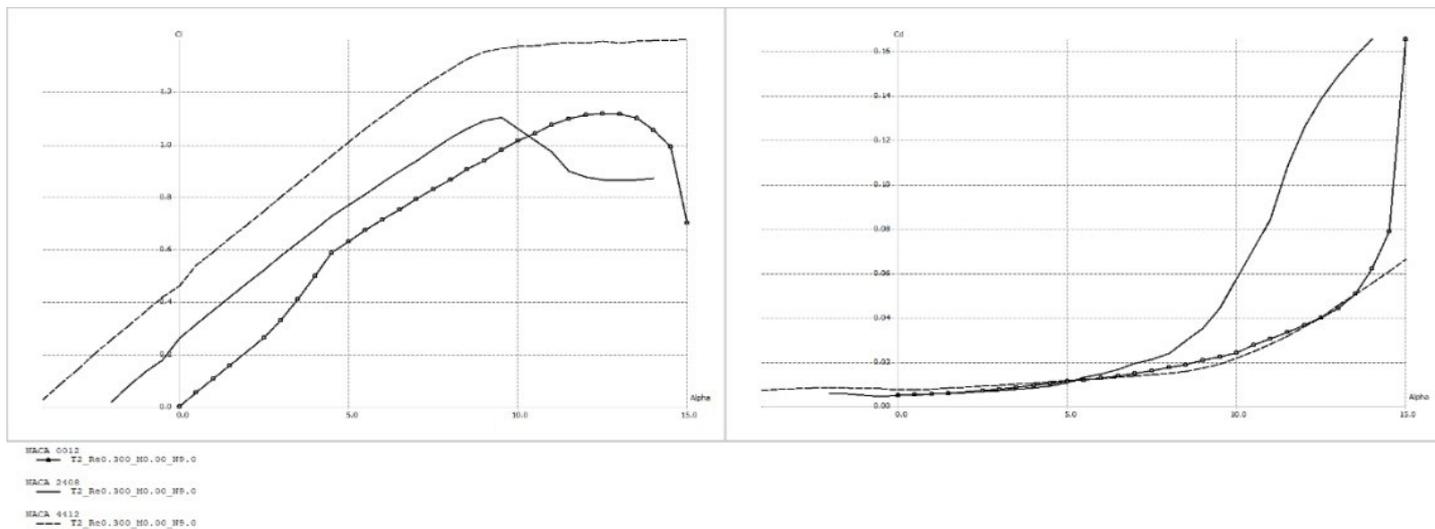
Fonte: Autor (2021)

3.3 Geração dos Gráficos

A partir das simulações no XFRL5, foram gerados os gráficos na qual foram analisadas e separadas pelo número de Re de 300k, 400k e 500k. Com isso, o estudo observou para cada coeficiente calculado o comportamento em cada de viscosidade.

3.3.1 Para Número de Reynolds de 300k

Imagem 5 - Coeficiente máximo de sustentação, arrasto e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA4412, NACA 2408 para 300k de Re



Os resultados, na imagem 5, dos coeficientes de sustentação x ângulo de ataque para o NACA 0012, apresentou uma estabilidade conforme o ângulo vai aumentando, observa-se que do ângulo 0° ao 10° , ele apresenta uma variação na sustentação de forma crescente, no entanto, a partir desse ângulo, a sustentação vai decaindo até o seu ângulo máximo. O seu melhor resultado para um coeficiente máximo com ângulo referente, respectivamente, foi de 1,117 e $12,5^\circ$.

O seu decaimento na sustentação, no entanto, é visível no gráfico C_d por α , onde mostra o coeficiente de arrasto, que pode-se dizer, um coeficiente de atrito, na qual é inversamente ao coeficiente de sustentação. Percebe-se que a partir do ângulo de 10° o coeficiente começa a aumentar conforme o ângulo aumenta, isso reflete diretamente na sustentação. Quanto maior for o arrasto pior será para os outros coeficientes e rendimentos do perfil.

Entretanto, a análise do NACA 2408, já se observa um comportamento diferente, por conta da sua geometria, na qual o seu valor máximo da linha de curvatura de 0,02, em $x/c = 0,4$. Com isso, do ângulo 0 ao 10, percebemos que a partir do ângulo 9° começa a ter um decaimento da sustentação, a sua força vai diminuindo conforme o aumento do ângulo, mesmo chegando próximo ao ângulo máximo consegue se estabilizar, mas com uma força menor. O seu melhor resultado para um coeficiente máximo com ângulo referente, respectivamente, foi de 1,110 e $9,5^\circ$.

Sendo assim, a sua força contrária, força de arrasto, no ângulo com maior coeficiente de sustentação, chega à 0,044 que por sua vez, também começa a ter um acréscimo muito alto, tendo uma variação de aproximadamente 0,10 entre os ângulos de 10° a 15° , uma variação muito maior do que toda a variação até o ângulo com o C_l máximo. Então, pode-se observar que os melhores rendimentos são em ângulos abaixo de 10° para um melhor e menos gasto de energia.

Podemos observar ainda, o NACA 4212 foi o que apresentou um melhor coeficiente

de sustentação, mostrou-se estabilidade contínua e crescente até o ângulo próximo de 10° e depois disso continuou com um acréscimo mais discreto e estável, pode-se afirmar que a razão de x/c igual à 20% e sua curvatura de 0,04, apresentou um melhorescoamento, onde as outras forças não influenciam diretamente, mesmo existindo, pois, a estrutura geométrica e em baixo número de Reynolds fez com que a estabilidade tivesse um melhor rendimento. O seu melhor resultado para um coeficiente máximo com ângulo referente, respectivamente, foi de 1,40 e 14°.

Por conseguinte, o NACA 4412, apresentando um coeficiente de arrasto razoavelmente baixo em relação aos ângulos máximos anteriores, ele pode chegar até 0,066 para o ângulo de 14°, isto implica a dizer que ele pode ser usado tanto com ângulos baixos ou altos, que a sua força de arrasto ainda pode ser melhor.

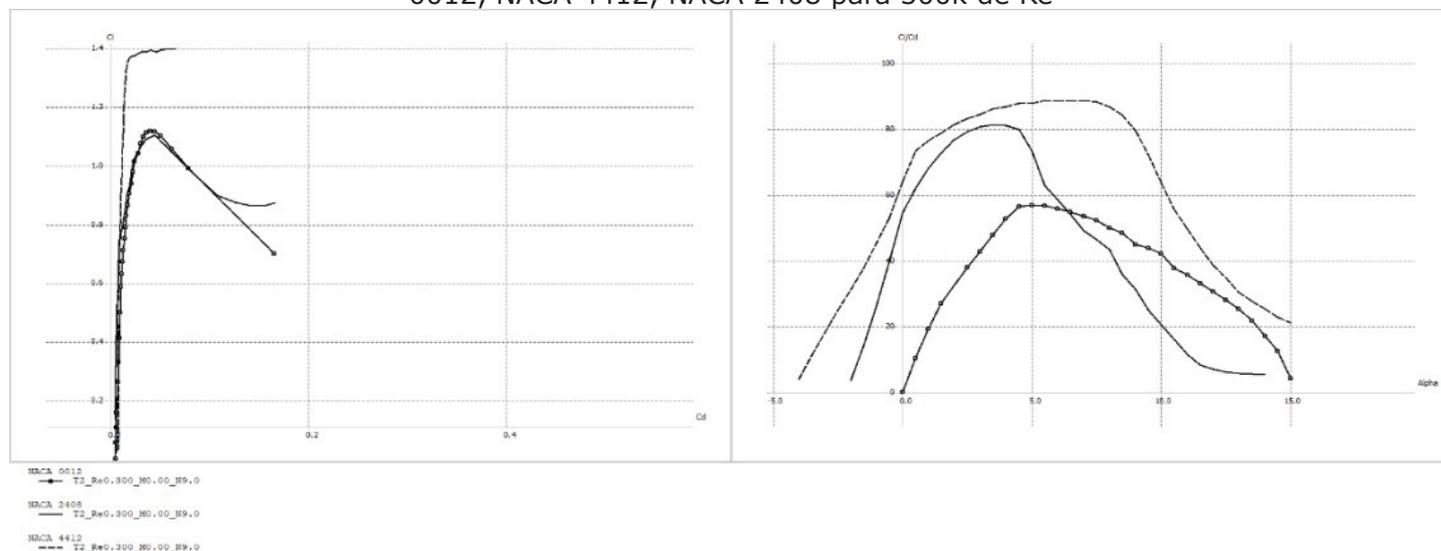
Tabela 1 - Coeficiente máximo de sustentação, arrasto e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408

	Cl máximo	Cd	Alpha
NACA 0012	1,117	0,040	12,5°
NACA 4412	1,40	0,066	14°
NACA 2408	1,110	0,044	9,5°

Fonte: autor (2021)

Na tabela 1, cabe ressaltar que a Asa NACA 4412 teve o maior resultado na força de sustentação, mesmo tendo um Cd um pouco elevado, o seu ângulo pode ser usado em um intervalo bem maior do que os outros mantendo sua sustentação estabilizada.

Imagem 6 – Eficiência máxima, coeficiente máximo de sustentação e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408 para 300k de Re



Fonte: Autor (2021)

Ao analisarmos, a imagem 6, o NACA 0012, seu coeficiente de sustentação por arrasto x o ângulo de ataque, vamos perceber que temos uma parábola não linear, onde Cl/Cd é a eficiência aerodinâmica. Sendo assim, percebe-se que temos uma variação positiva do ângulo 0° a 4,5°, tendo a eficiência máxima neste ângulo, logo em seguida, observa-se que a partir dele a uma variação enorme de aproximadamente 10°, sendo que a eficiência começa a decair. Por outro lado, a eficiência trabalhando em um ângulo estável de 4,5°, teremos ela com o resultado de 56,48.

Entretanto, ao colocarmos a eficiência em referência para os outros coeficientes, temos que a sustentação será de 56,48 e o seu arrasto será de 0,010. Com isso, podemos trabalhar com ângulos baixos para o NACA 0012, especialmente o ângulo de 4,5°.

Para o NACA 2408, temos uma eficiência com uma variação de ângulo um pouco maior, mas ao percebermos a declinação da parábola, vemos que é muito brusca até chegar ao ângulo de máximo. Entretanto, a sua eficiência desenvolve rápida e estável, sendo que chegando ao ângulo 3,5 terá sua maior eficiência 81,2. Vale ressaltar que sua eficiência para ângulos baixos é melhor, tendo o seu arrasto e sua sustentação para o ângulo referente, respectivamente, 0,625 e 0,008.

Não obstante, o NACA 4412 apresenta uma estabilidade na sua eficiência com uma variação de ângulo, aproximadamente, 10°. Ela, por sua vez, mesmo no ângulo de 10°, apresenta uma eficiência maior do que a NACA 0012 com sua eficiência máxima. Isso se deve a sua sustentação ser elevada, colocando-a em referência a ao ângulo de eficiência máxima 5,5° temos uma sustentação de 1,059 e arrasto de 0,012. A sua eficiência máxima é 88,642.

Tabela 2 – Eficiência máxima, coeficiente máximo de sustentação e ângulo de ataque do perfil NACA0012, NACA 4412, NACA 2408

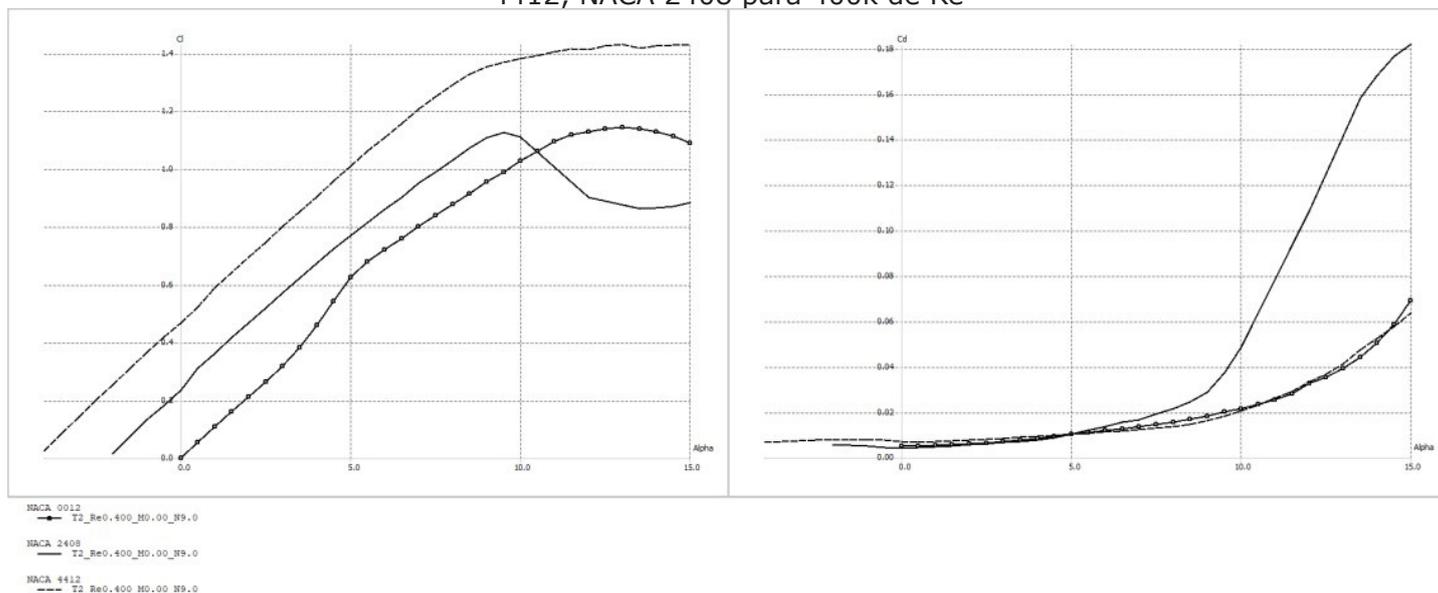
	Cl/Cd máximo	Cl máximo	Alpha
NACA 0012	56,48	0,587	4,5°
NACA 4412	88,642	1,059	5,5°
NACA 2408	81,2	0,625	3,5°

Fonte: Autor (2021)

Na tabela 2, observamos que o NACA 4412 apresenta uma eficiência maior em relação ao NACA 0012 e NACA 2408, além da eficiência e o maior ângulo, podendo assim trabalhar com ângulos de abaixo de 5,5°. Essa eficiência mostra a qualidade do desempenho e o melhor ângulo de voo.

3.3.2 Para Número de Reynolds de 400k

Imagem 7 - Coeficiente máximo de sustentação, arrasto e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408 para 400k de Re



Fonte: Autor (2021)

Em Reynolds de 400k, o NACA 0012, tem um comportamento similar ao de 300k, no entanto, enquanto havia uma queda brusca na sustentação conforme fossem chegando aos ângulos final, 14° e 15°, a viscosidade um pouco mais elevada, observa-se que não existe uma "queda" tão brusca, pelo contrário, criou-se uma pequena parábola, fazendo com que sua sustentação mantivesse ainda em alto. Portanto, dos ângulos 0° a 13° estão estáveis e crescente, sendo assim, possível utiliza-los.

Com isso, o coeficiente de sustentação máximo é de 1,147 e com o seu arrasto de 0,039 e ângulo máximo de 13° como mostra a imagem 7. Dado o exposto, não implica dizer que para este ângulo o seu arrasto seja máximo, pois analisando o coeficiente de Cd, vamos observar uma crescente curvatura positiva a partir do ângulo de 10° tendo como uma variação de arrasto até de, aproximadamente, 0,05.

Entretanto, o NACA 2408 apresenta uma estabilidade até o ângulo 9,5 que por sua vez é o ângulo de maior coeficiente de sustentação com 1,126. Do ângulo 10° ao 15° apresenta uma queda na sustentação, consequentemente o seu coeficiente de arrasto cresce 0,14 em apenas nesse intervalo de ângulos. Isso se deve a estrutura do perfil da asa, pois, com a viscosidade aumentando em 100k a sua estrutura vai sendo mais afetada. Conquanto, o NACA 4412 vem se apresentando bem aos resultados, pois a performance do coeficiente de sustentação continua estável em praticamente toda a variação do ângulo. Observa-se que há pequenas ondulações a partir do ângulo de 10°, pois seu arrasto começa a crescer com uma variação maior. Sendo assim, a sustentação máxima é de 1,43 com o ângulo de 15°, portanto, pode-se usar ângulos altos e baixos.

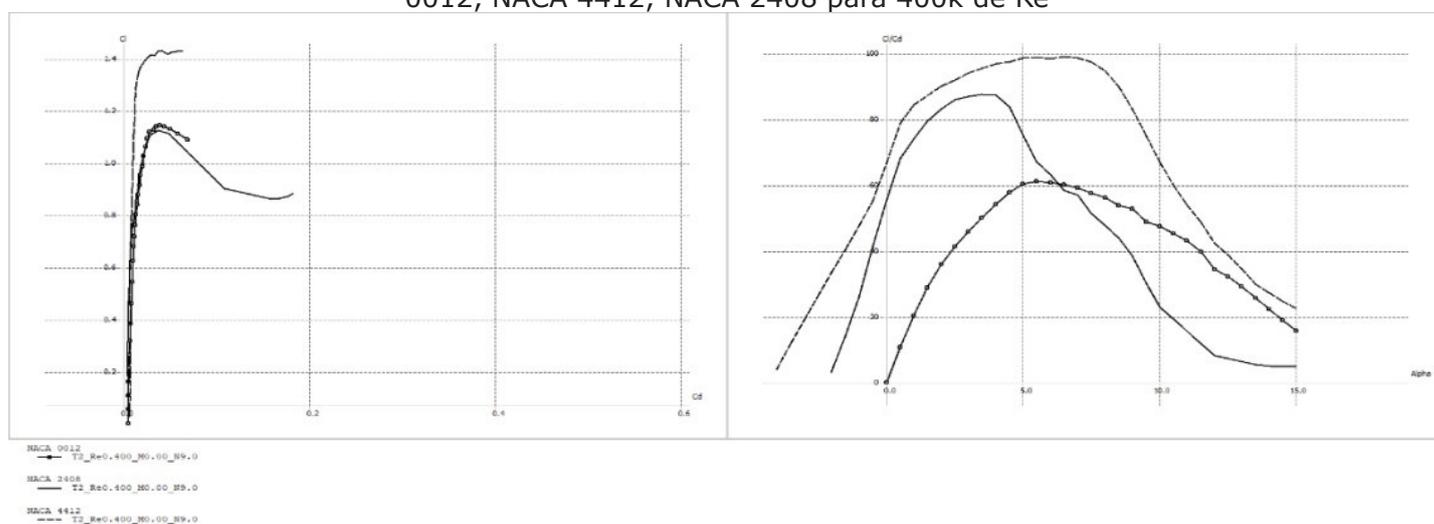
Tabela 3 - Coeficiente máximo de sustentação, arrasto e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408

	Cl máximo	Cd	Alpha
NACA 0012	1,147	0,039	13°
NACA 4412	1,43	0,0635	15°
NACA 2408	1,126	0,0375	9,5°

Fonte: Autor (2021)

A tabela 3, mostra a sustentação máxima na qual, o NACA 4412 apresenta o melhor resultado para os parâmetros, ele por sua vez, tem o maior coeficiente de arrasto e o maior ângulo de uso. Portanto, destaca-se para voos com mais estabilidades e sem muitas manobras complexas.

Imagem 8 - Eficiência máxima, coeficiente máximo de sustentação e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408 para 400k de Re



Fonte: Autor (2021)

Na imagem 8 mostra a eficiência dos NACA, observa-se que o NACA 0012 a partir do ângulo de 0° a ao seu ângulo com sua maior eficiência, é crescente com uma estabilidade razoável. A sua melhor eficiência é de 61,22 para o ângulo de 5,5° com isso, a variação da eficiência até o seu ângulo máximo é uma curva decrescente, fazendo com que ela perca, de forma não brusca, a sua eficiência até o ângulo de 15°. Com isso, o seu arrasto e sua sustentação para o ângulo referente de melhor eficiência são, respectivamente, 0,011 e 0,679.

Vale ressaltar que, com a mudança da viscosidade, o arrasto para ângulos pequenos se permaneceu mais estável e sua sustentação houve um acréscimo discreto, no entanto, sua eficiência ainda terá que ser usada somente para ângulos de ataque baixo de 5,5° para um melhor aproveitamento.

Já no NACA 2408, apresentou-se uma eficiência muito rápida e crescente para os ângulos baixo, isso, no entanto, é ruim pois observa-se que, a variação do ângulo com maior eficiência até o seu ângulo máximo, cai bruscamente, pois não tem uma continuidade e devido a variação de aproximadamente 10°. Então sua melhor eficiência é de 87,6 com o ângulo de 3,5° a partir desse ângulo a sua eficácia cai.

Disto isso, a escolha desse perfil, restringe-se à ângulos pequenos para melhor de-

envolvimento do voo, além de, seu arrasto para o ângulo referente seja de 0,007 e a sua sustentação permanecer igual à da viscosidade de 300k, pode-se afirmar que seu comportamento é praticamente igual.

O NACA 4412, conforme o gráfico, apresenta uma curva muito estabilizada até o seu ângulo de 6,5° que por sua vez é onde se encontra a sua melhor eficiência de 98,963. Portanto, seu comportamento em uma viscosidade maior é de acréscimos, embora tendo uma curva com uma tangente não muito grande, a variação de ângulo do decaimento da eficiência ainda se permanece menor.

Sendo assim, o NACA 4412 pode ser usado para ângulos baixos e médios, mantendo sua eficiência. Com seu ângulo de 6,5° podemos analisar que o seu arrasto e sua sustentação, são respectivamente, 0,012 e 1,158.

Tabela 4 – Eficiência máxima, coeficiente máximo de sustentação e ângulo de ataque do perfil NACA0012, NACA 4412, NACA 2408

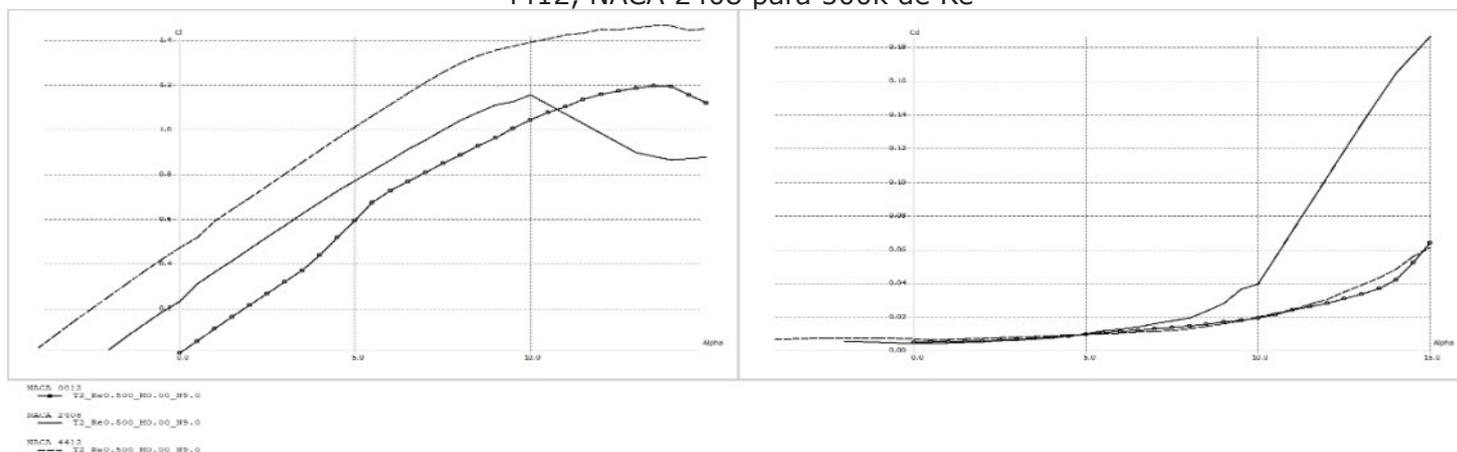
	Cl/Cd máximo	Cl máximo	Alpha
NACA 0012	61,22	0,679	5,5°
NACA 4412	98,963	1,158	6,5°
NACA 2408	87,60	0,624	3,5°

Fonte: Autor (2021)

Na tabela 4 a cima, vemos que o NACA 4412 tem os melhores números, tanto para a eficiência, a sustentação e seu ângulo máximo de ataque. Tendo em vista que o NACA 2408 apresenta menor coeficiente de sustentação em referência ao NACA 0012, não podemos desconsiderar que sua eficiência é maior mesmo com ângulo baixo.

3.3.3 Para Número de Reynolds de 500k

Imagem 9 - Coeficiente máximo de sustentação, arrasto e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408 para 500k de Re



Fonte: Autor (2021)

A imagem 9, mostra que o NACA 0012 tem um coeficiente de sustentação semelhante aos de viscosidade de 300k e 400k, observa-se que o comportamento é crescente e com estabilidade, sem muitas ondulações e sem picos de subida e descida.

Portanto, o perfil analisado apresenta um melhor coeficiente de sustentação com 1,195 com um arrasto menor de 0,036 e com um ângulo de 13,5° comparando com as viscosidades anteriores.

Com isso, percebemos que com o acréscimo da viscosidade, a sua sustentação fica maior, o seu arrasto diminui com a variação do ângulo de ataque e seu ângulo tem um incremento de 0,5 para cada 100k a mais de número de Reynolds.

Para o NACA 2408, observa-se que no ângulo de 10° a 15° há uma queda de sustentação, mostrando que o coeficiente de arrasto está elevado, chegando a ter mais de 0,18 e isso afeta diretamente na sua eficiência mais à frente. Analisando os coeficientes, no entanto, vemos que o Cl máximo e o ângulo referido são, 1,153 e 0,039 com isso, ao comparamos com o número de Reynolds de 300k, vemos que os arrastos para cada viscosidade se mantem quase a mesma.

Já no NACA 4412, percebemos um incremento de 0,03 a cada 100k de acréscimo na viscosidade, chegando o seu coeficiente de sustentação máximo de 1,46 e seu arrasto de 0,048 para o ângulo de 15°. O seu arrasto com a maior viscosidade é a menor comparada as anteriores, conseqüentemente, sua eficiência será mais elevada e com mais estabilidade.

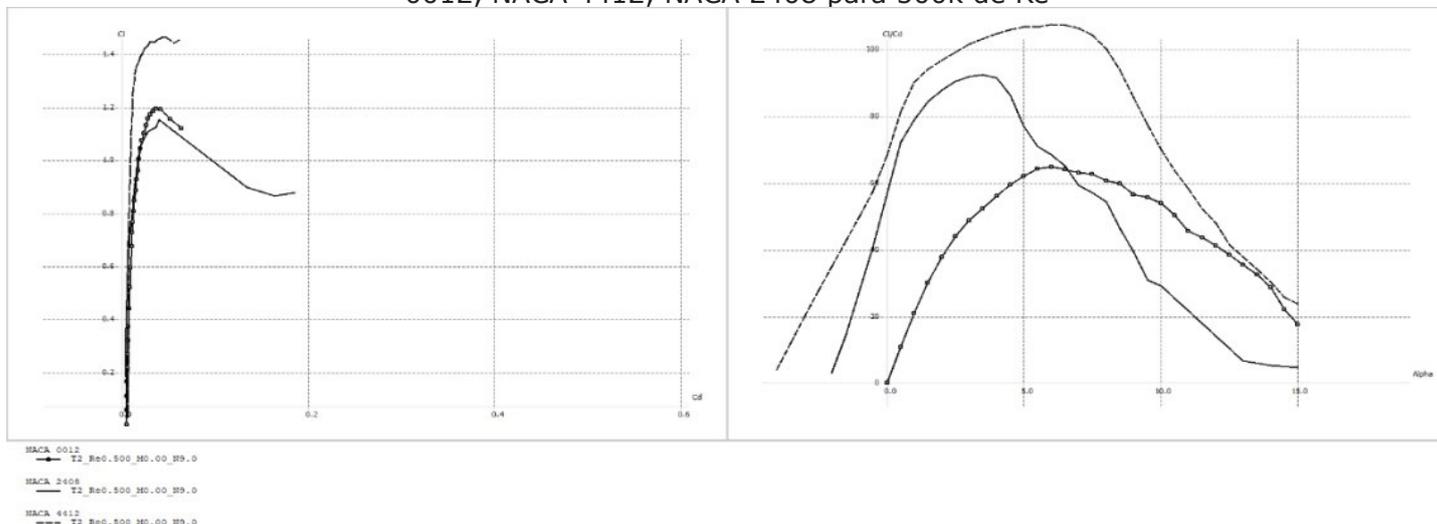
Tabela 5 - Coeficiente máximo de sustentação, arrasto e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408

	Cl máximo	Cd	Alpha
NACA 0012	1,147	0,039	13°
NACA 4412	1,43	0,0635	15°
NACA 2408	1,126	0,0375	9,5°

Fonte: Autor (2021)

Na tabela 5, vemos que o NACA 4412 possui um maior coeficiente de sustentação e o maior ângulo de ataque, sendo assim, dar a melhor opção para o uso de ângulos, tanto altos quanto baixo. O NACA 24012 e NACA 0012 possuem praticamente os mesmos coeficientes, devido a sua geometria e linha de curvatura, vemos discretamente a diferença.

Imagem 10 - Eficiência máxima, coeficiente máximo de sustentação e ângulo de ataque do perfil NACA 0012, NACA 4412, NACA 2408 para 500k de Re



Fonte: Autor (2021)

A eficiência apresentada na imagem 10, demonstra a consequência das análises anteriores. O NACA 0012 por sua vez, teve uma sustentação melhor e com o arrasto menor, por isso a sua eficiência conforme a variação dos ângulos foi melhor também em comparação as viscosidades de 300k e 400k, chegando a ter 64,656 de eficiência máxima. No entanto, ao observamos o ângulo referente, vemos que a partir de 6,0° começa a diminuir a sua eficiência até seu ângulo máximo.

Por conseguinte, usando seu ângulo de 6,0° vemos que a sua força de sustentação e de arrasto são, respectivamente, 0,726 e 0,011, portanto o número de Cd se permanece constante em relação as suas viscosidades anteriores e seu Cl apresenta um aumento, implicando afirmação de que, quanto maior está sendo a viscosidade no perfil, mais sua sustentação vai aumentando para ângulos baixos.

O NACA 2408, no entanto, mais uma vez apresenta uma elevação rápida e grande na sua eficiência, mas sem conseguir manter uma constância, pois, observa-se que começa a decrescer rapidamente, em menos de 5° já caiu pela metade a eficiência. Para utilizar um melhor resultado, pegamos a referência da eficiência mais alta, sendo de 92,29 e seu ângulo é de 3,5.

Podemos analisar ainda seus coeficientes de sustentação e de arrasto, pois, seu ângulo de ataque para a sua eficiência máxima é igual aos outros ângulos com a viscosidade de 300k e 400k, percebe-se que se manteve constante o ângulo. Os resultados obtidos foram, Cl igual a 0,624 e seu Cd igual a 0,007, portanto, permaneceram também constantes.

O NACA 4412, teve uma eficiência muito boa, continuou crescente até seu ângulo de 6,0°, meio grau abaixo da viscosidade de 400k, no entanto, a sua eficiência máxima, que representa também sua qualidade de voo, é mais elevada, chegando a 107,367. Vale ressaltar que a viscosidade maior, seu coeficiente de sustentação decaiu e seu arrasto também com referência a máxima eficiência, respectivamente, são eles: 1,112 e 0,010.

Tabela 6 – Eficiência máxima, coeficiente máximo de sustentação e ângulo de ataque do perfil NACA0012, NACA 4412, NACA 2408

	Cl/Cd máximo	Cl máximo	Alpha
NACA 0012	64,656	0,726	6,0°
NACA 4412	107,367	1,112	6,0°
NACA 2408	92,29	0,624	3,5°

Fonte: Autor (2021)

Na tabela 6, percebemos que o NACA 0012 teve um menor desempenho na eficiência máxima e que o NACA 4412 teve a maior eficiência, portanto, a escolha para uma asa com uma estabilidade maior e com o uso de uma variação de ângulos maior, ele se destaca mais por seus valores, pois terá uma sustentação com estabilidade e com um gasto de energia menor.

4. CONCLUSÃO

Dado o exposto, fica evidente que os melhores coeficientes e eficiência aerodinâmica para cada viscosidade de 300k, 400k e 500k dar-se ao NACA 4412, na qual a sua geometria tem 12% de espessura e valor máximo da linha de curvatura de 0,04, em $x/c = 0,4$. Consequentemente os melhores resultados para número de Reynolds de 300k foram, para coeficiente de sustentação, arrasto e eficiência aerodinâmica, respectivamente, 1,4; 0,066; 88,64. Para Reynolds 400k, 1,43; 0,635; 98,963. Para Reynolds 500k, 1,46; 0,48; 107,367.

Baseado nesses dados, pode-se desenvolver outros projetos para análise e modelagem 3D, fazer uma escolha de Asa para competições cujo objetivo é aviões de alta sustentação e eficiência com intervalo de Re de 300k a 500k.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON JR., J. D. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica**. [S.l.]: AMGHEditora, 2015.
- ANDERSON, John. **Fundamentals of Aerodynamics**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2001.
- DENKER, J. S. *See How It Flies: Perceptions, Procedures And Principles Of Flight*. McGraw-Hill Companies, 1995.
- EBERHARDT, Scott; ANDERSON, David. **Física na Escola**. Vol. 7 nº2, 2006.p. 36-42.
- FREITAS, et al. **Aerodinâmica básica**. In: **SEMINÁRIO AEROESPACIAL**, 2., 2015. Lisboa. Anais[...]. Lisboa: Técnico Lisboa, 2015. p.1-18.
- FOX, R. W., McDONALD, A. T. (2001), **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 4 ed., LCT, Rio de Janeiro, 504 p.
- GONÇALVES, Luiz Fernando. **“PROJETO ESTRUTURAL DE UM AEROMODELO NOS REQUISITOS DA COMPETIÇÃO SAE BRASIL AERODESIGN – CLASSE REGULAR – (TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO) UFTP, Pato Branco, 2016.**
- NUSSENZVEIG, H. Moysés (1996). **Curso de Física Básica** 3a ed. São Paulo: Edgard Blucher. p. 26. ISBN 83-1791
- PETRUCCI, D. R. (2003), **Métodos Inversos para o Projeto Aerodinâmico de Grades de Turbomáquinas Axiais**, Tese de Doutorado em Engenharia, Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 102p.
- RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica – Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign Volume Único 1**. ed rev. – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2014.
- RODRIGUES, José Carlos – **AEROMODELISMO TEÓRICO E PRÁTICO, VERSÃO DIGITAL COMEMORATIVA DOS 40 ANOS DE EDIÇÃO** - C.A.L. – 2004
- VICENTE, Antônio. **“Noções de aerodinâmica e teoria do voo”**. Asasdeferro Suplemento, 2015. Disponível em: <<http://asasdeferrosuplementos.blogspot.com/2015/09/nocoos-de-aerodinamica-de-voo.html>>. Acesso em: 15 de mar. de 2021.
- YOUNG, Hugh D. (2004). **Física II**. São Paulo: Pearson. pp. 82–85
- ZHANG L., Yang K, Xu JZ, et al. **Influência aerodinâmica de diferentes métodos de alteração de borda de fuga para o aerofólio sem corte de borda de fuga (em chinês)**. J Eng Thermophys, 2019



PILCHER, C. V. (2011). **Preliminary Sailplane Design Using MDO And Multi- Fidelity Analysis**. Toronto, Ontário (Canada): Aerospace Engineering - Ryerson University.

ABBOTT, I.H., and von Doenhoff, A.E., **Theory of Wing Sections**, Dover, 1959 <https://blogdaengenharia.com/equacao-de-bernoulli/> [acesso em: 09 de junho de 2021.]



CAPÍTULO 4

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO PARA A CONFECÇÃO DE UMA LÂMINA UTILIZANDO AUSTÊMPERA SELETIVA EM AÇO SAE 5160 PARA SOBREVIVÊNCIA NA SELVA

MANUFACTURING PROCESSES FOR MAKING A BLADE USING SAE 5160
STEEL SELECTIVE AUSTEMPER FOR SURVIVAL IN THE JUNGLE

Mateus Batista De Sousa¹

Hilton Seheris Da Silva Santos²

1 Aluno Concludente do Curso de Engenharia Mecânica – mateusbatista1000@gmail.com

2 Orientador – Mestre – hiltonseheres@hotmail.com

Resumo

Este artigo aborda de uma forma explicativa os processos de fabricação para a confecção de uma lâmina com o aço SAE 5160. Inicialmente, descreve a escassez de material científico sobre forjamento de lâminas; é dada uma introdução sobre a necessidade de lâmina mais resistente e aptas para a sobrevivência na selva. Na sequência são apresentados e explicados, os processos de fabricação que serão utilizados na fabricação e suas finalidades. Em seguida é apresentado de forma explicativa, todas as etapas para confecção de uma lâmina, a escolha do modelo, o material, o processo de forjamento, os tratamentos térmicos usados, a escolha do material do cabo e sua aplicação, a afiação do gume da lâmina e os testes finais. Com a ajuda de um profissional experiente, foi obtido os objetivos de analisar e explicar de uma forma simples os métodos e etapas para a fabricação de uma lâmina.

Palavras-chave: Forjamento. Cutelaria. Aço SAE 5160. Austêmpera. Tempera Seletiva.

Abstract

This article discusses, in an explanatory way, the manufacturing processes of a blade with SAE 5160 steel. Initially, it describes the scarcity of scientific material on blade forging; an introduction is made to the need for a more resistant blade that is able to survive in the wild. Next, the manufacturing processes that will be used in manufacturing and their purposes are presented and explained. Below, all the steps of making a blade are presented in an explanatory way, from the choice of the model, the material, the forging process, the heat treatments used, the choice of the material of the handle and its application, the sharpening of the edge of the blade and the final tests. With the help of an experienced professional, the objectives of analyzing and explaining in a simple way the methods and steps for manufacturing a blade were achieved.

Key-Words: Forging. Cutlery. SAE 5160 steel. Austempering. Selective Seasoning.



1. INTRODUÇÃO

A proposta deste trabalho é demonstrar os processos utilizados na fabricação de uma lâmina, utilizando tratamentos térmicos para alterar suas propriedades mecânicas e estruturais, utilizando o método de forjamento para modelar a lâmina, que terá como finalidade o uso intensivo em técnicas para sobrevivência, tendo que ser resistente, rígida e resiliente.

Entretanto, há uma escassez relevante de materiais científicos sobre o forjamento de lâminas, que se trata de uma prática chamada de cutelaria. A arte da cutelaria é pouco conhecida entre a grande maioria das pessoas, porém atualmente há cursos de graduação para couteiros em algumas universidades e alguns cursos técnicos de couteiros para iniciantes. Mas quais são os métodos necessários para a confecção de lâminas?

Diante de disso, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar e explicar o processo de construção de uma lâmina com aço SAE 5160 com austêmpera seletiva para sobrevivência na selva. E possui como objetivos específicos elucidar as propriedades físicas e mecânicas do material final por meio de técnicas de sobrevivência na selva, elencar vantagens e desvantagens no uso e composição, das técnicas de tratamentos térmicos para a modificação das propriedades físicas e mecânicas do material, e explicar o procedimento de forjamento e laminação do aço carbono SAE 5160.

No mundo onde as lâminas são produzidas em massa por indústrias, utilizando materiais com baixo custo e com um desempenho duvidoso, há uma necessidade especial para certas atividades que uma simples lâmina produzida em massa não resiste, como por exemplo, a utilização para sobrevivência na selva.

Uma lâmina é essencial para várias atividades e técnicas, como por exemplo, primeiros socorros, caça/pesca, construção de abrigos, obtenção de alimentos, fogo, água e sinalização.

Para a obtenção de alguns aspectos mecânicos e estruturais no aço a fim de que possa ter um bom desempenho na atuação das atividades desejadas, é necessário que o aço tenha um tratamento térmico bem feito, que possa torna-lo resistente, rígido e resiliente.

Contudo, uma lâmina para tal finalidade, deve possuir um tratamento térmico diferente e pensado, para que não ocorra uma falha no material, devido à falta de compatibilidade das propriedades do material final com o seu uso, resultando em danos no próprio.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Forjamento

Um dos processos de fabricação utilizado para a confecção de uma lâmina é chamado de forjamento, que se trata de uma conformação mecânica utilizando prensagens ou martelamentos a quente, ou seja, a temperaturas acima das de recristalização do metal, na faixa de 800° - 1.000°C para aços-carbono (CHIAVERINI, 1986).

A Cutelaria é o nome dado à fabricação de instrumentos de corte através do processamento do aço (HOFFMANN, 2003).

Em comparação a outros processos que há como base o trabalho a quente, o forjamento produz uma estrutura de grão refinado que resulta em um aumento significativo de resistência e ductilidade ao material forjado (SHIGLEY, 2005).

2.2 Material

O material escolhido para a lâmina é o Aço SAE (*Society of Automotive Engineers*) 5160 muito utilizado em molas na indústria automotiva e outros elementos mecânicos sujeitas a variações de tensões e flexões, com a composição química demonstrada na tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Tipos de aços para molas helicoidais enroladas a quente

Tipo de Aço	Composição Química (%)					
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
1070 SAE	0,65-0,75	0,60-0,90	0,15-0,20	—	—	—
1080 SAE	0,75-0,88	0,60-0,90	0,20-0,35	—	—	—
1095 SAE	0,90-1,03	0,30-0,50	0,15-0,30	—	—	—
4160 (mod.)	0,55-0,65	0,70-1,00	—	0,60-0,90	—	0,25-0,35
5150 H	0,47-0,54	0,60-1,00	0,20-0,35	0,60-1,00	—	—
5160 H	0,55-0,65	0,65-1,10	0,20-0,35	0,60-1,00	—	—
51B60 H	0,55-0,65	0,65-1,10	0,20-0,35	0,60-1,00	—	B-0005% min.
6150 H	0,47-0,54	0,60-1,00	0,20-0,35	0,75-1,20	0,15 min.	—
8660 H	0,55-0,65	0,70-1,05	0,20-0,35	0,35-0,75	0,35-0,55 Ni	0,15-0,25
9260 H	0,55-0,65	0,65-1,10	1,70-2,20	—	—	—
9850 H	0,47-0,57	0,60-0,95	0,20-0,35	0,80-1,20	0,65-0,95 Ni	0,20-0,30

Fonte: Aços e Ferros Fundidos (CHIAVERINI, 1977, p. 266)

Diante da sua composição química e de seus atributos físicos, o aço SAE 5160 foi escolhido por possuir alta temperabilidade, boa ductilidade e sua resistência (CHIAVERINI, 1996). No entanto será utilizado o aço de forma reciclável, oriundo de uma parte de um feixe de mola de caminhão facilmente encontrado em ferro velho ou sucatas.

2.3 Equipamentos

Algumas ferramentas são essenciais para o processo de forjamento de uma lâmina, dentre as principais ferramentas utilizadas temos:

2.3.1 Forja

Equipamento de suma importância para a cutelaria, responsável pelo aquecimento do aço a temperaturas elevadas, facilitando o trabalho com o mesmo, demonstrada na figura 1 a seguir.

Figura 1: Forja a carvão



Fonte: Imagem fotografada pelo autor

As forjas podem ser compradas em lojas ou até mesmo feitas a mão, e podem ter como combustível gás ou carvão (BATATA, 2015).

2.3.2 Bigorna

Se trata de um bloco maciço de metal (frequentemente, com dois furos na parte superior), um chifre (ou ponta) e um calcanhar, usado para reduzir o esforço feito por parte do ferreiro no forjamento do objeto metálico, pois ela devolve parte da energia dos martelamentos por ser mais resistente que o material trabalhado, demonstrada na

figura 2 a seguir. Às vezes são usados partes de trilho de trem no lugar de uma bigorna convencional.

Figura 2: Bigorna de Aço



Fonte: iStock by Getty Images

Além desses equipamentos temos martelos ou marretas para a conformação do aço em altas temperaturas, tenazes para o manuseio do aço em temperaturas elevadas, lixadeiras e lixas para o desbaste e acabamento, limas para a verificação da dureza e para desbaste, esmerilhadeira para auxiliar no desbaste ou em cortes, morsa para firmar a peça durante o trabalho, régua e paquímetro para o cumprimento das medidas desejadas (HOFFMANN, 2003).

2.4 Segurança

O manuseio de metal em altas temperaturas requer cuidados especiais para com a saúde do cuteleiro e as possibilidades de acidentes durante o trabalho. Para tanto é necessário o uso de alguns equipamentos de proteção individual (*EPI's*), que de acordo com a norma regulamentadora 6 (NR-6), se trata de todo e qualquer dispositivo ou item, de uso individual utilizado pelo trabalhador, para a sua proteção contra acidentes que possam ameaçar a integridade física.

Entre os *EPI's* mais utilizados na cutelaria, temos as luvas com materiais isolantes termicamente, aventais de raspas de couro, mascaras com filtro de ar, óculos de proteção, protetores de face, abafadores de ruídos e sapatos de couro (HOFFMANN, 2003).

2.5 Tratamentos Térmicos

Um dos processos extremamente importantes para a fabricação de uma lâmina são os tratamentos térmicos, que se trata de aquecimentos ou resfriamentos controlados, visando modificar propriedades físicas e mecânicas do material, sem alterar sua forma (TSCHIPTSCHIN, 2016).

2.6 Normalização

O tratamento térmico de normalização se trata do aquecimento do aço até 60°C acima do limite superior da zona crítica, sempre garantindo austenitização total do material. Em seguida é retirado do forno e deixado resfriar naturalmente (TSCHIPTSCHIN, 2016), com isso há a perda de tensões presentes em sua estrutura, deixando o aço em boas condições para um novo trabalho e facilitando a reciclagem do aço.

2.7 Têmpera

Segundo Chiaverini (1986) a têmpera dentre os tratamentos térmicos, é o mais importante para os aços. A têmpera consiste em um aquecimento a uma temperatura acima de sua temperatura crítica e em seguida, um resfriamento brusco em água, óleo ou em meios de tempera de composição especial, onde a temperatura e a velocidade de seu resfriamento são baseadas de acordo com o material utilizado (TSCHIPTSCHIN, 2016). Esse processo aumenta muito a dureza do aço, porém a lâmina fica muito quebradiça, sendo necessária a aplicação de outro tratamento, o revenimento.

2.8 Revenimento

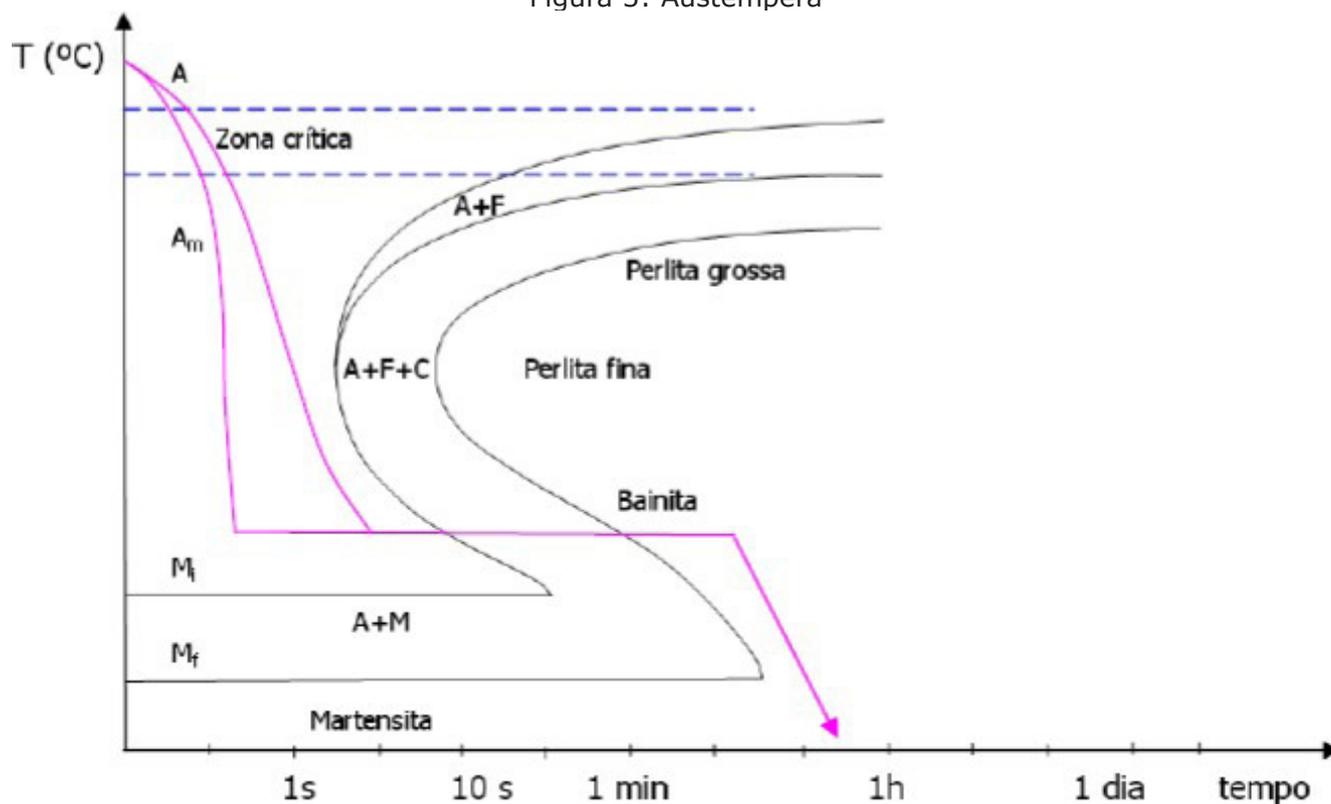
O processo consiste em um aquecimento gradativo do material a uma temperatura bem abaixo da temperatura de têmpera, mantendo-a por no mínimo uma hora, logo após resfriando a peça naturalmente até atingir temperatura ambiente. A temperatura requerida no revenimento varia entre 150 e 350°C dependendo da dureza requerida na lâmina. É recomendado o uso do processo de revenimento para todos os tipos de aço, pois aumenta a elasticidade após a têmpera, além disso, é através do revenimento, que é definida a dureza final do aço. (MENOSSO, 2018).

2.9 Austêmpera

Dar a têmpera e revenindo é o método usual para a obtenção de uma boa dureza no aço. A austêmpera é uma variação da técnica de têmpera e se trata do aquecimento do aço a uma temperatura acima da sua zona crítica, e em seguida, de um resfriamento rápido em um meio mantido a uma temperatura constante, demonstrado na figura 3 a seguir.



Figura 3: Austêmpera



Fonte: Tratamentos térmicos em aços (TSCHIPTSCHIN, 2016)

Sendo assim, para formação de bainita é preciso manter uma temperatura constante (aproximadamente 250° a 400° C) durante o tempo necessário para produzir a transformação não necessitando ser revenido em sequência (SOUZA, 2016). A bainita é uma estrutura que tem dureza semelhante à da martensita revenida, porém, com maior tenacidade e resistência a fadiga (CHIAVERINI, 1954).

O metal, ao se solidificar, seus átomos que estavam em movimento devido à alta temperatura, se cristalizam formando os denominados grãos, que por sua vez é um amontoado de cristais que se dispuseram em um lugar fixo e formando figuras geométricas. As propriedades mecânicas dos metais são adquiridas de acordo com o tamanho do grão (CHIAVERINI, 1986).

A austêmpera dos aços fornece uma série de vantagens em potencial como por exemplo o aumento da ductilidade, tenacidade e resistência que se podem conseguir com uma determinada dureza e a diminuição das distorções e, como resultado, redução do tempo de uma usinagem subsequente, do desperdício de material, da necessidade de inspeção ou demais análises (SOUZA, 2016).

2.10 Têmpera Seletiva

A têmpera tem como objetivo aumentar a dureza da peça, assim como reduzir sua tenacidade e evitando o aparecimento de tensões internas no aço. O processo de têmpera pode ser realizado em toda a área da lâmina ou apenas em uma parte dela. A têmpera integral é quando a peça inteira é temperada uniformemente, garantindo a mesma dureza

em toda a extensão do material.

Já na têmpera seletiva, consiste em temperar a peça em apenas uma determinada área da peça, geralmente o fio da lâmina, como forma deixá-lo mais duro que o resto da lâmina, o que eleva seu poder de corte, mas mantendo a flexibilidade do aço, para equilibrar este conjunto (CHIAVERINI, 1977).

2.11 Usinagem por Abrasão

Após processos como o forjamento, a peça pode apresentar algumas saliências ou reentrâncias. O processo de usinagem possibilita dar um acabamento das superfícies, obtenção de algumas peculiaridades e no caso de lâmina obter a afiação desejada.

A usinagem por abrasão tem como objetivo dar um acabamento as superfícies metálicas usinadas e dar o aspecto superficial e as dimensões definitivas, que não podem ser obtidas normalmente pelos processos usuais de usinagem (CHIAVERINI, 1986).

2.12 Sobrevivência na Selva

A selva um ambiente isolado e selvagem onde há um clima imprevisível variando entre fortes chuvas ou sol escaldante, e uma vegetação densa que dificulta a mobilidade e orientação. Com seu clima quente durante o dia e frio durante a noite, animais selvagens e peçonhentos, plantas tóxicas, alimento e água escassos, uma pessoa perdida sem um treinamento ou algum tipo de orientação, pode correr grandes riscos de vida.

Portanto há várias técnicas utilizadas para aumentar as chances de sobrevivência e conseguir tempo para o resgate ou a evasão do local. As técnicas variam desde a obtenção de fogo, caça e pesca, construção de abrigos, defesa, mobilidade, primeiros socorros e entre outros (ESTADO-MAIOR, 1999).

E para um bom uso do produto final, ele deve conter algumas propriedades mecânicas e estruturais para obter um bom funcionamento na aplicação dessas técnicas essenciais para sobrevivência na selva. Entre essas propriedades é necessária uma boa resistência e tenacidade para suportar batidas e martelamentos e uma dureza relevante para manter o fio afiado por um longo tempo.

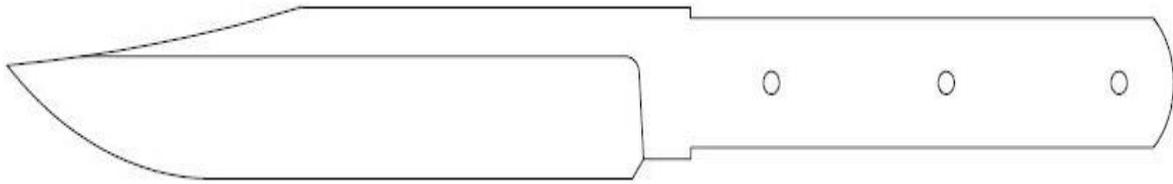
3. DESENVOLVIMENTO DA LÂMINA

Para se dar início ao processo de confecção de uma lâmina é importante ter em mente o modelo da peça que será produzida, sendo assim será usado o modelo de faca Bowie apresentado na figura 4 a seguir, que recebeu esse nome após ser usada por Coronel James "Jim" Bowie um grande combatente do Exército Americano, que lutou na



grande batalha de Álamo.

Figura 4: Modelo de faca Bowie para cutelaria artesanal.



Fonte: Postado por julio.bittner@gmail.com, 2016

Esse modelo também foi muito utilizado na serie de filmes Rambo, onde se tornou uma referência para lâminas de sobrevivência.

Com o modelo da lâmina em mãos o próximo passo é escolher qual tipo de aço- carbono a lâmina será confeccionada. Tendo isso em vista o aço-carbono escolhido foi o aço SAE 5160 retirado de um seguimento de feixe de mola de caminhão encontrado em ferro velho, demonstrado na figura 5 a seguir. Um aço com alta resiliência e resistência.

Figura 5: Segmentos de feixe de mola de caminhão no ferro velho.



Fonte: Imagem fotografada pelo auto.

Em sequência devemos entender a situação do material. O segmento de feixe de mola já muito utilizado, pode conter tensões internas que podem no futuro prejudicar a integridade do produto, sabendo disso será utilizado uma técnica de tratamento térmico de normalização para remover qualquer tensão que possam existir ou não.

Sendo assim, aquecendo o aço até 60°C acima do limite superior da zona crítica, para garantir a austenitização total do material, e logo em seguida deixaremos o aço resfriar naturalmente ate atingir a temperatura ambiente, removendo qualquer tensão que possa haver no interior do nosso aço. Com o aço tratado, segue para o processo de forjamento.

Durante o processo de forjamento, deverá ser utilizado equipamentos de proteção individual (EPI's), para manter a segurança no trabalho e a proteção de possíveis acidente que possam ocorrer diante do manuseio de metal em altas temperatura, e de resíduos quentes expelidos pelo aço durante os martelamentos. É importante também o uso de

protetores auriculares a fim de evitar danos auditivos que possam ser causados pelos altos ruídos emitidos pelo som do impacto entre aços.

Para iniciar o processo de forjamento, a forja será utilizada para aquecer o aço a uma alta temperatura facilitando a sua conformação durante o trabalho. Em seguida, com o aço já aquecido, o mesmo será posicionado com o uso de uma tenaz, sobre uma bigorna, e assim dando início ao processo de forjamento, com o uso de um martelo para realizar as deformações necessárias no aço a fim de obter os formatos desejados, demonstrada na figura 6 a seguir.

Figura 6: Forjamento artesanal de uma lâmina em uma bigorna.

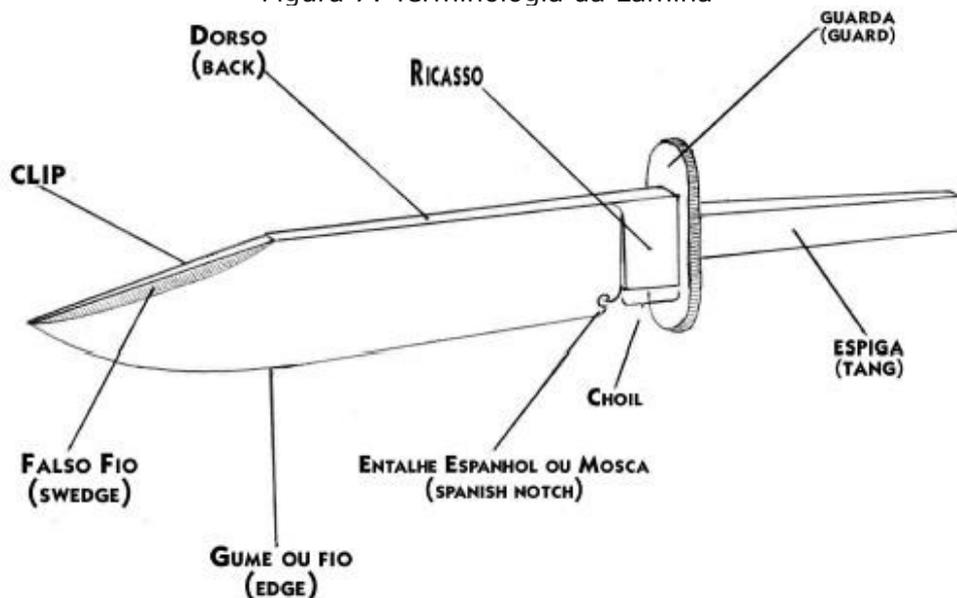


Fonte: Imagem fotografada pelo autor

Os impactos oriundos dos martelamentos no aço sobre a bigorna deverão deformar o mesmo até atingir a espessura e o tamanho requeridos. Com a deformação do aço, pode ocorrer que o mesmo ultrapasse as medidas, portanto ele deverá ser cortado com ajuda de uma esmerilhadeira ou outro equipamento ou método de corte, para manter as medidas.

Algumas técnicas para o manuseio do martelo em consonância com a bigorna, serão utilizadas para dar forma a espiga, a ponta da lâmina fazendo um falso fio e outros aspectos da terminologia da lâmina, demonstradas na figura 7.

Figura 7: Terminologia da Lâmina



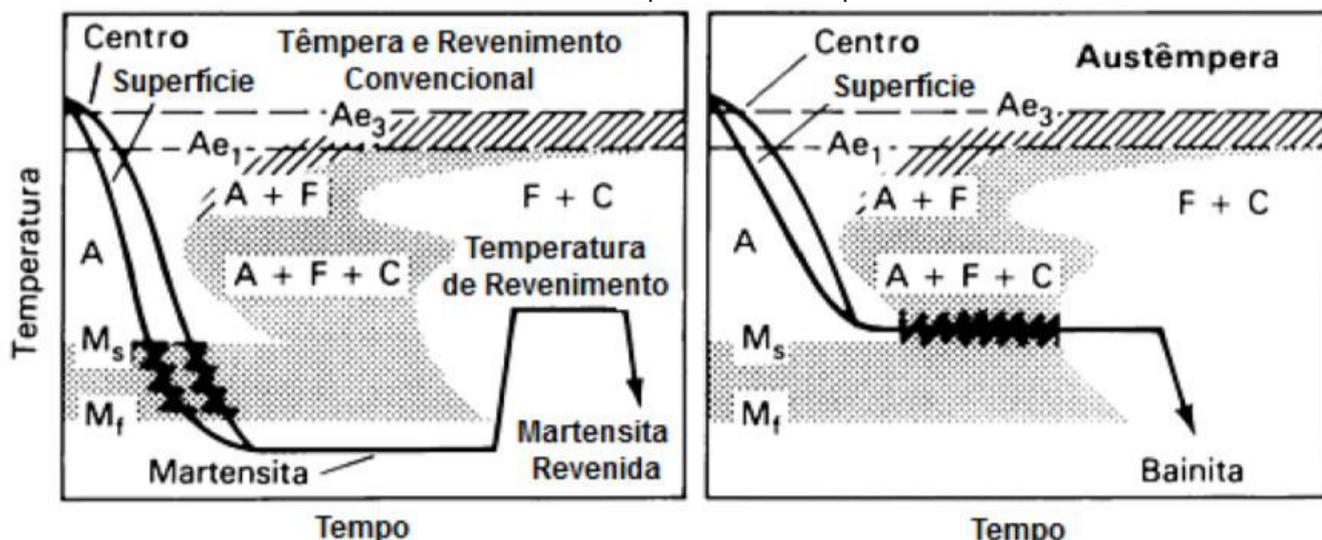
Fonte: Desenho de Milton Hoffmann, 2003

Com a forma da lâmina pronta, o processo de forjamento está concluído. O próximo passo será dar a têmpera na lâmina, um processo muito delicado, onde se deve tomar cuidado com a temperatura do aço e conseqüentemente sua cor, demonstradas no apêndice 1.

A têmpera é considerada por alguns cuteleiros como a alma do processo, pois ela será responsável endurecer a lâmina e alterar as propriedades estruturais do aço de acordo com a temperatura e o resfriamento.

Usando a austêmpera, que é um método não tão convencional na cutelaria, porém, é um método que fornece boas propriedades ao produto final. A austêmpera consiste em um aquecimento do aço a uma temperatura dentro da faixa de austenização, normalmente entre 790 a 915 °C, e em seguida de um resfriamento rápido em óleo mantido a uma temperatura constante por tempo suficiente para que ocorra a formação de bainita até atingir a transformação e as propriedades requeridas, representada na figura 8 a seguir.

Figura 8: Comparação dos ciclos de tempo-temperatura-transformação (TTT) para a têmpera e revenido convencionais e para a austêmpera.



Fonte: Souza, 2016

Uma das maiores vantagens da austêmpera sobre o método convencional de tempera e revenimento, é que devido à estrutura bainítica se formar justamente da austenita a uma temperatura mais elevada que a martensita, suas tensões internas resultantes são bem menores, e dessa forma as chances de surgimento de trincas durante a têmpera é praticamente nula.

Junto com a técnica de austêmpera, será realizada a técnica de tempera seletiva apenas metade do gume da lâmina, onde a outra metade que não se deseja dar a tempera ficará coberta por argila, que irá conter o aquecimento e o resfriamento rápido naquela região, permitindo que apenas a região descoberta fique exposta ao tratamento térmico desejado, demonstrada na figura 9 a seguir.

Figura 9: Lâmina com argila para têmpera seletiva



Fonte: João Makray, 2018

Sendo assim a austêmpera será realizada, enquanto a região coberta permite que o resfriamento seja mais lento e assim mantendo o aço mais flexível e menos rígido.

Após a região austêmperada o aço estará rígido, resistente e resiliente, e a parte restringida por argila estará flexível e menos rígida, reduzindo as chances de o produto sofrer alguma quebra. Após a austêmpera, a dureza do gume da lâmina deve ser testada para a confirmação de uma austêmpera bem sucedida, para isso será utilizado uma lima que será rascada no gume da lâmina, caso a lima não deslizar bem desbastando o aço, a austêmpera foi mal sucedida e assim todo o processo de tratamento térmico deverá ser refeito desde a normalização, porém, caso a lima deslize bem sobre o gume não desbastando o aço, a austêmpera foi bem sucedida e conseqüentemente a lâmina estará com uma boa dureza.

E então o próximo passo será o processo de usinagem por abrasão, que será responsável por remover material para deixar o produto mais leve, retirar algumas imperfeições na superfície que podem ocasionalmente ocorrer, começar a dar o fio ao gume da lâmina e também dar um devido acabamento na peça para atingir a espessura do aço e o designer desejados da peça.

Para o aço ser resistente ao desgaste ele deve ter uma dureza elevada para resistir a uma penetração inicial, deve ter uma boa tenacidade para evitar a locomoção das partículas metálicas e deve possuir uma superfície sem rugosidades para evitar saliências durante o seu uso. Contudo o aço austêmperado e usinado dispõe de cada um desses atributos sendo rígido, tenaz e liso, e conseqüentemente, resistente ao desgaste.

O cabo da lâmina é uma parte fundamental, pois é nele que a lâmina é manuseada e onde a vibração de impacto é dispersada, por isso é uma parte onde se deve conter um conforto para as mãos em decorrência dos esforços exercidos pela lâmina e pelo manipulador. Há vários materiais que podem ser usados para compor o cabo, como por exemplo madeira, couro, paracord, materiais sintéticos e entre outros. Cada material possui uma característica para cada situação, porém, para o uso na selva, ele deve ser resistente a umidade, a impactos, deve ser resistente à mudança climática e que seja duradoura. O material escolhido será a micarta, que é um material da família dos compósitos, à base de resina fenólica, algodão e tecido de linho. Sua composição o torna extremamente resistente em relação aos outros materiais usados em cabos e com maior durabilidade, demonstrada na figura 10 a seguir.

Figura 10: Faca Muela Kodiak 10M - Cabo Micarta Black



Fonte: Kaneo Adventure

A espiga da lâmina será perfurada em dois ou três furos para a fixação do cabo, como demonstrada na figura 4 anteriormente. Duas peças retangulares de micarta cortadas, serão perfuradas de acordo com os furos da espiga, e será utilizado cola epóxi juntamente com pinos para realizar a fixação da micarta na espiga, formando o cabo. Por fim o cabo deverá ser lixado para remover arestas para deixá-lo ergonomicamente confortável.

Após a conclusão do cabo, a próxima etapa será a afiação da lâmina. Existem várias técnicas para se obter uma boa afiação como, por exemplo, a amolação em pedra, o uso de um moto esmeril ou com chaira. Para a afiação da lâmina, será usado o método de amolação em pedra, no qual fará uso de uma pedra fabricada com materiais abrasivos ou encontrada na natureza. As pedras para amolação podem possuir vários formatos, porém, o mais utilizado é o formato retangular e também possuem várias granulações diferentes.

Para a afiação em pedra, deve-se ter em mente as seguintes etapas de desgaste, afiação e polimento, onde pedras com uma granulação mais baixa de 300 a 500 irá desgastar, as maiores de 800 a 4000 irão afiar e as granulações superior a 6000 irão polir.

Dando início ao processo de afiação em pedra, a mesma deverá ser enxarcada de água para uma melhor performance de afiação e posicionada em um local plano e firme, a lâmina será posicionada sobre a pedra em um ângulo aproximadamente de 15° em cada lado totalizando um ângulo de 30° para o fio. Para uma afiação segura para o manuseador, uma mão deverá segurar o cabo da faca e a outra deverá segurar a outra extremidade, como demonstrado na figura 11 a seguir.

Figura 11: Afição de uma lâmina com pedra.



Fonte: [Jonathan Austin Daniels, 2016](#)

E assim afiando a lâmina movimentando sua superfície por toda a extensão da pedra em movimentos contínuos, até criar uma rebarba. Isso será feito nos dois lados da lâmina equiparadamente. Após a conclusão do processo de afiação, será feito o uso de uma chaira ou de uma tira de couro para o assentamento do fio de corte.

Por último, mas não menos importante, a etapa de teste da lâmina. Com a lâmina já pronta, utilizaremos ela para cortar um pedaço de madeira dura para avaliar se a geometria do gume está grossa o suficiente para suportar grande impactos e utilizaremos uma corda suspensa de uma polegada de diâmetro para verificar se a geometria do gume ficou suficientemente fina para cortar com proficiência. Caso os requisitos dos testes sejam cumpridos, a lâmina estará apta para ser utilizada em campo.

Seu uso prático para sobrevivência na selva se consistirá em corte de tecidos e cordas, fazer fogo em consonância com pederneiras, escavação, caça e pesca no geral, culinária, defesa pessoal e para a realização de cortes em madeira, do qual pode ser manuseada para golpear a madeira ou para ser golpeada por madeira. Sendo assim, uma lâmina constituída de aço SAE 5160 com austêmpera seletiva, poderá aguentar tais esforços.

4. CONCLUSÃO

Contudo, essa pesquisa se propôs, como objetivo geral analisar e explicar o processo de construção de uma lâmina com aço SAE 5160 com austêmpera seletiva para sobrevivência na selva, ao público de uma forma bem explicativa. Para que o trabalho não se limitasse apenas à teoria foi realizada uma pesquisa de campo com um ferreiro experiente, onde foi esclarecido alguns pontos e foi presenciado o ato do forjamento na prática.

O primeiro passo do trabalho foi buscar e identificar por meio de materiais científicos os métodos e processos necessários para a confecção de lâminas. Em seguida foi apresentado as especificações desejadas e realizou-se todo referencial teórico diante dos métodos, processos e especificações desejadas para a construção.

Com a ajuda de um profissional qualificado, foi presenciado todo o processo de fabricação na prática e como cada processo se comporta e funciona.

Deste modo, foi apresentado os métodos e processos necessários para a confecção de uma lâmina e foi utilizada uma linguagem mais explicativa ao público com pouca experiência com linguagem mais formal, explicando o que cada etapa é, o que faz e como faz.

6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por toda saúde e felicidade durante esse período tão difícil que é a pandemia. Segundamente gostaria de agradecer aos meus pais Marcelânia Batista De Sousa e Antônio Bezerra De Sousa Filho e a minha querida Thatyla Vitoria Santos Ferreira, por todo apoio e compreensão que me forneceram durante essa etapa da minha vida. Gostaria de agradecer também ao ferreiro Antônio Francisco De Araújo Regens, por todo conhecimento e orientação a respeito do processo de forjamento de lâminas de aço temperado. Muito obrigado a todos.

REFERÊNCIAS

BATATA, Marcio. **Tratamento térmico rudimentar para aço – Básico e sem frescura**. Disponível em: < <https://defesa.org/dwp/tratamento-termico-rudimentar-para-aco-basico-e-sem-frescura/>> Acesso em: 12 de junho de 2021.

CHIAVERINI, Vicente. **BOLETIM DE GEOLOGIA E METALURGIA: AÇOS-CARBONO E LIGAS**. 11. ed. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. São Paulo. 1954. p. 59- 195.

CHIAVERINI, Vicente. **Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 1986. p. 19-59.

CHIAVERINI, Vicente. **Processos de fabricação e tratamento**. V2, São Paulo, McGraw-Hill, Brasil, 1986. p. 55-97.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977. p. 16. CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros fundidos**. 7ª Edição – 1996. p. 266. ESTADO-MAIOR, Brasil Exército. **Sobrevivência na selva**. 1999.

HOFFMANN, Milton. **CURSO DE INTRODUÇÃO À CUTELARIA**. SBC – Sociedade Brasileira dos Cuteleiros, 2003. p. 3-8.

IMPERIAL CUTELARIA. **O que é Micarta e por quê usá-la?** 2020. Disponível em: <<https://blog.imperialcutelaria.com.br/materia-prima/o-que-e-micarta-e-porque-usa-la/>> Acesso em: 03 de junho de 2021, 11:14.

MENOSSO, Gilvan; PERAÇA, Mauro Tavares. **PROJETO INFORMACIONAL, CONCEITUAL E PRELIMINAR DE UM FORNO DE INDUÇÃO PARA USO EM**

CUTELARIA ARTESANAL. Revista Ilha Digital, v. 7, p. 90-103, 2018. PONTES, Cicero Feliciano de. **Manual de Sobrevivência na Selva**. 1996.

SCURACCHIO, Bruno Geoffroy et al. **Austêmpera de Tiras de Aço Carbono em Forno Contínuo**. Acesso em, v. 1, p. 04-15.

SHIGLEY, Joseph E; BUDYNAS, Richard G.; MISCHKE, Charles R. **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª edição. 2005. p. 99-100.

SOUZA, Filipe Possamai de et al. **Efeito dos parâmetros de austêmpera nas propriedades de um aço**



SAE 5160 utilizado na fabricação de fixadores. 2016.

TSCHIPTSCHIN, André Paulo. **TRATAMENTOS TERMICOS EM AÇOS:** Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO%20T%C3%89RMICO%20DE%20A%C3%87OS.pdf>> Acesso em: 10 de abril de 2021, 16:40:38.

VIEIRA, José Guilherme Silva. Metodologia de pesquisa científica na prática. **Curitiba: Editora Fael**, 2010. p. 47.



APÊNDICE 1

Tabela de temperaturas e cores para forjamento e têmpera em aço carbono

ETAPA TRATAMENTO TÉRMICO	GRAUS CELSIUS	COR DO AÇO
Forjamento e Têmpera	1.100 °	Amarelo brilhante
	1.040 °	Amarelo escuro
	980 °	Laranja amarelo
	925 °	laranja
	870 °	Laranja Vermelho
	815 °	Vermelho brilhante
	760 °	Vermelho
	705 °	Vermelho médio
	650 °	Vermelho escuro
	537 °	Ligeiramente vermelho
	482 °	Vermelho muito sutil, principalmente cinzento

Fonte: Blog do Couteiro, 2019



CAPÍTULO 5

DOWNSIZING EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: INFLUÊNCIA DE UM TURBOCOMPRESSOR NO DESEMPENHO DE AUTOMÓVEIS

DOWNSIZING IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES: THE INFLUENCE
OF A TURBOCOMPRESSOR ON CAR PERFORMANCE

Iank Anderson de Oliveira Barbosa¹

Rialberth Matos Cutrim²

1 Aluno Concludente do Curso de Engenharia Mecânica – iankanderson1605@gmail.com

2 Orientador – Me. Rialberth Matos Cutrim – rialberth.cutrim@ceuma.br

Resumo

Os motores são máquinas que convertem energia térmica em energia mecânica. Como por exemplo, os motores do ciclo Otto que são divididos em quatro tempos, que são: admissão, compressão, expansão e exaustão, que funciona pela aspiração da mistura ar/combustível e sua combustão é promovida por uma faísca. Cada motor possui seu tempo de ignição e varia com as dimensões, combustível utilizado, regime de funcionamento e rotação. A alta eficiência desses motores transforma parte da energia fornecida em trabalho, ou seja, a eficiência está diretamente relacionada ao desempenho do motor, pois a eficiência do motor proporciona menor consumo específico e menos impactos ambientais. *Downsizing* é a redução da capacidade volumétrica dos motores para obter potências elevadas, sendo uma tecnologia crescente e contribui no aprimoramento de novas tecnologias para aumentar o desempenho dos automóveis. A técnica de motores sobrealimentados é muito importante para atingir maior potência e torque, como exemplo, os turbocompressores que são utilizados na tentativa de diminuir o consumo específico e reduzir as emissões de gases poluentes. A poluição dos automóveis afeta a humanidade em escalas, sendo global, local e regional. O efeito nocivo da poluição global ganha destaque nos discursos políticos por causa do impacto sobre a saúde das populações próximas de onde são emitidos. Os motores híbridos surgiram com a preocupação com a saúde, da redução das emissões de dióxido de carbono, a redução de custos do combustível. A pesquisa foi feita a partir de revisões bibliográficas, como o intuito de selecionar as referências afim de manter o caráter científico desta pesquisa, incluindo conceitos relevantes para compreender o funcionamento dos motores, tecnologias e mudanças que aprimoram esses motores, bem como os anseios e a necessidade do mercado para desenvolver automóveis com sobrealimentação.

Palavras-chave: Motores. Ciclo Otto. Desempenho. *Downsizing*. Turbocompressores.

Abstract

Motors are machines that convert thermal energy into mechanical energy. As an example, the Otto cycle engines that are divided into four strokes, which are: intake, compression, expansion and exhaust, which works by aspirating the air/fuel mixture and its combustion is promoted by a spark. Each engine has its own ignition time and varies with dimensions, fuel used, operating regime and rotation. The high efficiency of these motors transforms part of the energy supplied into work, that is, the efficiency is directly related to the motor's performance, as the motor's efficiency provides lower specific consumption and less environmental impacts. Downsizing is the reduction of the volumetric capacity of engines to obtain high power, being a growing technology and contributing to the improvement of new technologies to increase the performance of automobiles. The supercharged engine technique is very important to achieve greater power and torque, for example, the turbochargers that are used in an attempt to reduce specific consumption and reduce polluting gas emissions. Car pollution affects humanity on scales, being global, local and regional. The harmful effect of global pollution is highlighted in political speeches because of the impact on the health of populations close to where they are emitted. Hybrid engines came out of concern for health, from reducing carbon dioxide emissions, to reducing fuel costs. The research was based on bibliographic reviews, with the aim of selecting the references in order to maintain the scientific character of this research, including relevant concepts to understand the functioning of the engines, technologies and changes that improve these engines, as well as the desires and the market need to develop supercharged automobiles.

Key-Words: Engines. Otto Cycle. Performance. Downsizing. Turbochargers.



1. INTRODUÇÃO

A busca das indústrias fabricantes de automóveis é de produzir carros mais rápidos e mais eficientes, econômicos, levando em consideração as legislações sobre as emissões de poluentes, segurança, desempenho e economia. Os motores de combustão interna são capazes de receber alterações significativas, apesar da crescente evolução, ainda podem receber aperfeiçoamentos. Podem ser usados em várias áreas, como o desenvolvimento de carros, motocicletas, barcos, caminhões e outros.

Para melhorar o desempenho dos motores de combustão interna, pode ser utilizado um dispositivo de sobrealimentação que é o turbocompressor, este é constituído por uma turbina e um compressor montados no sistema de admissão. O princípio desse equipamento consiste na utilização da energia dos gases de exaustão do motor. Tendo em vista a importância do conceito de *downsizing*, que consiste na redução das dimensões e das cilindradas do motor, com o intuito de identificar as melhorias para o desempenho e eficiência dos motores de combustão interna. O estudo visa atrair a atenção da comunidade acadêmica para desenvolver novas pesquisas e ressaltar a importância do tema para engenharia mecânica. O interesse pelo objeto da pesquisa surgiu a partir da reflexão iniciada na disciplina de Máquinas Térmicas, o que motivou estudar, compreender e analisar os processos que ocorrem em motores de combustão interna.

O que impulsionou a realização desta pesquisa é responder o seguinte questionamento: como um turbocompressor pode influenciar no desempenho de um motor de combustão interna? O objetivo geral desta pesquisa é descrever como um turbocompressor pode influenciar no desempenho desses motores, auxiliando na melhoria de automóveis com base nos estudos sobre *downsizing*. Enquanto que, os objetivos específicos são: abordar a eficiência de um motor de combustão interna quando associado com um turbocompressor; analisar o aumento na potência e no torque dos motores de combustão interna, a redução do consumo específico e a redução da emissão de poluentes quando o motor é associado com turbocompressor e relacionar os motores de combustão interna com motores híbridos.

É feita uma revisão bibliográfica dos motores de combustão interna do ciclo Otto, logo após sobre *downsizing* de motores, uso de um turbocompressor, emissão de gases e poluentes e motores híbridos. Em seguida, é apresentada a abordagem metodológica utilizada na pesquisa para alcançar os objetivos. E por fim, é analisado nos resultados modelos de automóveis da Hyundai, com o intuito de identificar o potencial dos motores e principalmente avaliar o motor 1.0 Turbo. Após as análises é feita as conclusões sobre cada motor, levando em conta o conceito de *downsizing* para o desenvolvimento de carros com maior desempenho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna surgiram em meados do século XIX, inventados pelo engenheiro e inventor alemão Nikolaus August Otto (1832-1891), com o intuito de substituir os motores a vapor. Tem como destaque ser mais leve, eficiente e maior potência comparado com os motores a vapor daquela época (ENGREMAR JR, 2019).

Os motores são máquinas que convertem energia térmica, elétrica, hidráulica, química em energia mecânica. Os motores de combustão interna convertem energia térmica em mecânica, tendo como exemplo, os motores do ciclo Otto que funcionam pela aspiração da mistura ar/combustível e promovem a combustão pela queima através de uma faísca (TILLMANN, 2013).

Com a obtenção do trabalho ocasiona sequencias de processos que são realizados por uma mistura formada de ar e combustível. A energia fornecida aumenta a pressão e a temperatura dentro da câmara de combustível, logo, resulta no deslocamento dos componentes do motor e, conseqüentemente, forma a energia mecânica de rotação no eixo. O trabalho é obtido por uma sequência de processos que acontecem no fluido ativo que participa da reação de combustão. Os motores de combustão interna são classificados em alternativos, rotativos e de impulso (BRUNETTI, 2012).

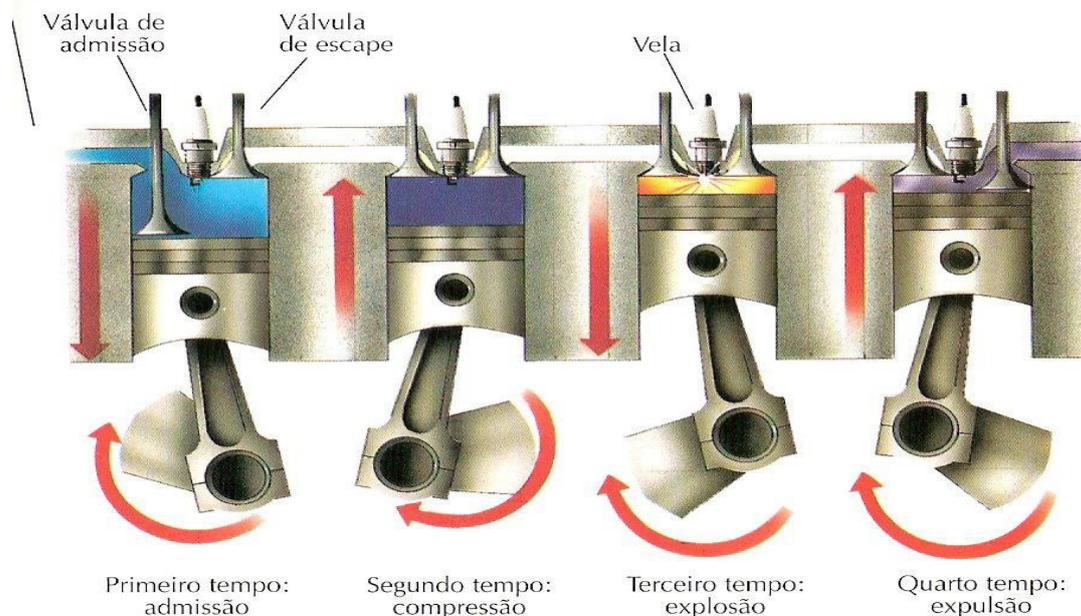
2.2 Ciclo Otto

Os motores ciclo Otto a combustão interna é por ignição por centelha elétrica. A ignição é importante no funcionamento do ciclo do motor. Para cada motor existe um tempo de ignição e este varia com as dimensões, combustível utilizado, regime de funcionamento e rotação (COSTANTIN, 2017). Os motores de combustão interna do ciclo Otto são classificados e divididos em quatro tempos, São eles:

No tempo de admissão, o pistão se movimenta no sentido contrário da câmara de combustível, com isso, provoca uma depressão que succiona a mistura para dentro câmara. No tempo de compressão, ocorre que o movimento do pistão vai de acordo com o encontro ao cabeçote provocando a compressão da mistura ar/combustível. Na expansão, acontece que a combustão da mistura aumenta a pressão e a temperatura dentro da câmara de combustível, assim, fornece energia para a movimentação do pistão, gerando trabalho útil. Já no tempo de exaustão a válvula de exaustão e os gases da queima são expelidos por causa do movimento de aproximação do pistão com as válvulas. Quando o motor possui mais de um pistão, o tempo dos pistões são alternados entre eles, mas cada um realiza os tempos de forma sequencial e sincronizado (ANTONELLO, 2015). A figura 1 exemplifica o funcionamento dos quatro tempos dos motores de combustão interna do ciclo Otto, como mostra abaixo:



Figura 1 - Ciclo de quatro tempos de um motor com ignição por centelha.



Fonte: adaptado de Melo (2014).

Estes são os quatro tempos do motor de combustão interna que opera em ciclo Otto. Neste ciclo a queima do combustível é realizada de forma rápida e consegue aproveitar a energia gerada. O motor é alimentado pelo combustível e pelo ar, tendo um equilíbrio nas proporções, aproveitando a energia liberada na reação da mistura que acontece dentro dos cilindros do veículo.

A queima do combustível e o funcionamento dos motores de combustão interna ciclo Otto a queima do combustível é feita de forma mais rápida, conseguindo aproveitar as energias geradas. Este motor tem a presença de velas de ignição, que são responsáveis por gerar faíscas que originam a queima da mistura ar/combustível (MELO, 2014).

2.3 Desempenho

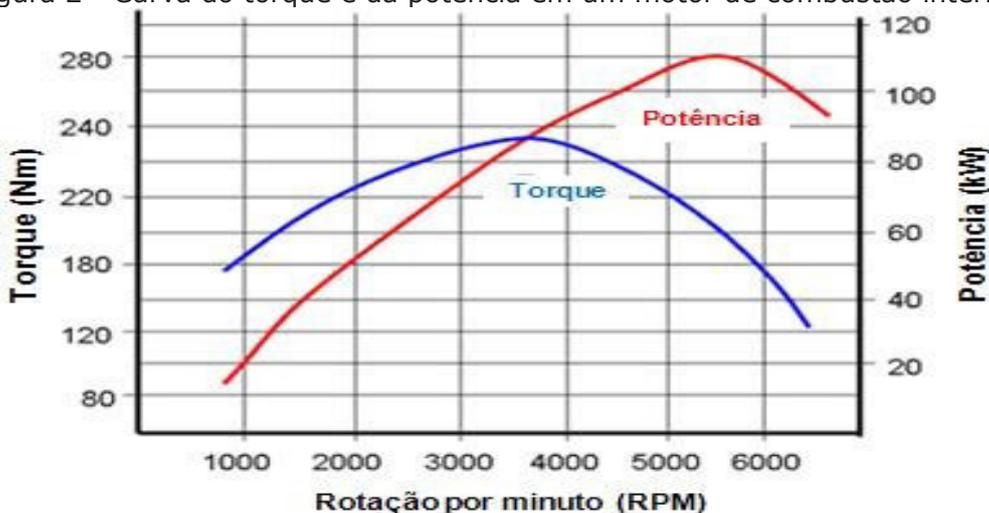
Os motores de combustão interna com uma alta eficiência transformam parte da energia fornecida em trabalho, ou seja, a eficiência está diretamente relacionada ao desempenho do motor. Dessa forma, a eficiência do motor proporciona menor consumo específico, menos impactos ambientais e apresenta maior desempenho. Porém, existem vários fatores que limitam a eficiência do motor. Isso acontece por causa do atrito, pela transferência de calor, pelo circuito de arrefecimento do automóvel e pelo escapamento. A eficiência média é de aproximadamente 30%, ou seja, apenas 30% dessa energia produzida é convertida efetivamente em trabalho. Alguns estudos apontam que buscam aumentar através do comportamento dos gases durante os processos de admissão, compressão e escapamento (COSTANTIN, 2017).

No processo de admissão a capacidade dos cilindros encherem variam com a densidade do ar, quanto mais denso é o ar, maior é a quantidade em massa admitida pelo motor, em consequência disso também é comprimida. As válvulas e o coletor de admissão têm grande influência sobre a velocidade e turbulência no processo. Esses fatores influen-

ciam na quantidade de ar admitida. A razão de compressão garante maior combustão e uma melhor queima. Esse processo se limita por causa do fenômeno da detonação, que acontece indesejavelmente nos motores de combustão interna. Se a razão de compressão esteja alta, a mistura entrará em autoignição, que acontece antes do lançamento da centelha, com isso, causa um trabalho negativo na subida do pistão (COSTANTIN, 2017).

O intervalo que acontece de um ciclo ao outro em elevadas rotações é muito rápido. Porém, a restrição na saída dos gases interferir na entrada da nova mistura negativamente na câmara de combustível. Portanto, é essencial que o escapamento tenha uma menor restrição para garantir a entrada da mistura em altas velocidades, garantindo melhor aproveitamento do ciclo. O desempenho dos motores de combustão interna pode ser analisado pelas curvas de torque e potência (COSTANTIN, 2017).

Figura 2 - Curva do torque e da potência em um motor de combustão interna.



Fonte: adaptado de Costantin (2017).

O torque e a potência variam por causa da velocidade de rotação do motor. As curvas do torque e potência mostrados abaixo são exemplos de como se comportam em função da velocidade de rotação do motor. Tanto o torque, quanto a potência são funções diretas da rotação do motor, com isso, resulta em um aumento quando a velocidade aumenta. Porém, as rotações mais elevadas, existe grande atrito e, conseqüentemente, dificuldade de enchimento dos cilindros, por causa da abertura das válvulas se torna muito rápidas (COSTANTIN, 2017).

O torque é a capacidade que o motor tem de realizar trabalho. Quanto maior for, maior é o potencial para realizar trabalho e melhor será o desempenho do motor, garantindo um maior torque pelo aumento de potência. O aumento do torque é possível por causa da eficiência térmica, da eficiência volumétrica, da cilindrada, da massa específica e ainda é possível diminuir as perdas por atrito para garantir melhores resultados. O bom desempenho do motor garante menor consumo específico. Isso ocorre por causa da eficiência do motor de combustão interna para transformar o combustível em energia mecânica (COSTANTIN, 2017).

2.4 Downsizing

A indústria automotiva enfrenta atualmente um cenário muito desafiador, tendo que se atentar as legislações de controle de emissões de poluentes, ao aumento do preço do combustível e na constante busca em carros de maior eficiência. Com isso, a indústria tem investido consideravelmente em pesquisa e desenvolvimento na busca de novas tecnologias que permitem aos automóveis reduzir a emissão de poluentes e consumo de combustíveis. Para alcançar esses objetivos vem se aplicando na indústria automotiva o chamado “*downsizing*”, que é simplesmente a substituição de motores de maior cilindrada por motores de menor cilindradas turboalimentados, sem o comprometimento do torque ou da potência (MENDES, 2017).

Figura 3 - Motor de três cilindros.



Fonte: adaptado de Quatro Rodas (2016).

Downsizing é a redução da capacidade volumétrica dos motores para obter a mesma potência (BRUNETTI, 2012). O *downsizing* em motores de combustão interna é crescentes e contribui efetivamente para a consolidação deste fenômeno, pois traz grandes benefícios quanto ao desempenho geral dos veículos automotores. A técnica de motores sobrealimentados é uma das técnicas mais importantes para atingir maior torque (HORODECHI, 2014).

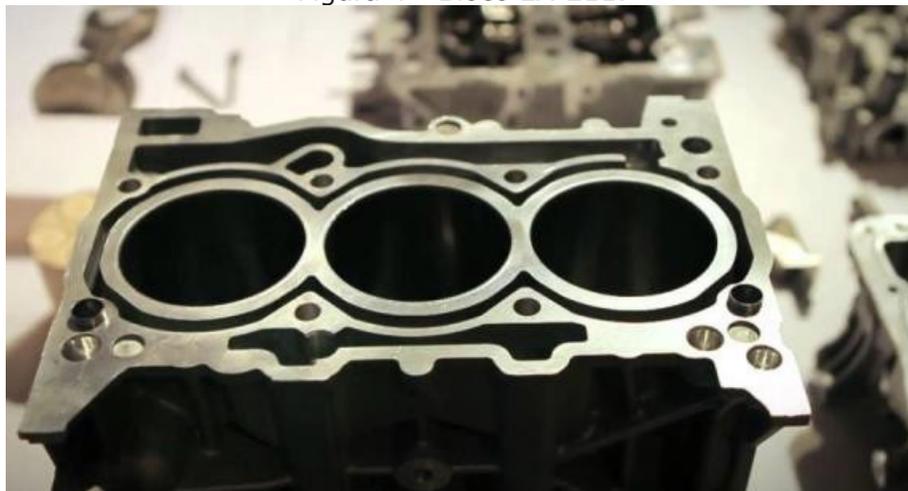
É realizado pelas montadoras de automóveis já há algum tempo. Motores menores e mais eficientes vêm sendo introduzidos no mercado sem existir um estudo aprofundado com todas as possibilidades possíveis para melhorar o consumo (MELO, 2014).

As exigências impostas às emissões de poluentes têm tornado antieconômica a aplicação de motores de grandes cilindradas com o intuito de se obter um equipamento de grande potência. Com isso, o mercado acabou por retomar a utilização de motores de baixa cilindrada, porém, com um grande interesse em uma certa dose de performance (MELO, 2014, p. 33).

O objetivo do conceito de *downsizing* é diminuir as emissões de poluentes e reduzir o consumo de combustível. Essa tecnologia adquirida nos motores tem uma grande facilidade de manuseio, menor peso e menor custo de manutenção em relação aos motores que

não usam esse sistema. A redução dos cilindros é uma mudança total no funcionamento dos motores de combustão interna. É possível notar melhorias nos números de economia e desempenho na redução dos cilindros para apenas três unidades (MARUM, 2014).

Figura 4 - Bloco EA-211.



Fonte: adaptado de Melo (2014).

A redução do número de cilindros tem grandes vantagens na redução do atrito, calor gerado pela combustão, peso, ruído e a queima completa de combustível (MARUM, 2014). Grande parte da potência é utilizada para vencer a resistência ao atrito, ou seja, um motor com menos cilindros economiza parte dessa conta, aproveitando a potência do motor para movimentar o automóvel (MELO, 2014).

A redução no número de cilindros de um motor não pode ser considerada somente a perda de um pistão e de uma biela. É preciso reconhecer que haverá uma redução no tamanho do bloco do motor, bem como cabeçote, virabrequim e comando de válvulas. Dependendo do modelo, a redução pode chegar a mais de trinta quilos. Esta redução permite ainda facilitar o trabalho do motor de partida, exigir menos dos coxins de apoio do motor, alívio na suspensão do automóvel e uma melhor dirigibilidade do mesmo (MELO, 2014, p.37).

A redução do número de cilindros tem vários benefícios, mas este sistema pode gerar incômodos, pois os dispositivos mecânicos que possuem eixo movimentado em elevadas rotações exigem uma distribuição de massas e forças uniformes. Com uma configuração ímpar dos cilindros podem acarretar um desequilíbrio que acaba por causa do excesso de vibrações, o que torna um equipamento áspero e ruidoso (BRUNETTI, 2012).

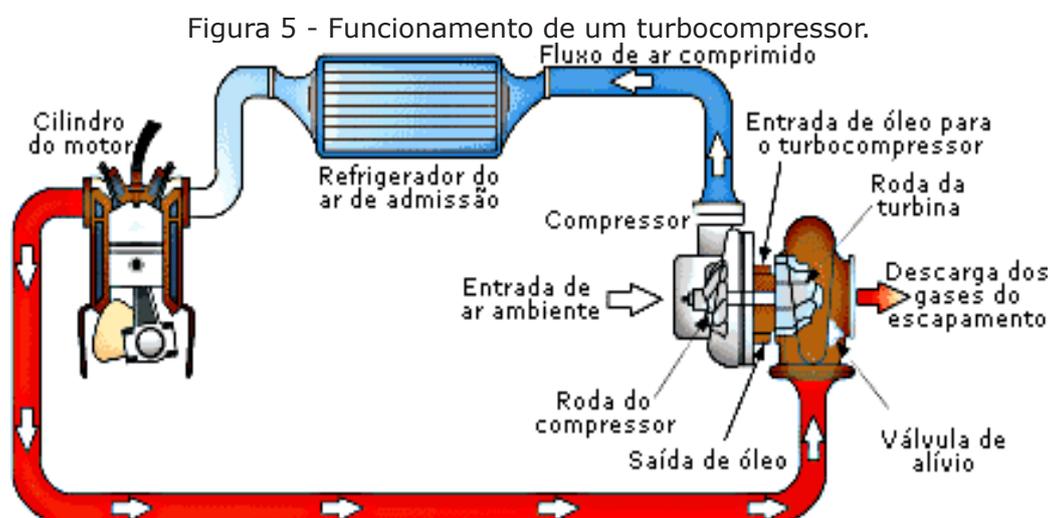
2.4.1 Turbocompressor

A sobrealimentação é uma técnica muito utilizada por mais de um século, mas foi nas últimas décadas que essa técnica vem sendo utilizado para extrair mais potência dos motores. O turbocompressor é utilizado na tentativa de melhorar o desempenho, diminuir o consumo específico e reduzir as emissões de gases poluentes dos motores de combustão interna. Os turbocompressores aumentam a pressão média efetiva (PME), pois utiliza a energia remanescente de pressão e temperatura. Essa energia é gerada durante a combustão e não é formada totalmente em trabalho mecânico para movimentar a turbina.

A energia dos gases de exaustão que seriam expulsões volta para o eixo da turbina que gira o rotor do compressor, admitindo ar à pressão atmosférica e comprimindo-o para o sistema de admissão do motor (HORODECKI, 2014).

Os turbocompressores são formados por uma turbina e um compressor que são ligados por um eixo. Esse sistema é acionado pelos gases de escape, que gira a turbina que fornece trabalho ao compressor. Este é responsável em comprimir o ar de admissão. Dessa maneira, o turbocompressor utiliza essa energia para a compressão do ar. Esse sistema não consome potência do eixo do motor, ou seja, não existe perda de energia para o acionamento (COSTANTIN, 2017).

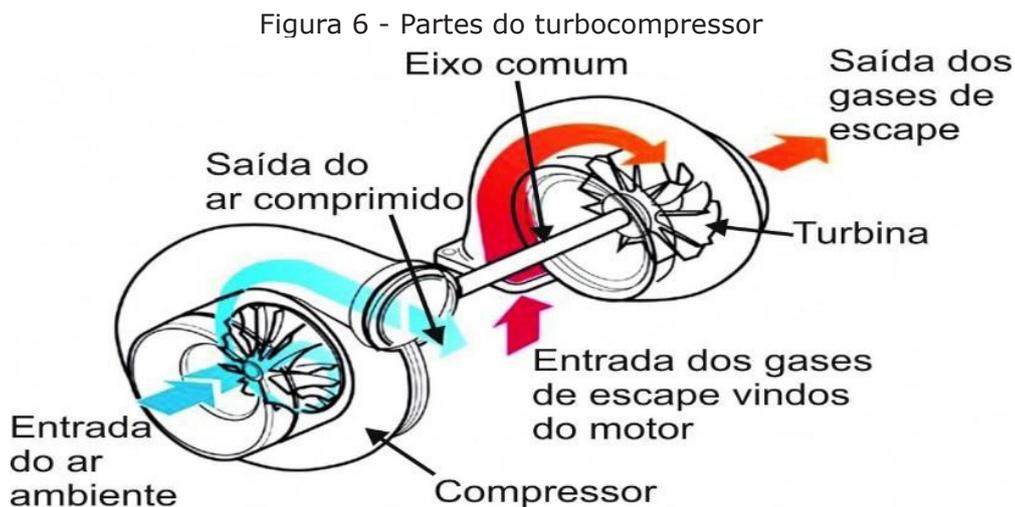
O sistema de um turbocompressor opera em três fases. A primeira fase é chamada de carga parcial inferior, nela ocorre que o ar atmosférico é admitido pelo motor, mas não é comprimido, por causa da baixa energia dos gases de escape que não conseguem girar as pás da turbina. Na segunda fase o ar é comprimido pelo compressor em uma pressão próxima à atmosférica, essa fase é chamada de carga parcial média. Na terceira e última fase o motor opera em plena carga, ou seja, o ar que é admitido é comprimido com máxima pressão que o equipamento pode suportar (COSTANTIN, 2017).



Fonte: adaptado de Mega Arquivo (2011).

Na figura 5 mostra o sistema de funcionamento de um turbocompressor, na qual os gases de escape movimentam a turbina que é a parte quente do turbocompressor e fornece movimento para o compressor que é a parte fria. O compressor aumenta a densidade do ar admitido, em consequência disso, o ar tem sua temperatura reduzida no resfriador para aumentar a densidade do ar admitido nos cilindros (RODRIGUES, 2014).

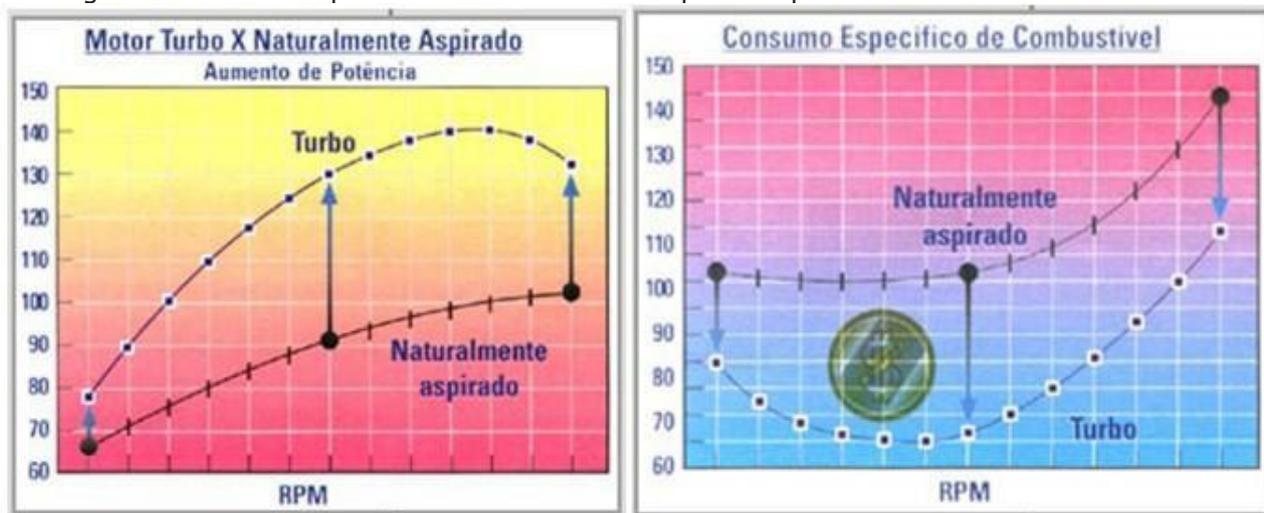
A vantagem na montagem de um turbocompressor é que nenhuma das saídas do eixo do motor é usada para acionar o compressor, isto é, ele aproveita a energia dos gases de escape para acionar a turbina conectada ao eixo do rotor, cuja função é bombear ar para o interior dos cilindros (SIMÊNCIO 2019, p. 156).



Fonte: adaptado de Simplo (2019).

O fluxo dos gases que saem do cilindro é direcionado para a turbina do turbocompressor, sua função é girar suas pás para transformar a energia de pressão em energia cinética. A compressão do ar causa aumento na temperatura, com isso, causa diminuição da densidade, que é o efeito oposto do desejado. O ar que é comprimido passa por um *inter-cooler*, sua função é diminuir a temperatura. Assim, o ar se torna mais denso e é admitido nos cilindros. A válvula *wastegate* tem a função de garantir que o sistema não passe da pressão máxima, permitindo apenas a passagem de partes dos gases de escape passem pela turbina (COSTANTIN, 2017).

Figura 7 - Curva da potência e do consumo específico para motores turboalimentados.



Fonte: adaptado de Costantin (2017).

Na figura 7 mostra as curvas de potência e consumo específico em motores alimentados. Os componentes do turbocompressor normalmente possuem uma faixa de operação que faz o sistema obter alta eficiência, operando melhor em médias e altas rotações e não fornece respostas rápidas em baixas rotações. Mas o aumento de torque, potência, redução de consumo específico e redução da emissão de poluentes, são as principais vantagens de se utilizar um turbocompressor em motores de combustão interna (COSTANTIN, 2017).

Os motores de combustão interna sobrealimentados possuem um mecanismo que permite a admissão de um volume maior de ar para dentro do propulsor, com isso, gera

aumento na potência e torque. O turbocompressor tem como função forçar um volume maior de ar para dentro dos cilindros, enriquecendo a mistura com o combustível. Os métodos utilizados nos motores sobrealimentados com baixa cilindrada têm como objetivo entregar menor consumo de combustível sem perder desempenho (SILVA, 2020).

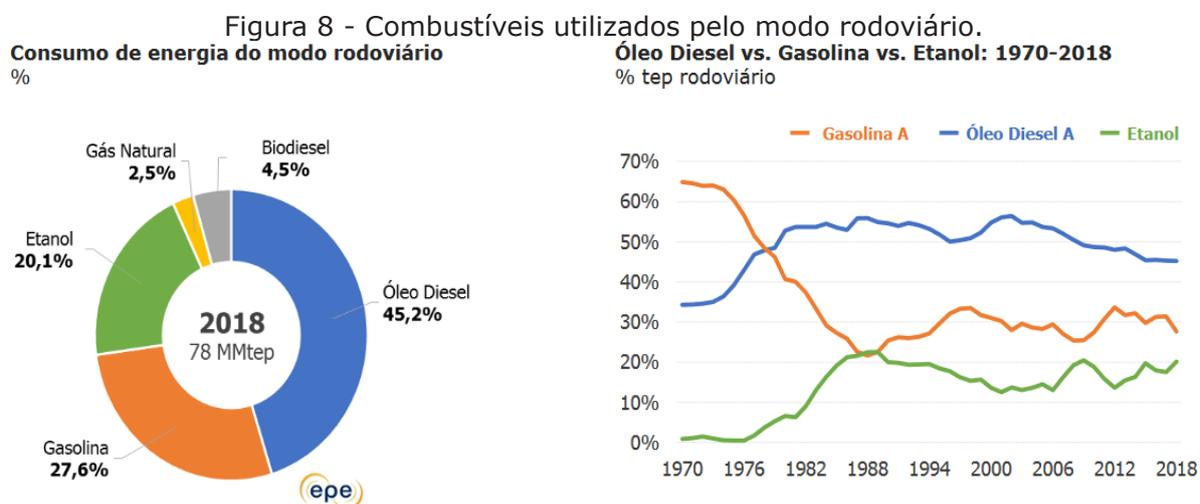
Um motor sobrealimentado por um turbocompressor tem um ponto negativo em relação a uma maior complexidade comparado aos motores comuns. Devido isso, a Central Eletrônica (ECU) deve monitorar o tempo de ignição e também restringir o nível de pressão, a fim de evitar a detonação e pré-ignição. O fluxo dos gases de escape não é o suficiente para que a turbina funcione. O turbo tem um funcionamento muito melhor em rotações acima de 2500 rpm. Quando ocorre aceleração a turbina demora um tempo para girar o suficiente para atender a demanda do motor. Os principais parâmetros para escolher corretamente um turbocompressor são: a potência, a cilindrada total, eficiência térmica, rotação e condições do ambiente (COSTANTIN, 2017).

2.5 Emissão de gases e poluentes

A poluição dos automóveis afeta a humanidade em escalas, sendo global, local e regional. O efeito nocivo da poluição global vem ganhando destaque nos discursos políticos. É muito importante combater a poluição nas escalas regionais e principalmente local, por conta do impacto sobre a saúde das populações próximas de onde são emitidos os poluentes (LEAL; CONSONI, 2021). Em uma cidade grande a poluição do ar é muito maior, podendo causar desconforto e redução da qualidade de vida das pessoas, mas também é responsável por várias internações e mortes prematuras.

A poluição local e regional ocasionada pelos veículos decorre de substâncias que são geradas pelo funcionamento de seus motores a combustão. Ao serem lançadas na atmosfera atuam direta ou indiretamente sobre a saúde das pessoas próximas à sua emissão (LEAL; CONSONI, 2021, p.6).

Os combustíveis mais utilizados no Brasil em automóveis do transporte rodoviário são a gasolina, óleo diesel e etanol. Cada um desses combustíveis apresenta um tipo de comportamento em relação às emissões de poluentes, como mostra a seguir:



Fonte: adaptado de EPE (2019).

De acordo com a figura 8, o óleo diesel é o combustível mais utilizado, pois alimenta a frota de ônibus e caminhões. É possível perceber a queda da gasolina e também o crescimento do etanol.

[...] o que se verifica é quase um espelhamento da curva desses dois combustíveis, quando um sobe o outro desce, movimento que tem se intensificado graças à maior penetração dos veículos *flex fuel* no mercado, ou seja, que permitem ao consumidor realizar sua escolha no momento de cada abastecimento, e não durante a compra do veículo (LEAL; CONSONI, 2021, p.8).

Nas grandes regiões, as emissões de veículos são formadas por várias substâncias tóxicas que são absorvidas pelo sistema respiratório. Essas substâncias produzem efeitos negativos para a saúde das pessoas. A emissão de poluentes é composta por: óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e outros (CETESB, 2021).

O monóxido de carbono é formado por causa da combustão incompleta, sendo um produto típico de um motor de combustão interna, ou seja, o oxigênio não é o suficiente para reagir com o carbono disponível. Quando essa substância é inalada a capacidade do sangue de transportar oxigênio é reduzida. (CETESB, 2021).

Os óxidos de nitrogênio são formados quando o nitrogênio reage com o oxigênio por causa da alta temperatura na câmara de combustão. Essa substância participa na formação do "smog" fotoquímico, tendo como principal poluente o ozônio. Também ajuda na formação da chuva ácida, com isso, é um dos poluentes de maior preocupação e para combater é preciso de tecnologias de controle, pois sua formação aumenta com a eficiência dos motores, principalmente nos motores do ciclo diesel (CETESB, 2021).

Os hidrocarbonetos são uma parte dos combustíveis que não foram totalmente queimados, com isso, são expelidos pelo motor, como o vapor de combustível emitidos dos pontos do automóvel ou expulsos durante o abastecimento do tanque. Essa substância reage na atmosfera promovendo a formação de "smog" fotoquímico, sendo uma formação venenosa que afeta à saúde de quem o respira (CETESB, 2021).

Os automóveis movidos a etanol comparados aos de gasolina produzem menos monóxido de carbono, mas a combustão incorreta do etanol pode gerar emissões de aldeídos, formaldeídos e acetaldeídos. Essas substâncias são prejudiciais para a saúde, podendo ser diminuída utilizando conversores catalíticos. Os gases que são provenientes da exaustão de motores de combustão a diesel são formados por compostos gasosos como monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e outras substâncias. Quando essas substâncias são inaladas podem causar o desenvolvimento de várias doenças como: doenças cardiovasculares, perda de memória, dificuldade de concentração e também prejudica o ambiente (INCA, 2018).

Existem alguns combustíveis capazes de reduzir a emissão de poluentes como o diesel renovável. Este é um produto quimicamente parecido com o que vem do petróleo, mas é uma mistura de origem animal ou vegetal em sua composição, sendo produzido por um processo de hidrogenação. É um produto sem contaminação, maiores estabilidades térmicas e oxidativa. Garante poucos problemas no armazenamento e na sua utilização em motores diesel, minimizando danos ao motor e aumentando a vida útil dos automóveis



(PETROBRAS, 2020).

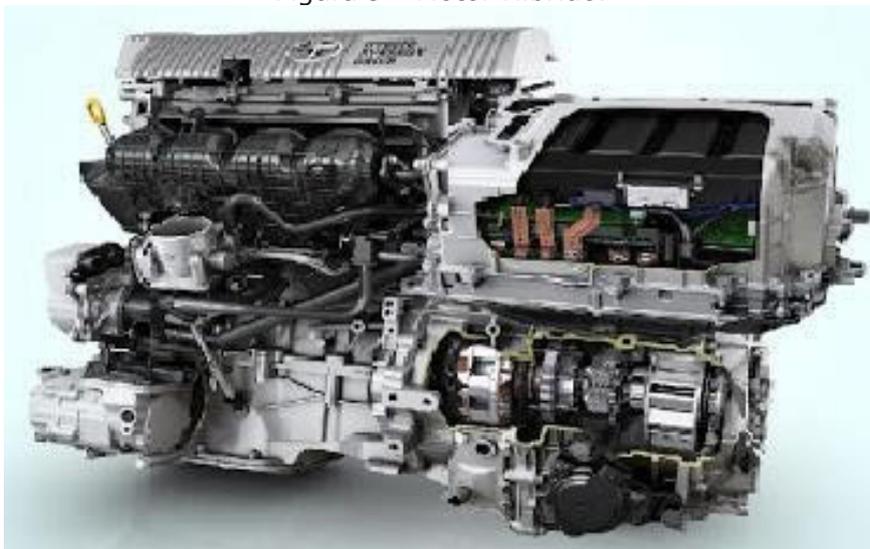
2.6 Motores híbridos

Os motores híbridos surgiram com a preocupação com a saúde, da redução das emissões de dióxido de carbono, a redução de custos do combustível. Diante dessas preocupações existem modelos híbridos já disponíveis no mercado. Isso só foi possível com a evolução tecnológica dos meios de acumulação e transformação da energia elétrica, sendo formados por duas ou mais formas de energia para a propulsão do veículo, sendo uma alternativa viável, sustentável e possui menor consumo de combustível (PRADO, 2019).

Para uma melhor economia de combustível, redução das emissões de poluentes, segurança, confiabilidade, melhor desempenho, manutenção dos componentes, tem tornado a tecnologia híbrida um dos maiores desafios para as indústrias automobilísticas (BRUNETTI, 2012).

Híbridos no ramo automobilístico, são considerados como qualquer automóvel que combine duas ou mais formas de energia, com o objetivo de proporcionar potência de propulsão direta ou indireta, sendo que uma grande parte dos automóveis hoje em dia usam esse tipo de tecnologia (LAYTON; NICE, 2014).

Figura 9 - Motor Híbrido.



Fonte: adaptado de Prado (2019).

Na figura 9 é possível observar a combinação de duas tecnologias, no lado esquerdo é um motor de combustão de combustão interna e no lado direito um motor elétrico. Nesse tipo de sistema híbrido possui também baterias capazes de armazenar a energia que será utilizada na movimentação do automóvel. Essa energia pode ser produzida pelo motor de combustão interna ou pode ser fornecida pela rede elétrica, permitindo que o motor seja mais eficiente, use menos combustível e produza menos gases poluentes (BRUNETTI, 2012). Os motores híbridos são classificados de acordo com o seu funcionamento, sendo de dois tipos:

2.6.1 Híbrido em paralelo

Os motores híbridos em paralelo podem funcionar somente com o motor híbrido, somente a combustão interna ou pode operar ao mesmo tempo. O motor elétrico e o motor de combustão interna são capazes de fornecer torque para as rodas, ou seja, o motor de combustão interna é acoplado às rodas do automóvel para suprir uma demanda emergencial de torque, enquanto que, o motor elétrico é instalado paralelamente ao motor de combustão interna para ocorrer a associação da força dos dois. O motor elétrico opera em baixas rotações ou quando é solicitado. Quando ocorre maior força ou velocidade o sistema opera com o motor de combustão interna, sendo que nessa circunstância, os dois propulsores estão em funcionamento. O motor de combustão interna não é responsável em gerar energia para armazenar nas baterias, podendo ser uma desvantagem desse sistema (BRUNETTI, 2012).

2.6.2 Híbrido em série

Os motores híbridos são movimentados pelo motor elétrico, ou seja, nesse sistema o motor de combustão interna não é ligado às rodas, somente funciona para mover um gerador, este é responsável em produzir a eletricidade para o motor elétrico ou para as baterias (PRADO, 2019). Existe duas fontes de energia que são ligadas entre si em série, onde a saída da primeira fonte alimenta a entrada da segunda fonte, existindo uma única fonte de alimentação que é ligada diretamente na transmissão do automóvel (AMORIM, 2012).

Esse sistema tem como vantagem o fato de o motor de combustão interna operar virtualmente em modo estacionário. O motor de combustão interna não precisa estar acoplado ao motor de elétrico, existindo a possibilidade de serem instalados separadamente em locais diferentes. A desvantagem do sistema em série é que as perdas de rendimento de ambos os motores são associadas a necessidade de várias conversões de energia (ABVE, 2010).

3. METODOLOGIA

Para realização desta pesquisa serão necessárias pesquisas bibliográficas, como o intuito de selecionar as referências afim de manter o caráter científico desta pesquisa. O objetivo é conhecer como funcionam os motores de combustão interna e como eles se associam com o uso de turbocompressores.

Segundo Bastos (2016, p. 32), "A pesquisa bibliográfica é um tipo de pesquisa que visa responder um problema com a utilização de material bibliográfico, estudos e análises científicas que passaram pelo crivo da ciência para serem apresentadas para a sociedade".

Para a coleta de dados serão utilizados artigos, livros e sites confiáveis, com o pro-



pósito de selecionar as fontes mais seguras sobre o tema. Serão definidas como critério de inclusão os artigos publicados nos últimos 10 anos (2011 a 2021), redigidos em português, e como critério de exclusão serão os artigos que não se enquadram neste período ou textos incompletos.

Os artigos foram coletados no período de março de 2021 à abril de 2021, constituindo inicialmente por 45 obras. Após a leitura, foram incluídos os artigos que obedeciam ao critério de inclusão, obtendo-se uma amostra de 26 obras. Após a leitura das obras foram analisadas as citações dos autores sobre as principais fontes e identificar as contribuições dessas referências para o desenvolvimento desta pesquisa.

Com a análise feita com o auxílio das revisões bibliográficas, foram selecionados quatro parâmetros que são importantes no desempenho dos automóveis e utilizados para análise qualitativa desta pesquisa, sendo eles: potência, torque, consumo e emissão de gases poluentes. A pesquisa qualitativa são coletas de informações sobre determinado tema, a fim de, descrevê-lo, usando opiniões, pontos de vista ou impressões.

O objeto de estudo em questão são os motores 1.0 aspirado, 1.6 aspirado e 1.0 turbo da Hyundai que serão descritos nos resultados obtidos desta pesquisa. Além da análise das tecnologias que compõem estes motores, serão analisadas comparações usando o Microsoft Excel.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa foram obtidos diretamente do site oficial da Hyundai (2010). Esses dados são analisados de acordo com a pesquisa bibliográfica. Logo abaixo é analisado os motores 1.0, motor 1.6 aspirado e o motor 1.0 Turbo. O objetivo é identificar a potência, torque, consumo específico e emissão de poluentes do motor 1.0 Turbo e analisa-lo com os motores aspirados (HYUNDAI, 2010).

O motor 1.0 aspirado é muito famoso por possui uma economia extrema de combustível. Trata-se de um conjunto mecânica pequeno e um cofre de até 1.000 cm³. É uma opção para quem busca modelos econômicos, leves e ágeis. No *lineup* Hyundai é encontrado esse sistema em modelos do HB20 hatch e sedan, tendo um conjunto mecânico 1.0 Kappa (HYUNDAI, 2010).

O motor 1.6 aspirado possui uma boa performance e elasticidade, principalmente em vias e rodovias oferecem espaço para velocidade final. No *lineup* Hyundai, é encontrado esse tipo de motorização nas versões intermediárias do HB20 hatch e sedan, com o motor 1.6 Gamma. Esse motor também é encontrado nas versões da linha Creta (HYUNDAI, 2010).

Figura 10 - Conjunto mecânico Kappa 1.0 TGD*i*.



Fonte: adaptado de Hyundai (2010).

O *Downsizing* é uma combinação virtuosa de economia e agilidade, sendo encontrado no motor 1.0 Turbo tendo os cofres pequenos e supereconômicos dos 1.0 para acrescentar a sobrealimentação que comprime os gases da combustão, oferecendo mais desempenho ao automóvel. Na linha Hyundai os motores 1.0 turbinados são exclusivos da linha HB20, com o conjunto mecânico Kappa 1.0 TGD*i*, tendo uma aceleração em ladeiras diferenciado (HYUNDAI, 2010). A seguir é mostrado no quadro 1 as potências e os torques dos motores citados anteriormente:

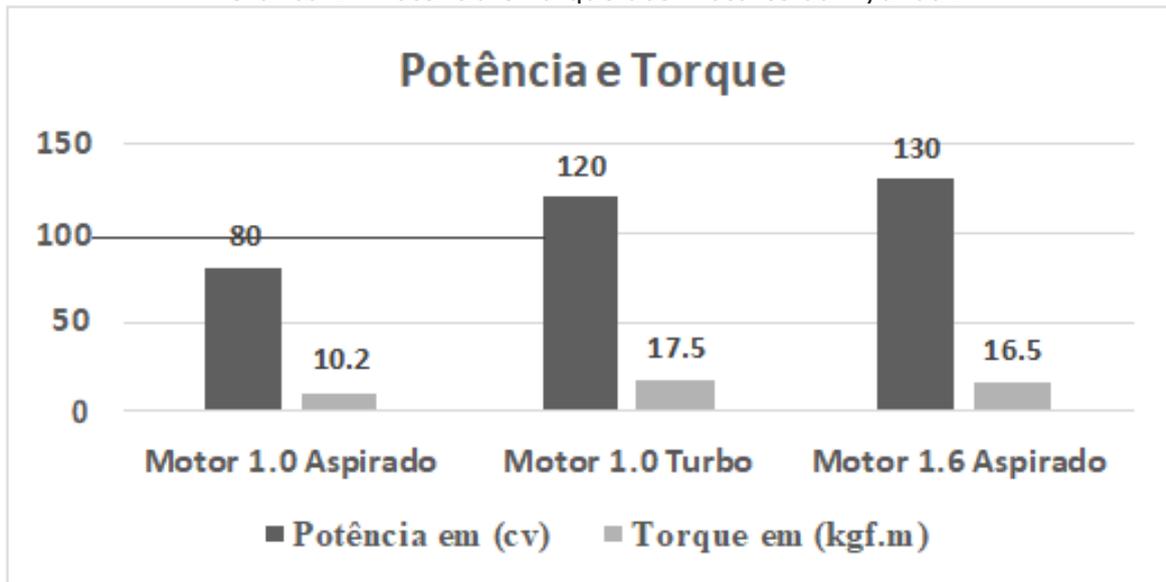
Quadro 1 - Potência e Torque dos motores da Hyundai.

Motores	Potência	Torque
Motor 1.0 aspirado	80 cv	10,2 kgf.m
Motor 1.6 aspirado	130 cv	16,5 kgf.m
Motor 1.0 Turbo	120 cv	17,5 kgf.m

Fonte: O autor.

É possível perceber no quadro 1 que a potência do 1.0 Turbo é bem próxima do motor 1.6 aspirado, mas possui torque superior. O motor Turbo comparado com os motores aspirados apresenta melhor desempenho e mais economia de combustível. A potência dos motores é relacionada com a velocidade final do automóvel e o torque é uma métrica de aceleração, ou seja, é quando o automóvel movimenta sua massa em baixas rotações.

Gráfico 1 - Potência e Torque dos motores da Hyundai.



Fonte: o autor.

Os modelos HB20 e HB20S da Hyundai nas versões Evolution, Sport e Diamond são exemplos de potência, torque, economia de combustível e menos emissão de poluentes. O motor 1.0 Turbo tem uma grande finalidade de ganhar e sustentar sua velocidade em cidades e rodovias, favorecendo conforto e maior economia financeira. O motor Kappa 1,0 TGD i possui uma boa economia de combustível, garantindo ultrapassagens e retomadas seguras de maneira ágil, até em baixas rotações, atrelado ao sistema Stop & Go que possui a parada e a partida automáticas do motor, esse sistema faz diminuir o gasto de combustível (HYUNDAI, 2010).

Com a crescente preocupação com a emissão de poluentes foi criado motores com a mesma potência, com o objetivo de minimizar o escape de gases poluentes. Os motores sobrealimentados têm como qualidade a redução da emissão de poluentes, pois os gases que são emitidos no processo são usados pelo próprio motor em seu sistema. Nos motores turbinados possui uma direção energética e agressiva, diferente dos aspirados que são mais suaves (HYUNDAI, 2010).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente pesquisa foram apresentados vários conceitos relevantes para compreender o funcionamento dos motores de combustão interna, tecnologias e mudanças que aprimoram esses motores, bem como os anseios e a necessidade do mercado para desenvolver automóveis com sobrealimentação.

Foram apresentados os benefícios e a viabilidade de se usar um turbocompressor em motores de combustão interna e as contribuições que a tendência mundial de *downsizing* trouxe para melhorar o desempenho dos automóveis. A proposta de se usar esse dispositivo é aumentar a performance dos automóveis. Várias montadoras estão utilizando essa tecnologia e em futuro próximo estará em grande parte dos carros.

Contudo o objetivo da pesquisa foi alcançado. A pesquisa realizada mostra, através de revisões bibliográficas que existem tecnologias para aumentar o desempenho de motores, visando em reduzir o consumo de combustível e emissões de poluentes.

Um motor 1.0 turbo com três cilindros se mostra superior a um motor 1.0 aspirado em relação a potência, torque, consumo específico e emissão de poluentes. Essa tecnologia consegue suprir várias necessidades em relação ao desempenho do motor. Com um cilindro a menos, o automóvel passa a consumir menos combustível. O *downsizing* tem como meta a economia de combustível sem que atrapalhe a potência do motor.

Os motores híbridos são também uma alternativa viável para reduzir a emissão de gases poluentes, pois é uma combinação de dois tipos diferentes de motores. Ou seja, o motor de combustão interna se junta com um motor elétrico, afim de reduzir os poluentes e também apresenta uma economia extrema.

Existem algumas dificuldades envolvendo um turbocompressor e é preciso ser levado em consideração. Um automóvel sobrealimentado pode ter problemas por causa do atraso na resposta, ou turbo *lag*, ou seja, o turbocompressor oferece ao motor bons resultados apenas em velocidades de rotação elevadas.

REFERÊNCIAS

ABVE. **O que é um veículo híbrido?** 2010. Disponível em: < <http://www.abve.org.br/PF/ExibePF.asp?codigo=0003>>. Acessado em: 31/03/2021. Horário: 03 h e 37 min.

AMORIM, José de Campos. **A tributação automóvel e suas implicações ambientais**. Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Contabilidade e Administração do Porto, 2012.

ANTONELLO, Miguel Guilherme. **Proposta de metodologia para o projeto de motores de combustão interna**. 2015. Rua Erly de Almeida Lima, n. 211, apto 202, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, CEP: 97105-120. Disponível em: < <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8359/ANTONELLO%2C%20MIGUEL%20GU%20ILHERME.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acessado em: 26/03/2021.

BASTOS, M. C. P. **Metodologia Científica**: projeto de pesquisa. Unidade 3, Londrina-PR: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2016.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**: volume 2. São Paulo: Blucher, 2012. CETESB. **Emissão veicular**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2021.

Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>>. Acessado em: 01/06/2021. Horário: 20 he 38 min.

COSTANTIN, Luis Claudio Paleari. **Dimensionamento de turbocompressores para aplicação em motores de combustão interna**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/19540/1/DimensionamentoTurbo-compressores Aplicacao.pdf](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/19540/1/DimensionamentoTurbo-compressores%20Aplicacao.pdf). Acessado em: 26/03/2021.

ENGRENAR JR. **Motor a Combustão**: uma invenção que transformou a humanidade. Rod Washington Luís, São Carlos/SP, 2019. Disponível em: < https://engrenarjr.com.br/blog/motor_a_combustao_uma_invencao_que_transformou_a_humanidade>. Acessado em: 11/04/2021. Horário: 01:05 horas.

EPE. **Petróleo, gás e biocombustíveis**: abastecimento de derivados de petróleo. 2019. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-442/08%20-%20Abastecimento.pdf>>. Acessado em: 31/05/2021.

HORODECKI, Yuri Moss. **Comparação do desempenho de um motor de combustão interna normal-**



mente aspirado movido a gasolina e turbocomprimido operando com etanol. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7541/1/PG_DAMEC_2014_2_04.pdf>. Acessado em: 10/04/2021. Horário: 18:29 horas.

HYUNDAI. **Potência do motor:** qual a ideia para você. 2020. Disponível em: <<https://www.hyundai.com.br/hyundaiexplica/potencia-do-motor-qual-a-ideal-para-voce>>. Acessado em: 11/04/2021. Horário: 18:00 horas.

INCA. **Fumaças de motores a diesel.** Instituto Nacional de câncer, 2018. Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/poluentes/fumacas-de-motores-a-diesel>>. Acessado em: 02/06/2021.

LAYTON, Julia; NICE, Karim. **Como funciona os carros híbridos.** 2014. Disponível em: <<https://www.monografias.com/pt/docs/Como-funcionam-os-carros-h-bridos-FKURUJBX7X>>. Acessado em: 31/05/2021. Horário: 02:22 horas.

LEAL, T. A. C. B; CONSONI, F.L. **Emissões poluentes dos veículos:** impacto dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, janeiro 2021 (Texto para Discussão nº293). Disponível em: <www.senado.leg.br/estudos>. Acessado em: 31/05/2021. Horário: 13 h e 39 min.

MARUM, Denis. **Econômico, motor de 3 cilindros é a bola da vez para carros.** 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/carros/oficina-do-g1/noticia/2014/02/economico-motor-de-3-cilindros-e-bola-da-vez-para-carros.html>>. Acessado em: 30/05/2021. Horário: 20:22 horas.

MEGA ARQUIVO. **Mecânica:** como funciona um turbocompressor. 2011. Disponível em: <<https://megaarquivo.wordpress.com/tag/turbocompressor/>>. Acessado em: 29/05/2021. Horário: 21:38 horas.

MELO, Inácio C. **Downsizing - redução de consumo com aumento de potência e torque em motores de combustão interna.** 2014. 65f. Monografia1 (Graduação em Engenharia Mecânica) – UNIRV – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2014. Disponível: <[file:///D:/%23IANK%20ANDERSON%20\(ARQUIVOS\)/Downloads/UNIRV_UNIVERSIDADE_DE_RIO_VERDE_FACULDAD.pdf](file:///D:/%23IANK%20ANDERSON%20(ARQUIVOS)/Downloads/UNIRV_UNIVERSIDADE_DE_RIO_VERDE_FACULDAD.pdf)>. Acessado em: 26/03/2016.

MENDES, L. C. **Estudo do desempenho de motores de ignição por centelha com sobrealimentação mecânica e turboalimentação.** Universidade Federal de Uberlândia - UFU. 2017. Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC. Curso de Engenharia Mecânica. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24907/3/EstudoDesempenhoMotores.pdf>>. Acessado em: 10/05/2021. Horário: 00:24 horas.

PETROBRAS. **Diesel renovável traz mais qualidade, competição e sustentabilidade para o segmento de biocombustível no Brasil.** 2020. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/diesel-renovavel-traz-mais-qualidade-competicao-e-sustentabilidade-para-o-segmento-de-biocombustiveis-no-brasil.htm?gclid=EAIaIQobChMIzreQiZD48AIVSQuRCh2QgAZDEAAAYASAAEgJ9mvD_BwE>. Acessado em: 02/06/2020. Horário: 01 h e 59 min.

PRADO, P. I. B. **Motores Híbridos:** um estudo de custos e benefícios. Varginha, 2019. Disponível: <<http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/1228/1/Pedro%20Ivo%20Batista%20Prado.pdf>>. Acessado em: 15/06/2021. Horário: 00:02 horas.

QUATRO RODAS. **O downsizing pode afetar a durabilidade dos motores?** 2016. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/o-downsizing-pode-afetar-a-durabilidade-dos-motores/>>. Acessado em: 30/05/2021. Horário: 18:55 horas. questions&id=547> Acesso em 12 de abril de 2016.

RODRIGUES, Thiago de Matos. **Downsizing em motores de combustão interna:** uma abordagem de inovação tecnológica. São Caetano do Sul, SP: CEUN-IMT, 2014, 64p.

Disponível em: <<https://maua.br/files/monografias/completo-downsizing-motores-combustao-interna-280731.pdf>>. Acessado em: 26/03/2021.

SILVA, G. **Motores aspirados x sobrealimentados.** Canal de notícias Webmotors, 2020. Disponível em: <<https://www.webmotors.com.br/wm1/dicas/motores-aspirados-x-sobrealimentados>>. Acessado em: 14/04/2021. Horário: 22:13.

SIMÊNCIO, É. C.A. **Motores de combustão interna.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A.,



2019. 214 p. Disponível em: < http://cm-cls-content.s3.amazonaws.com/201901/INTERATIVAS_2_0/MOTORES_DE_COMBUSTAO_INTERNA/U1/LIVRO_UNICO.pdf>. Acessado em: 17/05/2021. Horário: 16:48 horas.

SIMPLO. **Entenda como funciona o turbocompressor**. 2019. Disponível em: < <https://blog.simplusbr.com/turbo-compressor>>. Acessado em: 29/05/2021. Horário: 23:34 horas.

TILLMANN, C.A.C. **Motores de combustão interna e seus sistemas**. – Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; Rede e-Tec Brasil, 2013. Disponível em: < http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf>. Acessado em: 17/06/2021. Horário: 00:16 horas.



CAPÍTULO 6

PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID) EM MECANISMO DE GARRA ROBÓTICA

DESIGN OF PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) CONTROL
SYSTEM IN ROBOTIC CLAW MECHANISM

Vinícius Duarte Santos¹

Hilton Seheris da Silva Santos²

1 Aluno Concludente do Curso de Engenharia Mecânica – Email (vinicius.duarte.santos10@gmail.com)

2 Orientador – Mestre – Email (hitonseheris@hotmail.com)

Resumo

Em várias áreas são aplicados novos dispositivos para suprir determinadas necessidades, como elevar produtividade, precisão, etc. Para que esses mecanismos possuam efetividade em suas aplicações, torna-se necessário que sejam controlados, de forma a torná-los adequados às tarefas, assim são aplicados os sistemas de controle. Um sistema de controle utilizado atualmente é o controlador proporcional integral derivativo (PID). O presente trabalho teve o objetivo de descrever as etapas do projeto de um controlador PID em um mecanismo de garra robótica, para satisfazer certos critérios pré-estabelecidos com o intuito de elevar o conforto e estabilidade do sistema. Iniciou-se os procedimentos com análises do sistema robótico, definido como um mecanismo de 4 barras, com 1 grau de liberdade (GDL). Dessa forma realizou-se a modelagem dinâmica do sistema, que consistiu nas equações do motor de corrente contínua (CC) utilizado na garra. Após encontrar as funções de transferência para o motor, simulou-se o comportamento por meio da ferramenta *Simulink*, encontrada no *MATLAB*, para analisar características principais de estabilidade do sistema. Com a identificação dos devidos ajustes, sintonizou-se o controlador PID ao sistema de forma empírica (tentativa-erro) até estabelecer valores adequados aos termos de controle, para tornar a resposta do sistema satisfatória e adequada aos critérios estabelecidos no projeto. Em seguida, analisou-se as respostas obtidas e fez-se as devidas observações. Por fim, concluiu-se que o projeto do sistema de controle satisfaz os requisitos de estabilidade, pois o sistema tornou-se eficiente para suas possíveis aplicações, e agregou conhecimento aos envolvidos.

Palavras-chave: Sistemas de controle, controlador PID, motor de corrente contínua, garra robótica.

Abstract

In several areas new devices are applied to meet certain needs, such as increasing productivity, accuracy, etc. For these mechanisms to have effectiveness in their applications, it is necessary that they are controlled, in order to make them suitable for tasks, thus the control systems are applied. A control system currently used is the proportional integral derivative controller (PID). The present work aimed to describe the stages of the design of a PID controller in a robotic claw mechanism, to meet certain pre-established criteria in order to increase the comfort and stability of the system. The procedures with robotic system analysis were initiated, defined as a 4-bar mechanism, with 1 degree of freedom (DOF). Thus, the dynamic modeling of the system was performed, which consisted of the equations of the direct current motor (DC) used in the claw. After finding the transfer functions for the engine, the behavior was simulated through the Simulink tool, found in MATLAB, to analyze the main characteristics of system stability. With the identification of the appropriate adjustments, the PID controller was tuned to the system empirically (trial-error) until establishing values appropriate to the control terms, to make the system response satisfactory and appropriate to the criteria established in the project. Then, the answers obtained were analyzed and the appropriate observations were made. Finally, it was concluded that the design of the control system satisfied the stability requirements, because the system became efficient for its possible applications, and added knowledge to those involved.

Key-Words: Control system, PID controller, direct current motor, robotic claw.



1. INTRODUÇÃO

Em diversos setores busca-se elevar a precisão e a produtividade de seus equipamentos de forma a trazer mais agilidade e qualidade na execução de determinadas atividades. No meio industrial são utilizados vários mecanismos para realizar tarefas exigidas no cotidiano, onde pode-se destacar os manipuladores robóticos que possuem diversas aplicações, alguns necessitam de maior precisão, outros precisam ser mais ágeis, suas características dependem da função que ele irá exercer. Dessa forma, para atender as necessidades e obter uma forma de controlar o sistema tornando-o mais estável de maneira que consiga ser eficiente, são projetados sistemas de controle que beneficiam o comportamento dos mecanismos.

Para projetar controladores precisa-se executar a modelagem dinâmica do sistema em questão para entender seu comportamento. A modelagem e o controle de sistemas são realizados em conjunto para entender, analisar, otimizar e automatizar o processo ou mecanismo envolvido, de forma a gerar mais produtividade e eficiência. Os sistemas de controle podem ser projetados de diversas formas, malha aberta ou malha fechada (com retroação), multivariáveis, etc.

Um controlador bastante utilizado é o proporcional integral derivativo (PID). Os controladores PID possuem funções determinadas dentro do sistema no qual é implantado, como melhorar seu desempenho, elevar sua produtividade, aumentar a precisão, torná-los adaptativos, entre outros. Por meio desse sistema de controle é possível diminuir as oscilações no sistema, corrigir o erro e entre outras vantagens.

Dessa forma, desenvolveu-se o projeto de um controlador proporcional integral derivativo (PID) em um mecanismo de garra robótica, com o intuito de adquirir todos os benefícios que são fornecidos ao sistema com a devida sintonização do controlador.

Com todas melhorias alcançadas no comportamento dos sistemas por meio do projeto e da aplicação do controlador PID nas indústrias, nota-se a importância da abordagem desse tema no meio acadêmico, onde visa-se a preparação de novos profissionais com conhecimento e especialização, tornando-os aptos a aplicar os conceitos obtidos para uso científico e atender a demanda dessa área com qualidade.

Nas seções seguintes (2, 3, 4 e 5) pode-se observar detalhadamente os conteúdos bibliográficos utilizados, as etapas de execução do projeto, os resultados obtidos e a conclusão obtida com a finalização dos procedimentos. Na seção 2 encontra-se a revisão bibliográfica de todos os assuntos abordados no projeto do controlador PID. A seção 3 demonstra os procedimentos de execução do projeto, sendo composta pela modelagem dinâmica do sistema, a construção da função de transferência para o sistema, a aplicação e sintonização do controlador de forma empírica (tentativa-erro) e as simulações do comportamento dinâmico do sistema a uma entrada degrau. Encontra-se na seção 4 os resultados, onde fez-se as análises e observação dos dados e identificou-se as melhorias obtidas por meio da sintonização do controlador PID. Na seção 5 realizou-se as considerações finais do projeto, destacando sua efetividade.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas de controle

As engenharias abrangem grandes campos de estudos na busca por compreender e controlar fatores, forças naturais e materiais, com objetivo de beneficiar a humanidade de alguma forma. Dentre as diversas engenharias temos a de controle, cujo objetivo principal é analisar, entender, modelar otimizar processos ou dispositivos por meio de alguns métodos de controle, essa área beneficia principalmente o meio industrial, que busca constantemente elevar a produtividade com eficiência e qualidade por meio da automação das máquinas e processos (DORFE BISHOP, 2018).

De acordo com Ogata (2010), os sistemas de controle possuem atualmente grande importância na área da engenharia e ciências, por conta de seu papel principal no desenvolvimento de sistemas robóticos, espaciais, controladores de temperatura, pressão, vazão, entre outros. Para Nise (2017), algumas das principais razões para projetar sistemas de controle são a capacidade de amplificar a potência, a possibilidade de controle remoto, a compensação de perturbações no sistema.

O sistema de controle se dá por um conjunto de componentes e etapas de processamento desenvolvidos para que, por fim, obtenha-se o sinal resposta esperado, para um sinal de entrada específico (NISE, 2017).

Alguns sistemas possuem em sua estrutura um mecanismo de realimentação, ou retroação. O controle com realimentação faz a leitura do sinal de saída (resposta obtida) e o relaciona com a entrada (resposta esperada), de forma que a diferença, denominada como erro, é utilizada para aproximar o resultado real do resultado esperado (OGATA, 2010).

A entrada e a saída do sistema representam uma espécie de causa e efeito, de modo que o sinal de entrada é processado para então fornecer um sinal de saída variável (DORFE BISHOP, 2018). Alguns conceitos importantes para se adquirir são sobre processos, sistemas, perturbações e controle com realimentação.

Os processos são um conjunto de ações ou etapas elaboradas e esquematizadas de forma a atingir um objetivo predeterminado. As operações a serem controladas podem ser denominadas processos. Já os sistemas são componentes que trabalham em conjunto para atingir os fins estabelecidos. Porém há alguns fatores que influenciam a variável de saída do sistema, ou seja, o objetivo final, esses fatores denominam-se perturbações, podem acontecer dentro do sistema, distúrbios internos, ou fora do sistema, distúrbios externos (OGATA, 2010).

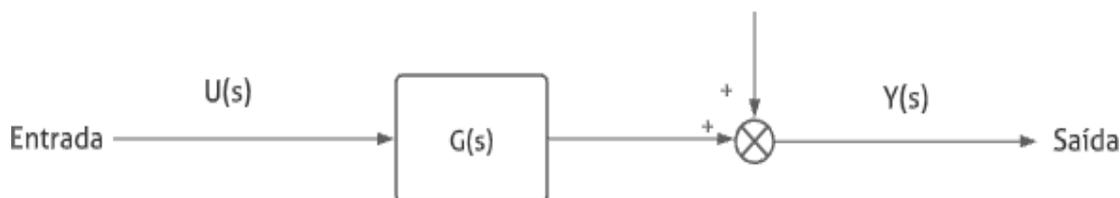
Tendo em vista esses fatores, são desenvolvidos métodos para aproximar o valor de resposta desejada (entrada) do valor da resposta real (saída), denominado de controle com realimentação. Esse processo registra a saída do sistema e o relaciona com o sinal de entrada, e então utiliza a diferença obtida para corrigir as alterações ocasionadas pelo distúrbio (OGATA, 2010).

Um processo simples, sem controle, ocorre de maneira que é fornecido um sinal de



entrada para ser processado e então é gerado o sinal de saída, podemos observar sua estrutura na figura 1, onde $U(s)$ representa a entrada, $G(s)$ é a função de transferência do processo e $Y(s)$ é a resposta.

Figura 1 – Processo sem controle
Perturbações



Fonte: Adaptado de NISE (2017)

Esse processamento pode ocorrer por meio de um sistema de malha aberta ou malha fechada. Um sistema de controle de malha aberta possui uma estrutura simples, pode ser vista na figura 2, onde, entre a entrada de referência ($R(s)$) e o processo ($G(s)$), é colocado um transdutor e um controlador ou atuador de controle, que gera um sinal controlado ($U(s)$), para assim conseguir a resposta desejada ($C(s)$). O transdutor serve para converter o sinal de entrada para o formato utilizado pelo controlador e o controlador é quem comanda o processo a ser executado. Nesse sistema, o sinal de saída não exerce nenhuma função que contribua com o controle do sistema (NISE, 2017).

Figura 2 – Sistema de controle de malha aberta com transdutor
Perturbações



Fonte: Adaptado de NISE (2017)

A malha aberta possui uma clara desvantagem, referente a correção de erros encontrados, que resulta em uma resposta do sistema não muito precisa quando sujeito a alterações externas ou internas. Essa deficiência se dá por conta que o sistema não é capaz de efetuar ajustes quando submetido a perturbações (NISE, 2017).

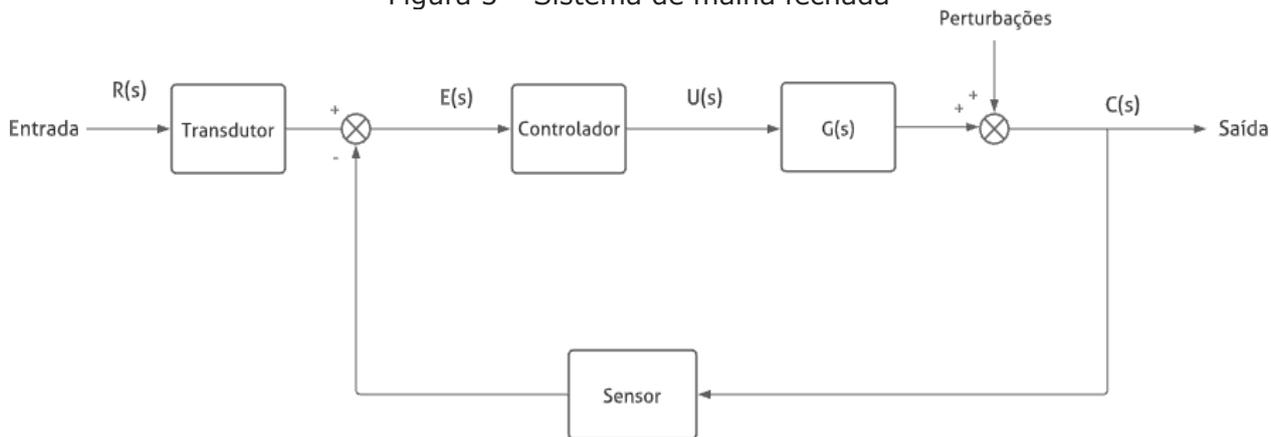
Diferente da malha aberta, no sistema de controle por malha fechada utiliza-se o sinal de saída para compará-lo com a resposta desejada, nesse processo a saída é chamada de sinal de retroação, ou realimentação. Um sistema com retroação faz a comparação entre a entrada e a saída do sistema, e então utiliza a diferença para controlar (ajustar) o processo, geralmente usa-se um sensor para essa tarefa. Essa operação também é conhecida como malha de realimentação (NISE, 2017).

O sensor é aplicado com a intenção de conduzir e controlar a resposta do sistema para torná-la mais próxima possível do resultado ideal esperado. O sensor realiza a medição da saída e então realimenta o sistema com o objetivo de regular o valor encontrado, ou seja, efetua ações corretivas para compensar as perturbações ocorridas (SOLOMAN, 2012).

Dessa forma, por conta da adaptação do sistema de malha fechada para reduzir os erros no sistema, a resposta final acaba sendo mais precisa quando comparada a um sistema de malha aberta (NISE, 2017). Um esquema simples de um sistema de malha fechada, pode ser observado na figura 3. Nesse caso, além dos sinais já conhecidos, surge

também o sinal de erro ($E(s)$).

Figura 3 – Sistema de malha fechada



Fonte: Adaptado de NISE (2017)

O sistema de malha fechada é mais eficiente por conta de sua composição tornar possível uma obter uma exatidão maior no resultado final, logo é mais utilizado no desenvolvimento de robôs, veículos autônomos, dispositivos aeroespaciais, etc. (NISE, 2017).

2.1.1 Sistemas de controle com retroação

Um sistema de controle com retroação possui como estrutura um conjunto de malha fechada. Por meio de um sensor obtém-se o sinal de saída real do sistema, e então calcula-se o erro por meio da diferença entre o sinal de saída real e a saída desejada. E então o dispositivo de controle age de forma a fazer o atuador controlar o processo de maneira que reduza o erro obtido (DORF E BISHOP, 2018).

Segundo Ogata (2010) a relação estabelecida entre os dados a fim de gerar uma diminuição do erro, pode acabar afetando a estabilidade do sistema por conta de compensações feitas além do necessário, esses excessos acabam gerando oscilações com amplitude variável ou constante. Apesar disso, de acordo com Nise (2017), os sistemas com retroação apresentam uma exatidão maior e possuem uma sensibilidade menor a ruídos e perturbações.

O intuito da utilização de um sistema com retroação parece simples, porém, além da redução dos erros, a realimentação do sistema possui uma complexidade maior, pois também afeta em outros aspectos do sistema, como estabilidade, sensibilidade, entre outros (GOLNARAGHI E KUO, 2012).

2.2 Critérios de estabilidade de um sistema

No projeto de sistemas de controle é necessário estabelecer e analisar características do comportamento adequado para o sistema. Dependendo de uma entrada efetuada o sistema se comporta de um modo e deve ser avaliado para constatar se este irá suprir a

funcionalidade desejada. Dessa forma alguns dos critérios principais adotados para analisar o comportamento de um sistema de controle são o sobressinal (*overshoot*), o tempo de acomodação (t_s) e o erro estacionário (e_{ss}) (OGATA, 2010).

2.2.1 Sobressinal do sistema

O sobressinal (M_p) geralmente é dado em porcentagem e corresponde ao valor de alcance do pico de oscilação da resposta do sistema. Esse parâmetro serve para definir o limite máximo que o sistema pode oscilar de forma controlada. Ele indica a estabilidade relativa do sistema e é definido pela equação 1 (OGATA, 2010):

$$M_p = \frac{c(t) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (1)$$

Segundo Nise (2017), também é conhecido como ultrapassagem equivale ao valor alcançado no instante de pico, sendo descrito como uma porcentagem do valor em regime permanente.

2.2.2 Tempo de acomodação do sistema

O período de tempo necessário que o sistema leva para suas oscilações serem amortecidas e se estabilizar próximas do valor de referência é chamado de tempo de acomodação ou correção (T_s) (NISE, 2017).

Ao fim desse período geralmente os valores permanecem em uma faixa de 2% ou 5% por volta do valor de referência por tempo indeterminado. Essa porcentagem utilizada para estabelecer o erro deve-se ser definida a partir das necessidades do projeto a ser desenvolvido (OGATA, 2010).

2.2.3 Erro estacionário do sistema

O erro estacionário é definido pela faixa em que varia o sinal estabilizado do sistema. Para vários projetos geralmente esse erro possui uma margem de 2% ou 5%, dependendo das características do projeto (NISE, 2017).

De acordo com Ogata (2010), pode-se também representar esse erro por meio do seguinte teorema na equação 2:

$$e_{ss} = \frac{s}{1 + G(s)} R(s) \quad (2)$$



2.3 Sistema de Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)

O controlador PID é um sistema de controle que possui três termos para estabilizar o sistema, de modo que seu sinal de resposta mais suave e próximo da entrada de referência. Esses termos ou modos são o proporcional, o integral e o derivativo, cada um possui sua função específica e podem ser aplicados de formas separadas (NISE, 2017).

2.3.1 Sistema de controle proporcional (P)

Para efetuar o controle do comportamento de sistemas pode-se introduzir uma constante K_p equivalente a um amplificador, onde aplica-se um fator de multiplicação ao erro do sistema ($E(s)$). Esse valor de K_p é chamado de ganho proporcional, onde quanto maior ele é, menor é o erro estacionário (e_{ss}) (OGATA, 2010).

Ao inserir o ganho no sistema, além de reduzir o erro estacionário, ocorrem outras alterações no sistema que podem não ser satisfatórias, como o aumento das oscilações no sistema (*overshoot*) e a demora para corrigir o erro (tempo de correção ou tempo de acomodação), com isso devem ser adotadas outras medidas para corrigir os problemas (CARVALHO, 2000).

Segundo Ogata (2010), para alguns casos de sistemas marginalmente estáveis, o valor de K_p é restrito a um certo aumento, pois se exceder o limite pode mover os polos de forma a tornar gerar a instabilidade do sistema.

2.3.2 Sistema de controle proporcional integral (PI)

O controlador integral é utilizado como forma de reduzir significativamente o erro estacionários, de forma a torná-lo nulo ou aproximá-lo ao máximo de zero (OGATA, 2010). O controlador integral é dado pela seguinte equação de transferência na equação 3:

$$K_i = \frac{1}{T_i s} \quad (3)$$

Com a aplicação do controle proporcional integral obtemos a equação de transferência do sistema de controle, sendo a equação 4:

$$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (4)$$

Onde:

T_i = tempo de integração;

K_p = ganho proporcional.



O termo integral beneficia o sistema pois, como dito, ele busca eliminar o erro estacionário, porém, para realizar essa correção também gera um aumento do tempo de acomodação do sistema, ou seja, o sistema leva mais tempo para alcançar o erro estacionário desejado (CARVALHO, 2000).

2.3.3 Sistema de controle proporcional derivativo (PD)

Além dos controles visto anteriormente, há também o controle derivativo que é aplicado com o intuito de trazer mais estabilidade ao sistema. O controle derivativo possui a função de reduzir a o sobressinal do sistema, ou seja, torná-lo mais estável, e diminuir o tempo de acomodação (OGATA, 2010). O controlador derivativo é definido pela equação 5 a seguir:

$$Kd = T_d s \quad (5)$$

Quando se utiliza o controlador proporcional derivativo, obtém-se a função de transferência vista na equação 6:

$$Kp(1 + T_d s) \quad (6)$$

Onde:

T_d = tempo derivativo

Segundo Carvalho (2000), a inclusão do termo derivativo torna o sistema mais cauteloso até mesmo diante de pequenos erros, dessa forma é possível reduzir o valor de sobressinal e o tempo de acomodação.

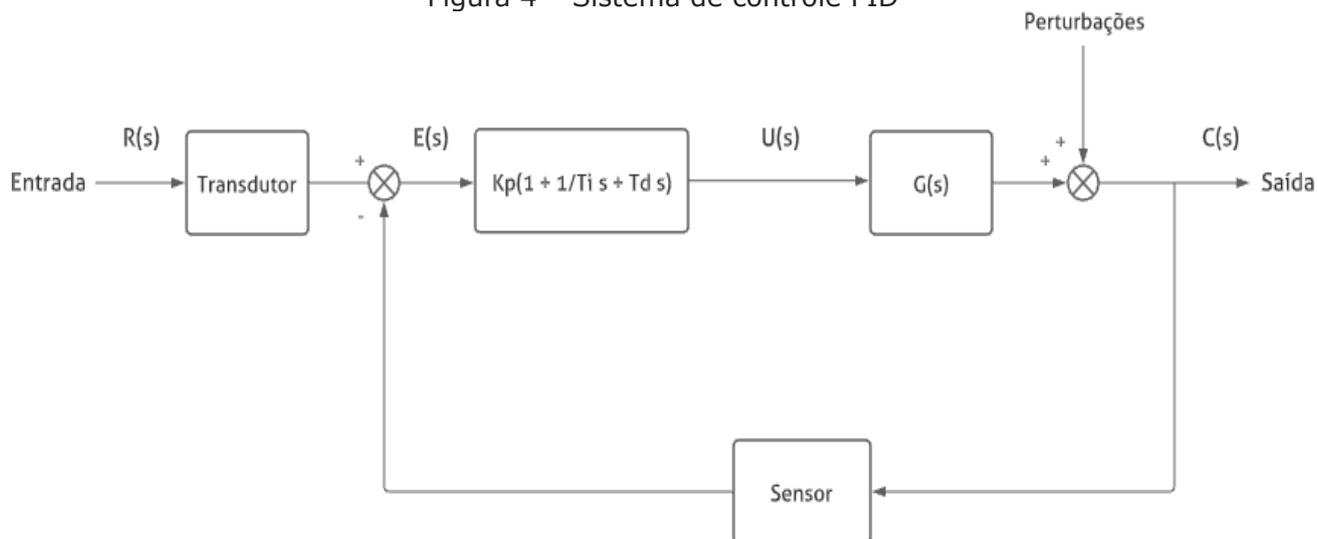
2.3.4 Sistemas de controle proporcional integral derivativo (PID)

O controlador PID, também conhecido como controle de três termos, é dado por um controlador que possui os 3 modos de controle, o proporcional, o integral e o derivativo. Cada termo executa sua tarefa específica, porém em conjunto, dentro um sistema de malha fechada, de forma que exercem ações a fim de tornar o processo estável e eficiente. Esse resultado é obtido a partir da definição dos valores corretos para os parâmetros Kp , Ki , Kd que satisfaçam os critérios estabelecidos no projeto (OGATA, 2010).

No controle proporcional (P), é introduzido um ganho ao sistema que multiplica o sinal do erro a fim de reduzir o erro estacionário do sistema, quanto maior o ganho, menor será o erro estacionário. O termo integral (I) é utilizado a fim de tornar o erro nulo, levando em consideração referências constantes ou distúrbios no sistema. Por fim, o termo derivativo (D) é responsável por elevar a estabilidade e disponibilizar uma boa resposta dinâmica. Com a utilização do controle integral aumenta-se o tipo do sistema, dessa forma é possível desprezar perturbações constantes. Já o controlador derivativo (D) tem a função de equi-

librar a resposta do sistema quando são submetidas perturbações repentinas (FRANKLIN *et al.* 2013). Um esquema simples de um controlador PID é mostrado na figura 4.

Figura 4 – Sistema de controle PID



Fonte: Adaptado de OGATA (2010)

Segundo Nise (2017), os controladores PID são utilizados para elevar o desempenho do sistema em que foi implantado, podendo ser utilizado todos os termos em um sistema, como por exemplo um controlador PI ou PD.

2.4 Modelagem de um sistema dinâmico

Dorf e Bishop (2018) dizem que para entender um sistema físico é necessário realizar procedimentos para obter sua resposta dinâmica. Os procedimentos efetuados são geralmente a modelagem matemática, análises e simulações. A construção do modelo matemático do sistema é realizada por meio da descrição das relações estabelecidas entre as variáveis de um determinado sistema. Esse processo colabora de grande forma no projeto, pois possibilita entender suas características dinâmicas. Os sistemas estudados geralmente possuem componentes (elétricos, mecânicos, etc.) e subsistemas que atuam em conjunto.

Kleuver (2018) diz que a modelagem dinâmica consiste em determinar o comportamento do sistema por meio de equações matemáticas obtidas com a aplicação das leis físicas fundamentais do conjunto em questão. A partir disso é construído o modelo matemático, que normalmente é composto por equações diferenciais ordinárias (EDO).

Sendo essas equações lineares ou não lineares, suas análises podem ser feitas por meio de ferramentas computacionais ou cálculos, com o intuito de obter as respostas do sistema e poder determinar os parâmetros adequados do sistema, com a finalidade de melhorar seu desempenho (KLEUVER, 2018).

Para realizar os cálculos da modelagem em um projeto, normalmente desconsidera-se algumas características não lineares (como folgas) para assim desenvolver um modelo linear, visto que trabalhar com a não linearidade eleva a complexidade para modelagem e

entendimento do comportamento do sistema (KLEUVER, 2018).

Os resultados obtidos por meio do modelo matemático são aproximações válidas desde que sejam satisfeitos os critérios e hipóteses estabelecidos especificamente para o caso.

No caso do motor CC (motor de corrente contínua), temos um sistema eletromecânico onde a energia elétrica é convertida em energia mecânica.

2.5 Representação em espaço de estado

Para realizar as simulações computacionais dos sistemas, geralmente utilizam-se as representações do sistema em espaço de estado (REE). Geralmente os modelos matemáticos de um sistema linear possuem sua REE formada por EDOs de primeira ordem. Essa representação nada mais é do que a descrição do modelo na forma de uma matriz-vetor adequada, onde pode tornar-se um sistema de ordem mais alta (KLEUVER, 2018).

De acordo com Nise (2017), a representação em espaço de estado de um sistema é dada pelas equações 7 e 8, exibidas a seguir:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (7)$$

$$y = Cx + Du \quad (8)$$

Onde:

x = vetor de estado

\dot{x} = derivada do vetor de estado em relação ao tempo;

y = vetor de saída;

u = vetor de entrada ou vetor de controle;

A = matriz do sistema;

B = matriz de entrada;

C = matriz de saída;

D = matriz de transmissão direta.



2.6 Função de Transferência

Ogata (2010) diz que uma função de transferência (FT) é definida pela razão entre a transformada de Laplace da saída e da entrada de um sistema. Assim, essa função é uma forma eficiente para representar a relação entre causa e efeito de um sistema dinâmico. Na equação 9 é representada a FT considerando as condições iniciais nulas.

$$L[\text{saída}]F(t) = G(s) = L[\text{entrada}] \quad (9)$$

A função de transferência pode ser definida somente para um sistema linear e estacionário, pois não é possível aplicar a transformada de Laplace em sistemas não estacionários (variantes no tempo) (MANO, 2017).

2.7 Mecanismo da garra robótica

Os mecanismos robóticos são utilizados em diversas áreas com o objetivo de tornar processos mais dinâmicos e eficientes. Segundo Mataric (2014) um robô pode ser definido como um sistema, existente no mundo físico, que possui autonomia, podendo sentir e agir sobre determinado ambiente com o almejoando determinados objetivos.

Dessa forma, temos que os manipuladores robóticos são dispositivos cuja função é orientar e situar adequadamente a ferramenta localizada na sua extremidade. No caso de um braço robótico, geralmente sua extremidade é composta por uma garra. Assim o manipulador deve guiar a garra para que ela realize sua tarefa de maneira correta. A garra robótica é posicionada por meio do movimento gerado pela ação do motor CC que cada junta do mecanismo possui (PIMENTA, 2003).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No desenvolvimento do projeto foram executadas algumas etapas para concluir a construção do sistema de controle de forma organizada e eficiente. Assim buscou-se otimizar o tempo disponível para que todas as tarefas fossem bem trabalhadas, evitando possíveis erros por conta da falta de atenção. Os procedimentos realizados consistiram principalmente em análises, cálculos matemáticos e simulações computacionais para obter os resultados do comportamento do sistema controlado, e efetuar análises dessa resposta.



3.1 Construção do Modelo Dinâmico do Sistema

Iniciou-se o projeto com a modelagem dinâmica da garra robótica, sendo essa um mecanismo de 4 barras que possui somente 1 grau de liberdade (GDL). Sendo assim, o estudo foi realizado somente de 1 junta, logo, a modelagem dinâmica é apenas do motor CC responsável pelo movimento da garra (DEMASI, 2012). Pode-se ver a garra robótica na figura 5.

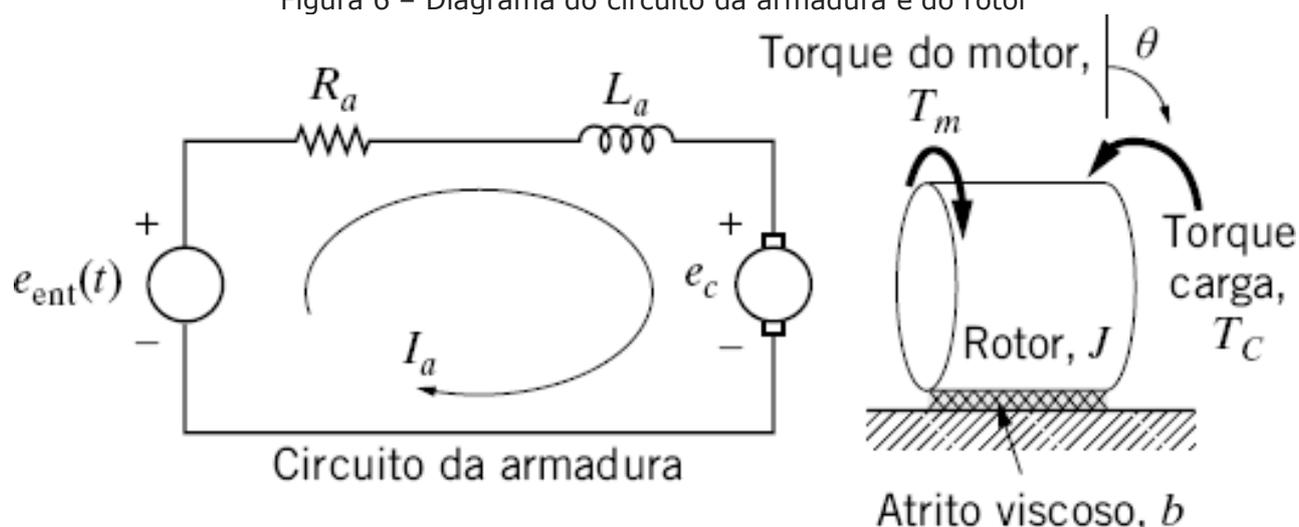
Figura 5 – Garra robótica



Fonte: Autor (2021)

Um esquema do motor CC onde demonstra o diagrama do circuito elétrico da armadura do motor e do rotor pode ser observado na figura 6.

Figura 6 – Diagrama do circuito da armadura e do rotor



Fonte: Kleuver (2018)

A modelagem do motor CC consiste em 2 funções de transferência (FT), uma da parte mecânica e outra da parte elétrica, utilizando o princípio da Lei de Newton para a mecânica e da Lei de Kirchhoff para a parte elétrica. Assim é possível estabelecer as equações que regem o comportamento do sistema. As EDOs que descrevem adequadamente

os parâmetros do motor CC são a equação 10 e a equação 11, sendo respectivamente a equação do sistema elétrico e a equação do sistema mecânico (KLEUVER, 2018).

$$L_a \dot{I}_a + R_a I_a = e_{ent}(t) - K_b \omega \quad (10)$$

$$J\dot{\omega} + b\omega = K_m I_a - T_c \quad (11)$$

Onde:

L_a = indutância da bobina da armadura;

I_a = Corrente da armadura;

R_a = Resistência da armadura;

$e_{ent}(t)$ = Fonte de tensão da armadura;

K_b = tensão induzida ou constante de contrafem;

J = momento de inércia do rotor;

b = coeficiente de atrito viscoso;

K_m = constante de torque do motor;

T_c = Torque carga;

ω = velocidade angular.

Por meio da equação 9 é possível obter a função de transferência dos componentes elétricos, representada na equação 12:

$$F(t)_e = \frac{1}{L_a s + R_a} \quad (12)$$

Onde:

L_a = indutância da armadura do motor;

R_a = resistência da armadura do motor.

Já para a parte mecânica, por meio da equação 10, temos a seguinte expressão FT exibida na equação 13:

$$F(t)_m = \frac{1}{J s + b} \quad (13)$$



Onde:

J = momento de inércia do rotor;

b = coeficiente de atrito.

O motor CC é um sistema de segunda ordem, e além dessas duas funções, o motor CC também conta com o valor de duas constantes denominadas K_m e K_p , que são respectivamente a constante de torque do motor e a constante de contrafem (OGATA, 2010). A constante de contrafem no motor CC é quem faz a realimentação do sistema de malha fechada, para assim corrigir erros do sistema.

Para encontrar o valor K_p deve-se utilizar a equação 9 e, considerando o motor em regime permanente, pode-se considerar que $\frac{di}{dt} = 0$. Dessa forma o termo é anulado, mostrado na equação 14 e 15 (RUSSOLO, 2011):

$$V = K\theta + RI + L \frac{di}{dt} \quad (14)$$

$$V = K\dot{\theta} + RI \quad (15)$$

Dessa forma, é correto dizer que se calcula o K_p por meio da seguinte expressão demonstrada na equação 16:

$$K_p = \frac{V(t) - R \cdot i(t)}{\omega(t)} \quad (16)$$

Já para calcular K_m , de acordo com Russolo (2011), é necessário o cálculo utilizando como base o atrito viscoso e a corrente de armadura, mas sabe-se que as constantes K_m e K_p possuem o mesmo valor. Logo se determinarmos o valor de uma não é necessário calcular a outra.

Segundo Ogata (2018), um sistema de segunda ordem pode ser representado em uma forma padrão como exibido na equação 17:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (17)$$

A partir dos dados obtidos foi montado o diagrama dinâmico do sistema, com o auxílio da ferramenta *simulink* disponibilizada no *software MATLAB*.

3.2 Construção do Modelo Dinâmico Via *Simulink*

A simulação consiste em um meio de analisar processos por meio de cálculos computacionais, projetando assim o possível comportamento de um sistema e disponibilizando os dados obtidos para eventuais análises. Para esse procedimento utilizou-se o

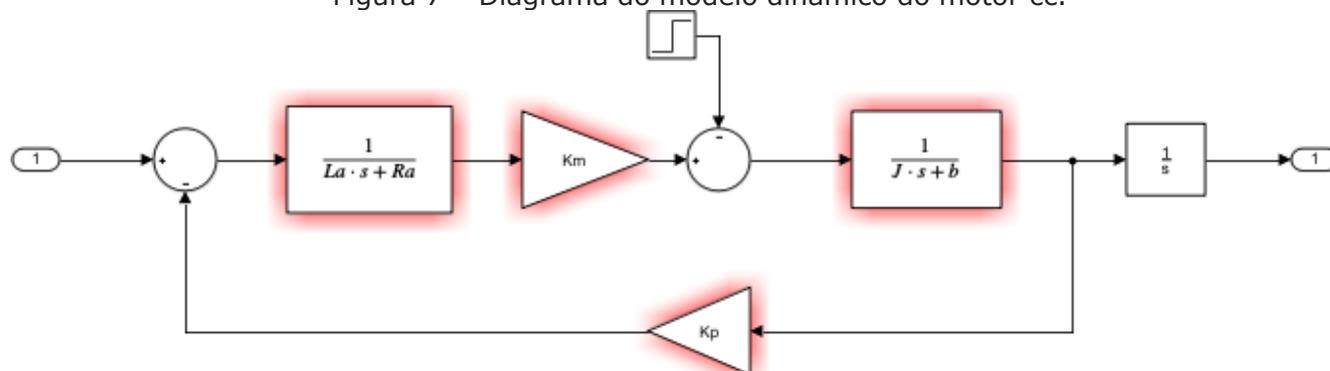


MATLAB (Matrix Laboratory). Pode-se defini-lo brevemente como um programa que trabalha principalmente com matrizes. Nele é possível descrever problemas utilizando termos semelhantes aos utilizados na matemática convencional, para então, por meio de cálculos computacionais, serem solucionados. Entre as funcionalidades do *MATLAB*, destacam-se a realização de modelagens matemáticas, análises de dados, visualização dos resultados, prototipação, simulação, entre outros (MATSUMOTO, 2013).

Dentro do *software* existem várias ferramentas utilizadas constantemente por profissionais e estudantes, onde uma delas é o *simulink*. De acordo com Palm III (2013), ele consiste em uma ferramenta que possibilita realizar a modelagem de sistemas ou processos mais complexos. Em seu ambiente de interação é disponibilizado ao usuário componentes (blocos) diversos que representam possíveis variáveis da representação dinâmica do sistema, como entradas degrau, impulso, ganhos, etc. Dessa forma, o usuário escolhe os blocos específicos para seu modelo, onde define-se a equação ou variável responsável pelo valor daquele componente.

No projeto do controlador PID foram definidos os blocos adequados para cada parâmetro e equação, dessa forma obteve-se o modelo dinâmico do sistema, ou seja, do motor cc. Utilizou-se a função de transferência da armadura do motor ($F(t)_e$), a constante de torque do motor (K_m), uma entrada degrau do torque (T), a função de transferência mecânica do motor ($F(t)_m$) e a constante de contrafem (K_p). O sinal de referência do sistema é uma entrada degrau e a resposta dinâmica seria a velocidade angular, porém, o objetivo era obter a posição, então foi inserido um bloco de integração da resposta do sistema, assim obteve-se o dado desejado. O modelo do sistema pode ser observado na figura 7.

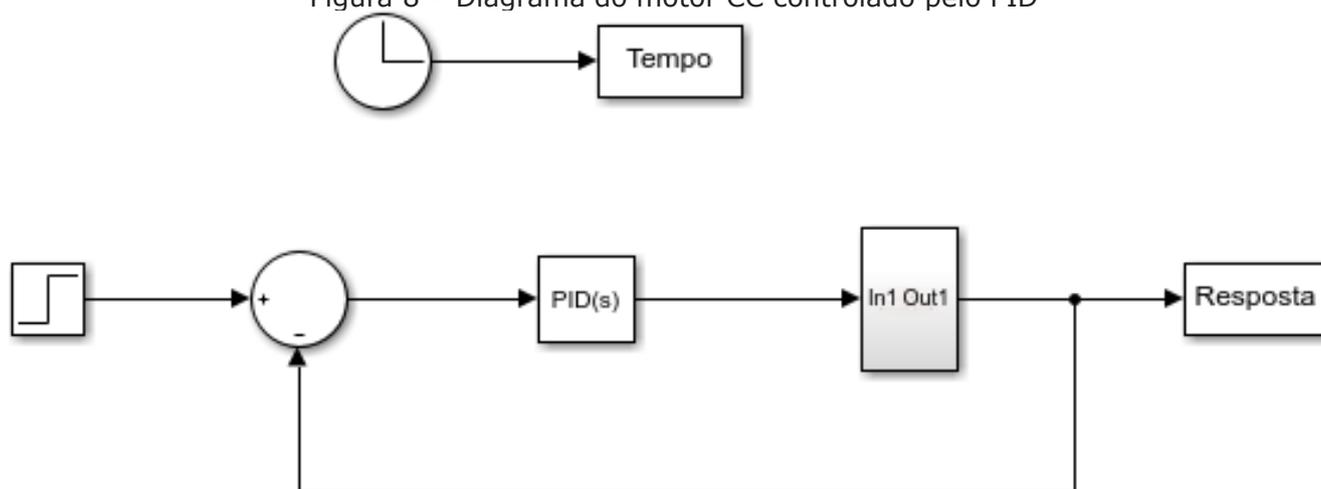
Figura 7 – Diagrama do modelo dinâmico do motor cc.



Fonte: Autor (2021)

Após a modelagem do motor CC, inseriu-se o controlador PID ao diagrama, dessa forma o modelo do motor passou a ser um subsistema. Fez-se então o sistema de malha fechada que é formado pela entrada degrau, controlador PID, motor CC, resposta e malha de realimentação. Além disso, introduziu-se o bloco de tempo para obter a variação da posição durante um determinado período. A figura 8 demonstra o diagrama completo.

Figura 8 – Diagrama do motor CC controlado pelo PID



Fonte: Autor (2021)

Após construir o modelo do controlador para simulação, é necessário definir os valores para cada termo utilizado. Nota-se na figura 5 que alguns blocos possuem um sombreado avermelhado, isso nada mais é que um aviso de irregularidade que, no caso, se dá pela falta dos valores das variáveis. Então para corrigir e dar prosseguimento ao projeto, buscou-se os dados dos parâmetros do motor CC.

Pela dificuldade em calcular os dados específicos do motor, adotou-se os valores disponibilizados por Franklin *et al.* (2014) para projetos de controladores com motor CC. Esses parâmetros podem ser observados no quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros do motor CC

Parâmetro	Valor	Unidade
J	$1,13 \times 10^{-2}$	$N \cdot m \cdot s^2 / rad$
b	0,028	$N \cdot m \cdot s / rad$
R	0,45	Ohms
L	10^{-1}	henry
K_m	0,067	$N \cdot m / amp$
K_p	0,067	$volt \cdot s / rad$

Fonte: Franklin *et al.* (2014)

Tendo todos os parâmetros, basta inserir os valores corretos de cada termo no *MATLAB*, para realizar a simulação do comportamento do sistema, tendo em vista obter a resposta como a variação da posição em um determinado período de tempo, para assim analisar a estabilidade do sistema.

3.3 Critérios de estabilidade do sistema

Com o intuito de restringir o comportamento do sistema de forma a torná-lo adequado ao projeto, foram estabelecidos os parâmetros de controle que tem como função estabilizar o sistema. Desse modo, o erro estacionário foi adotado como 5%, o tempo de acomodação ideal é abaixo de 3s, e o *overshoot* possui o limite de 15%. Essas porcentagens são calculadas com base no valor de referência.

Esses critérios de estabilidade são definidos com base também na aplicação do sistema envolvido. No caso, a garra robótica possui o uso principalmente acadêmico, logo

não se necessita de parâmetros precisos, porém devem ser adequados para que ela possa executar de forma eficiente os movimentos para manipulação de pequenos objetos.

3.4 Sintonização do Controlador PID

A sintonização do controlador proporcional integral derivativo pode ser realizada por diversos métodos, um dos mais utilizados é o de Ziegler Nichols. Porém, nesse projeto o controlador foi sintonizado de forma empírica (tentativa e erro) até que o sistema se adequasse aos critérios pré-estabelecidos.

3.5 Simulação do comportamento dinâmico do sistema

Para simular o comportamento do sistema definiu-se no *MATLAB* os valores para cada parâmetro das equações de transferência do sistema, e foi especificado o período de tempo em que se deve exibir o comportamento do sinal de resposta. É necessário que esses dados sejam adequados para que a simulação represente de forma eficiente a dinâmica do sistema. Pode-se observar na figura 9 o cadastro dos dados adotados para o motor CC, esses valores foram disponibilizados anteriormente no quadro 1.

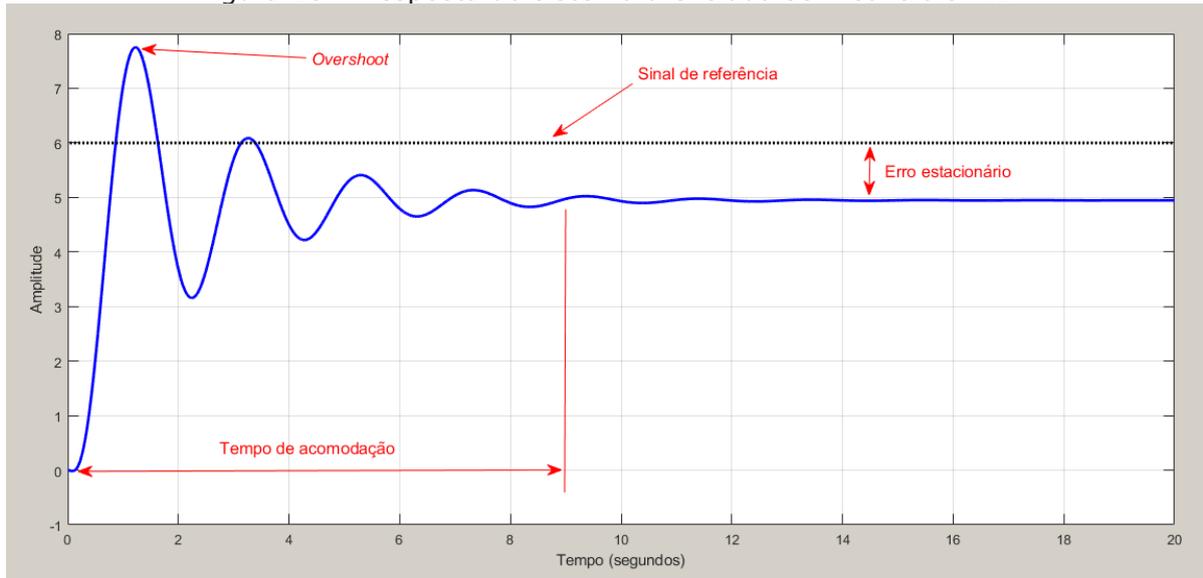
Figura 9 – Cadastro dos valores das variáveis

```
Command Window
>> J=0.0113;
>> b=0.028;
>> Ra=0.45;
>> La=0.1;
>> Km=0.067;
>> Kp=Km;
fx >>
```

Fonte: Autor (2021)

Para uma entrada degrau de 6 V para o servomotor, foi estabelecido o torque aproximado de 0,157 N.m. Com isso, simulou-se o comportamento do sistema inicialmente com o ganho proporcional de 1, ou seja, sem ação do controle PID. Obteve-se a resposta exibida na figura 10. Para cada simulação foi definido um intervalo de tempo específico para que possibilitasse uma melhor análise do comportamento do sinal de resposta.

Figura 10 – Resposta do sistema a entrada sem controle PID



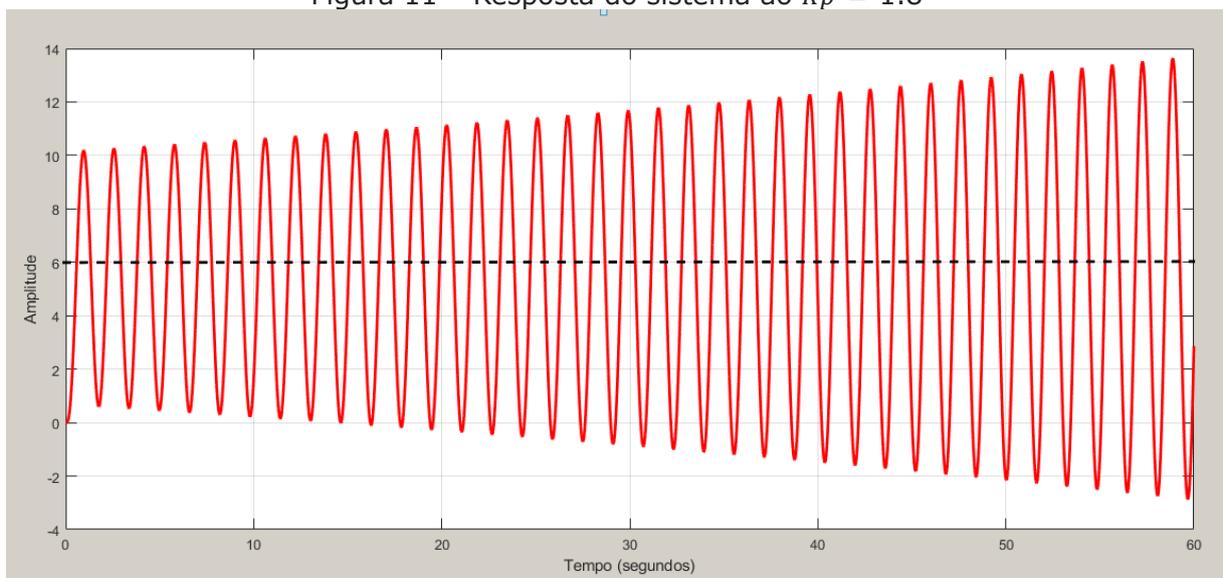
Fonte: Autor (2021)

Com esse gráfico pode-se observar que as oscilações no sistema possuem um *overshoot* maior próximo a 8 V e um erro estacionário de aproximadamente 17%, a linha pontilhada destaca o sinal de referência (6 V). Além disso, o estudo foi feito com um período máximo de 20s e nota-se que o sistema só estabiliza em torno de 9s.

Partindo dessas características, sabemos que é preciso reduzir o erro estacionário e o tempo de acomodação. Isso é realizado principalmente por meio dos termos K_i e K_d .

Com o objetivo analisar e entender o comportamento do sistema, aumentou-se o ganho proporcional. Essa mudança também foi feita a fim de tentar reduzir o erro estacionário e obter uma margem para manipular os outros termos para estabilizar o sistema de maneira eficaz. Para fazer uma observação mais detalhada, foi estabelecido o período de simulação de 60s. Com isso obteve-se a resposta exibida na figura 11 para o $K_p = 1.8$.

Figura 11 – Resposta do sistema ao $K_p = 1.8$

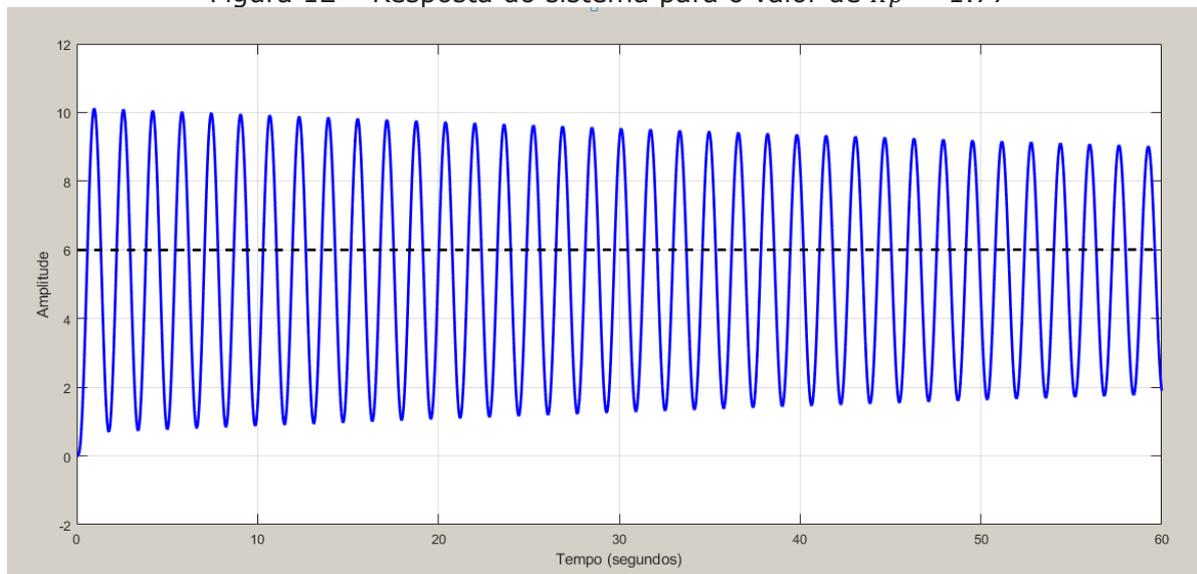


Fonte: Autor (2021)

Assim notou-se que acrescentando somente o termo proporcional equivalente a 1.8, gerou-se uma instabilidade no sistema, dessa forma definiu-se outro valor para o ganho

a fim de estabilizar o sistema novamente, porém continuando com oscilações elevadas. Assim, inseriu-se o valor de 1.77 ao sistema, para analisar o comportamento do sinal de resposta. A resposta obtida é demonstrada na figura 12.

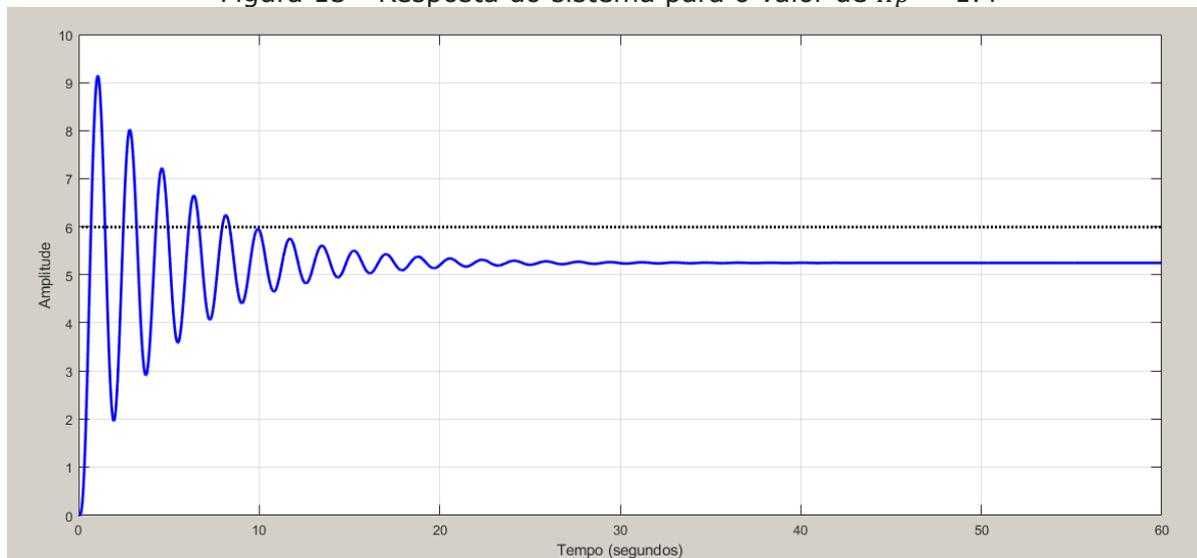
Figura 12 – Resposta do sistema para o valor de $K_p = 1.77$



Fonte: Autor (2021)

Demonstrou-se o comportamento do sistema dessa forma, logo, para facilitar a análise reduziu-se um pouco mais o valor do ganho proporcional, a fim de que o comportamento seja claro no intervalo de 60s. O valor utilizado foi de $K_p = 1.4$. O comportamento do sistema é exibido na figura 13.

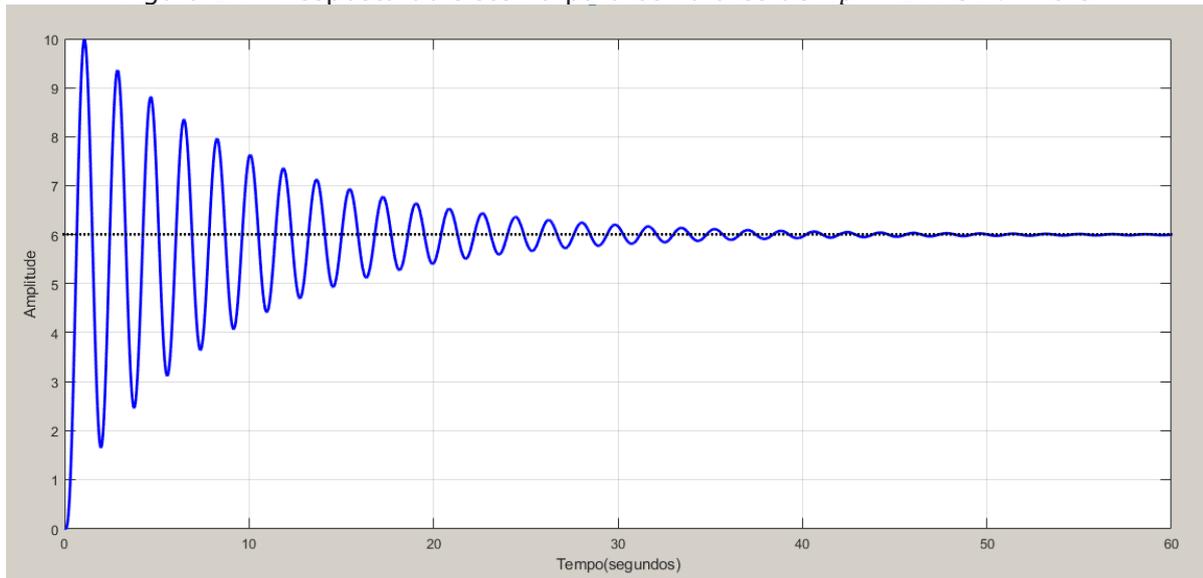
Figura 13 - Resposta do sistema para o valor de $K_p = 1.4$



Fonte: Autor (2021)

Com essa resposta do sistema nota-se que o sistema possui algumas alterações. Então inseriu-se o termo integral com o objetivo de reduzir ou eliminar o erro estacionário. A mudança no sistema pode ser observada na figura 14. Foi utilizado inicialmente o parâmetro $K_i = 0.3$.

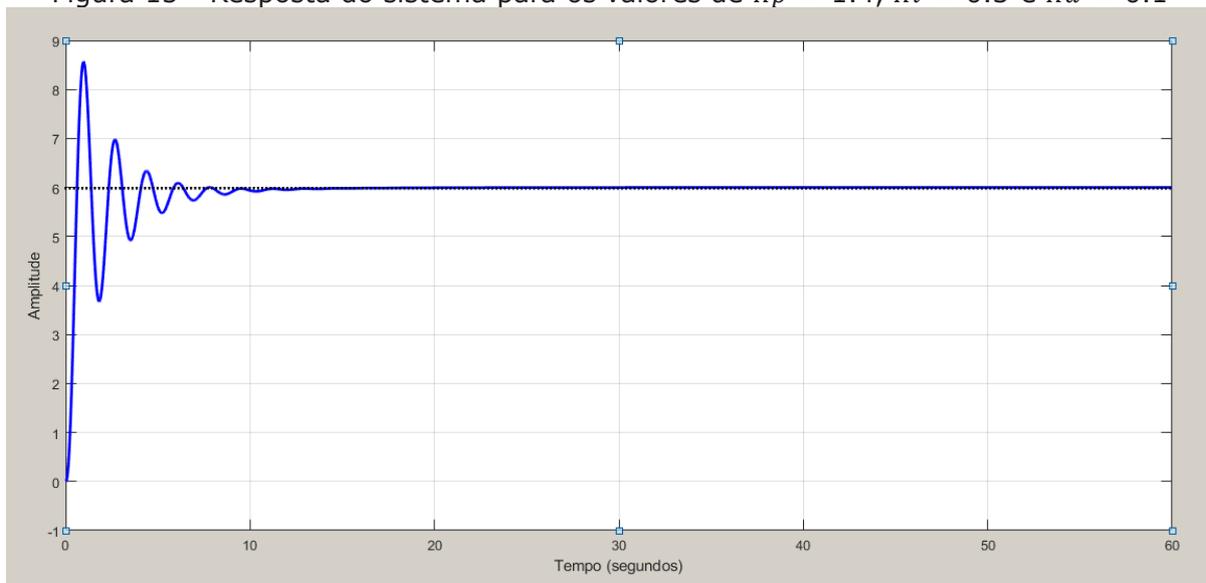
Figura 14 - Resposta do sistema para os valores de $K_p = 1.4$ e $K_i = 0.3$



Fonte: Autor (2021)

Obtendo esse resultado, introduziu-se o termo derivativo ao processo de controle do sistema com o intuito de amortecer as oscilações e reduzir o tempo de acomodação. Dessa forma, após definir os três termos, o controlador ficou no formato PID. A figura 15 demonstra o comportamento do sistema com o controle proporcional integral derivativo.

Figura 15 - Resposta do sistema para os valores de $K_p = 1.4$, $K_i = 0.3$ e $K_d = 0.1$



Fonte: Autor (2021)

Após concluir a etapa inicial de definição de todos os termos do controlador, realizou-se diversas variações dos valores de forma a configurar o comportamento do sistema para que se tornasse estável e com parâmetros que pudessem satisfazer os critérios estabelecidos no projeto. Assim foram feitas algumas simulações até encontrar os valores corretos até obter o comportamento adequado para o sistema em questão.

4. RESULTADOS

Realizou-se as análises tendo como base os critérios estabelecidos no projeto do controlador para a estabilidade adequada do sistema. Sendo eles os seguintes:

- Erro estacionário de 5% para uma entrada degrau;
- Tempo de acomodação do sistema de 3s;
- Limite de 15% para o *overshoot* do sistema.

Parte-se dessas informações para realizar as discussões sobre os dados obtidos. É notório na figura 9, que na primeira simulação, onde não há ação do controlador PID, o sistema se comporta de maneira relativamente estável, porém possui um erro estacionário elevado e um tempo de acomodação muito longo. Dessa forma é necessária a intervenção do processo com a aplicação do controlador PID, a fim de estabilizar eficientemente o processo.

Prosseguiu-se o projeto, com a introdução do termo proporcional que gerou uma instabilidade ainda maior no sistema, pois ele é um amplificador, logo esse comportamento é compreensível até certo ponto, porém, não é adequado aos critérios estabelecidos para o projeto. Então seguiu-se com a definição dos outros termos do controlador, no caso, o controlador integral.

O valor de K_i foi aplicado ao sistema, a fim de eliminar ou reduzir o erro estacionário, contudo acabou ocasionando a instabilidade do sistema. Segundo Ogata (2010), essa característica geralmente é dada para sistemas que são marginalmente estáveis, nesses sistemas os pólos encontram-se muito próximos ao eixo do plano s . Logo, qualquer alteração, além do adequado, pode ocasionar o deslocamento do polo para o lado direito do plano, onde gera a instabilidade do sistema.

Com o prosseguimento das simulações, foi adicionado o termo derivativo (K_d) como uma tentativa de corrigir essa instabilidade no sistema. Também buscou-se reduzir o erro estacionário, o sobressinal e o tempo de acomodação, a fim de obter um sistema estável e adequado, dentro dos critérios pré-estabelecidos.

Com os três termos do controlador PID obteve-se um comportamento equilibrado, onde reduziu-se o tempo de acomodação, o sobressinal e o erro estacionário, entretanto, é necessário analisar detalhadamente o sinal de resposta para constatar se ele realmente atende aos critérios de estabilidade definidos especificamente para o esse projeto. Podemos observar seu comportamento de forma mais clara na figura 16.



Figura 16 – Resposta do sistema para os valores de $K_p = 1.25$, $K_i = 0.8$ e $K_d = 0.8$ em um período de 10s

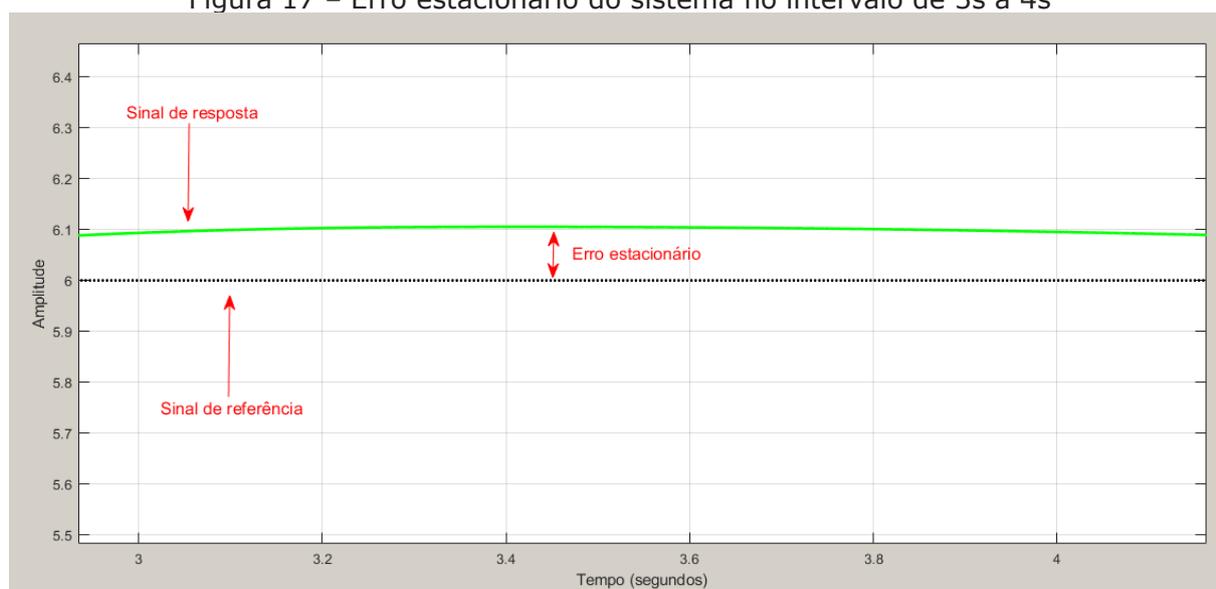


Fonte: Autor (2021)

Com esse gráfico é nítido que algumas características do sistema foram melhoradas. Ao observar o comportamento do sinal de resposta do sistema percebe-se a redução significativa das oscilações, do tempo de acomodação e do erro estacionário. Porém, para ter certeza que o controlador atendeu aos critérios de estabilidade realizou-se uma análise mais detalhada sobre o *overshoot* e o erro estacionário.

A fim de fazer essa análise criteriosa, estabeleceu-se o intervalo de tempo entre 3s e 4s, pois é onde nota-se o erro estacionário mais elevado após a possível acomodação do sistema. O tempo de acomodação será somente confirmado se, nesse intervalo definido para observação, o erro estacionário for menor que 5%. Na figura 17 pode ser encontrada a verificação deste critério.

Figura 17 – Erro estacionário do sistema no intervalo de 3s a 4s

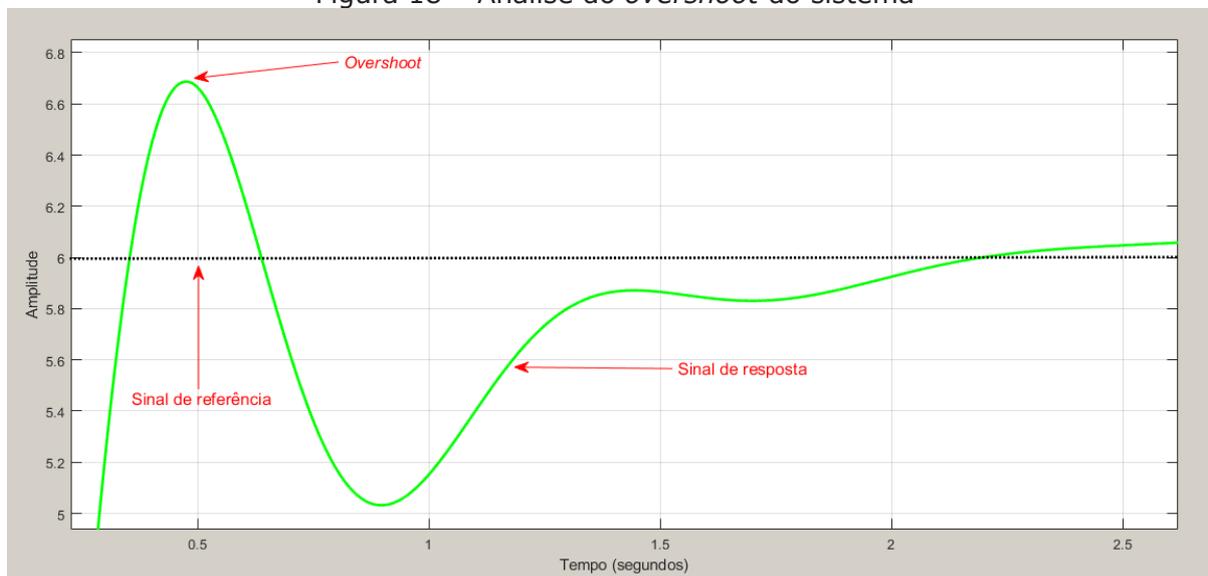


Fonte: Auto (2021)

Com essa análise é constatado que o erro estacionário está adequado aos critérios de projeto. Assim, se o erro está na faixa estabelecida, então valida-se também o tempo de acomodação que se encontra por volta de 2.2s, demonstrado na figura 16.

Após verificar o erro estacionário, necessita-se confirmar se o *overshoot* está dentro dos parâmetros de estabilidade. Para isso, observou-se o comportamento inicial do sinal resposta, verificando o valor máximo atingido pelo sobressinal do sistema. A figura 18 exibe essa atuação inicial da resposta.

Figura 18 – Análise do *overshoot* do sistema

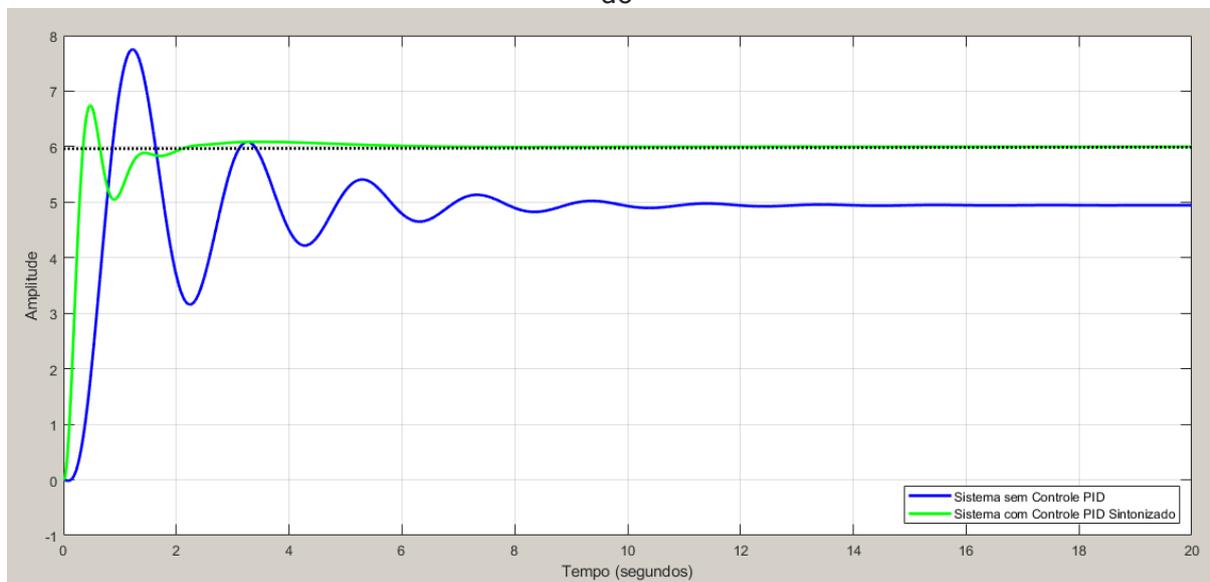


Fonte: Autor (2021)

Ao realizar-se essa análise é confirmado que o *overshoot* do sistema atende aos critérios de estabilidade do projeto. Esse sobressinal máximo foi estabelecido como 15% do valor do sinal de referência, e ao observar o gráfico é perceptível que está adequado, pois está por volta de 12%.

Após todo o estudo do comportamento obtido pode-se estabelecer que *overshoot* do sistema está abaixo dos 15%, o tempo de acomodação do sistema está localizado antes dos 3s e o erro estacionário está na faixa dos 5%. Dessa forma, foram atendidos todos os critérios de estabilidade para o projeto. Pode-se observar com maior clareza a mudança ocorrida com a sintonização do controlador por meio da comparação realizada na figura 17.

Figura 17 – Comparação entre o comportamento do sistema sem controle e o com controle PID sintonizado



Fonte: Autor (2021)

A partir dessa comparação é possível identificar a grande melhora na estabilidade do sistema. A diferença elevada entre o erro estacionário, a redução do tempo de acomodação e do *overshoot*, determinam a importância da aplicação do controlador PID para adequar o sistema aos critérios definidos e assim torná-lo eficiente na sua utilização.

6. CONCLUSÃO

Os critérios de estabilidade estabelecidos para o projeto podem variar dependendo da utilidade de cada sistema, caso precise ter maior precisão ou possua a necessidade de realizar trabalhos com cargas pesadas, esses critérios vão mudar, logo é necessário estar ciente da aplicação do sistema em questão. No projeto do controlador PID para a garra robótica o objetivo é principalmente acadêmico, logo a garra precisa de uma estabilidade para que possa trabalhar com o deslocamento de objetos de pequeno porte e não é necessária uma grande precisão para efetuar essa manipulação. Logo, os critérios estabelecidos atendem as necessidades para utilização da garra robótica.

A sintonização do controlador feita de maneira empírica pode não ser o método mais eficiente, porém, é eficaz desde que consiga obter o valor adequado para os termos do controlador que gerem a estabilidade do sistema. Assim, por meio de tentativas, foram definidos os valores para cada termo, de modo que cada um exercesse seu papel no processo para, por fim, alcançar os requisitos estabelecidos. Com a finalização do projeto do controlador proporcional integral derivativo, analisou-se o comportamento do sistema e observou-se que ele atende aos critérios que foram estabelecidos, de maneira que eles satisfazem as necessidades do mecanismo ao efetuar suas tarefas. Todos os parâmetros que afetam o sistema foram identificados e compreendidos, dessa forma foi possível otimizar o processo da melhor forma.

Além de constatar a eficácia do controle PID, a construção do controlador também agrega ao desenvolvimento profissional do engenheiro, pois diversos conhecimentos são obtidos a respeito de sistemas de controle, modelagem dinâmica de sistemas, *MATLAB*, entre outros. Todas essas informações tornam o aluno capaz de realizar tarefas na área com facilidade e qualidade pois já adquiriu experiência a partir deste projeto.

7. AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as graças e bênçãos que foram dadas a mim para permitir que eu chegasse onde estou hoje. Sou grato a toda minha família, mas principalmente aos meus pais que, com muito suor, me deram a oportunidade de cursar Engenharia Mecânica na Universidade Ceuma, me apoiaram e estiveram ao meu lado em todos os momentos, sempre com palavras de motivação e encorajamento, que me deixaram mais confiante para alcançar os objetivos almejados. Quero agradecer aos meus amigos que iniciaram o curso comigo, passamos por diversos momentos juntos e, em diversas ocasiões, um deu suporte ao outro para que todos continuassem firmes em busca de seus sonhos. Deixo também um agradecimento ao meu orientador Me. Hilton Seheris da Silva Santos, pois me concedeu oportunidades que contribuíram para o meu desenvolvimento como aluno e como profissional.



REFERÊNCIAS

- CARVALHO, J. L. M. **Sistemas de controle automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- DEMASI, D. **Modelagem dinâmica e de controle de um mecanismo de três graus de liberdade para aplicação em um robô hexápode**. Orientador: Luciano Santos Constantin Raptopoulos. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia mecânica e tecnologia de materiais, Centro federal de educação tecnológica Celso Sckow da Fonseca, Nova Iguaçu, 2012. Disponível em: <http://dipppg.cefet-rj.br/ppemm/attachments/article/81/14_Djalma%20Demasi.pdf> Acesso em: 13/06/2021
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 13ª.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI. A. **Sistemas de controle para engenharia**. 6ª.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- GOLNARAGHI, F.; KUO, B. C. **Sistemas de controle automático**. 9ª.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012
- KLEUVER, Craig A. **Sistemas dinâmicos: modelagem, simulação e controle**. 1ª.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018
- MANO, A. C. **Controle e rastreamento de referências de um servomotor QUBE- Servo utilizando fórmula de Ackermann e LMI**. Orientador: Márcio Roberto Covacic. 2017. 90f. TCC (Graduação). Curso de engenharia elétrica, Universidade estadual de Londrina, Londrina, 2017. Disponível em: <http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2017_AlissonCrinchevMano.pdf> Acesso em: 14/05/2021
- MATARIC, M. L. **Introdução a robótica**. 1ª.ed. São Paulo: Editora Unesp/Blucher, 2014.
- MATSUMOTO, É. Y. **Matlab R2013a: Teoria e programação: guia prático**. 1ª.ed. São Paulo: Érica, 2013.
- NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 7ª.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- PALM III, W. J. **Introdução ao MATLAB para engenheiros**. 3ª. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.
- PIMENTA, K. B. **Controle de junta robótica usando controlador preditivo generalizado adaptativo direto**. Orientador: João Maurício Rosário. 2003. 133f. Tese(Doutorado). Pós graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265347/1/Pimenta_KarlaBoaventura_D.pdf> Acesso em: 15/06/2021
- RUSSOLO, T. A. **Sistemas de controle de posição microprocessado com servomotor CC**. Orientador: José Roberto Boffino de Almeida Monteiro. 2011. 61 f. TCC(Graduação). Curso de Engenharia elétrica com ênfase em sistemas de energia e automação, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-28032012-104601/publico/Russolo_Tiago_de_Arruda.pdf> Acesso em: 12/06/2021
- SOLOMAN, S. **Sensores e sistemas de controle na indústria**. 2ª.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.



CAPÍTULO 7

MODELAGEM DE UM SISTEMA DINÂMICO VIA REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

MODELING OF A DYNAMIC SYSTEM THROUGH ARTIFICIAL NEURAL
NETWORKS

Bruno Silva Oliveira¹

Hilton Seheris da Silva Santos²

1 Aluno Concludente do Curso de Engenharia Mecânica – bruno.djarin@gmail.com

2 Orientador – Mestre – hiltonseheris@gmail.com

Resumo

Para o projeto de máquinas, geralmente construir protótipos e conduzir testes experimentais pode ser caro demais ou até mesmo inviável. Diante disso, a modelagem matemática, e outras ferramentas como a análise e a simulação de sistemas auxiliam muito no processo de desenvolvimento de um projeto. Onde tais ferramentas podem se tornar ainda mais convenientes, com o uso de redes neurais artificiais (RNAs). Sendo assim, o objetivo do presente artigo é realizar a modelagem de um sistema dinâmico por meio de uma rede neural artificial, onde a mesma foi desenvolvida através da linguagem de programação Python, tratando-se de uma rede Perceptron com um nó de fonte na camada de entrada, uma camada oculta com 5 neurônios e uma camada de saída com três neurônios. Sobre o sistema dinâmico modelado, trata-se de um atuador por solenoide de alta velocidade e válvula. Os resultados obtidos foram as saídas da rede, sendo estas: corrente, força eletromagnética e deslocamento para diferentes valores de tensão inseridos na entrada da rede. Foram obtidos também os pesos sinápticos da rede neural responsáveis por modelar os resultados. Por fim concluiu-se que após o treinamento da rede neural, a mesma foi capaz de realizar boas aproximações para os valores da corrente, força eletromagnética e deslocamento.

Palavras-chave: Modelagem; Sistema dinâmico; Rede neural artificial.

Abstract

For machine design, generally building prototypes and conducting experimental tests can be too expensive or even impractical. Therefore, mathematical modeling and other tools such as system analysis and simulation help a lot in the process of developing a project. Where such tools can become even more convenient, with the use of artificial neural networks (ANNs). Thus, the aim of this article is to model a dynamic system through an artificial neural network, where it was developed using the Python programming language, being a Perceptron network with a source node in the layer. input, a hidden layer with 5 neurons and an output layer with three neurons. On the modeled dynamic system, it is a high-speed solenoid actuator and valve. The results obtained were the outputs of the network, which are: current, electromagnetic force and displacement for different voltage values inserted at the input of the network. The synaptic weights of the neural network responsible for modeling the results were also obtained. Finally, it was concluded that after training the neural network, it was able to perform good approximations for current, electromagnetic force and displacement values.

Key-words: Modeling; Dynamic system; Artificial neural network.



1. INTRODUÇÃO

A humanidade vem evoluindo ao longo da história, projetando e construindo máquinas cada vez mais sofisticadas, buscando a automação de processos e atividades, conforme as necessidades, nas mais variadas áreas. Inserido nesse contexto, para o projeto de máquinas, geralmente construir protótipos e conduzir testes experimentais pode ser caro demais ou até mesmo inviável. Diante disso, a modelagem matemática, e outras ferramentas como a análise e a simulação de sistemas auxiliam muito no processo de desenvolvimento de um projeto. Onde tais ferramentas podem se tornar ainda mais convenientes, com o uso de redes neurais artificiais (RNA).

Sendo assim, o objetivo geral deste artigo científico é realizar a modelagem de um sistema dinâmico por meio de uma rede neural artificial (RNA). Tendo como objetivos específicos: modelar via rede neural artificial o sistema dinâmico, obter a resposta do sistema dinâmico através da rede neural artificial e por fim analisar os resultados da modelagem e simulação do sistema dinâmico.

No que tange a modelagem matemática de sistemas dinâmicos, a mesma é essencial, pois o primeiro passo para analisar um sistema, é desenvolver um modelo matemático que represente a dinâmica do sistema. Já que é impossível obter uma resposta sem tal modelo. A modelagem nos permite entender a resposta dinâmica de uma máquina a ser projetada, sem precisar da experimentação de um protótipo físico, permitindo levar um projeto para a fase de produção, em um tempo muito menor do que levaria se fossem construídos protótipos físicos.

Sobre as redes neurais, essas, vêm evoluindo a cada dia e se tornando mais complexas, as mesmas resolvem uma grande variedade de problemas, do mais simples ao mais complexo, como: classificação de padrões, aproximação de funções, segmentação em classes e predição de séries temporais. Elas podem aprender a diferenciar laranjas de maçãs, a voz das pessoas, aprender a função matemática que relaciona os dados introduzidos como entrada com os dados de saída, e ainda, dado um conjunto de dados que ocorreram no passado, as redes podem tentar prever o que acontecerá no futuro. As redes neurais são aplicadas também em áreas como: processamento de sinais, mineração de dados, veículos aéreos não tripulados (drones), braços robóticos, carros autônomos etc.

Referente a organização do artigo após essa seção introdutória, advém mais quatro seções, sendo estas: as seções 2, 3, 4 e 5. Onde a seção 2 discorre sobre alguns conceitos básicos de modelagem, classificação dos sistemas dinâmicos, sobre modelagem e análise de sistemas dinâmicos. Apresenta também o conceito de rede neural artificial (RNA), os componentes do neurônio biológico e do neurônio artificial, apresenta também os tipos de função de ativação, os tipos de estrutura de rede e o algoritmo de treinamento *back-propagation*. Na seção 3 é apresentado o sistema dinâmico modelado, a estrutura da RNA utilizada e o algoritmo de treinamento. Na seção 4, são apresentados os resultados da modelagem e simulação do sistema dinâmico, feita através de uma rede neural. Por fim tem-se a seção 5 que finaliza o trabalho, comentando sobre a eficiência alcançada pela rede neural após ser treinada para aproximar os valores de saída desejados, e se o objetivo inicial foi alcançado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos de modelagem e sistemas dinâmicos

Para uma compreensão completa do assunto abordado, no escopo deste trabalho, é importante saber os conceitos de alguns termos utilizados no mesmo. Sendo assim, dois conceitos importantes são os de sistema e sistema dinâmico, onde o primeiro, segundo Kluever (2018), vem a ser uma combinação de componentes trabalhando em conjunto para realizar um objetivo especificado, onde os elementos interagindo possuem relações de causa e efeito. Já o segundo é um sistema no qual as variáveis de saída atuais dependem das condições iniciais do sistema.

Outros dois conceitos importantes são os de modelagem e modelo matemático. Modelagem é o processo de determinar as equações matemáticas que descrevem um determinado sistema, tal processo é realizado através da aplicação das leis físicas apropriadas para o sistema dinâmico. Já o modelo matemático é a representação matemática do comportamento de um sistema dinâmico, comumente um conjunto de equações diferenciais ordinárias lineares ou não lineares (MONTEIRO, 2006).

Por último temos os conceitos de simulação e análise do sistema. Simulação é o processo no qual se obtém a resposta de sistemas dinâmicos através da solução numérica das equações que os modelam. A análise do sistema vem a ser a aplicação de cálculos analíticos ou ferramentas de simulação numérica, com o objetivo de determinar a resposta do sistema de modo a compreender seu desempenho (KLUEVER, 2018).

2.2 Sistemas Dinâmicos

Nesta seção serão abordadas as classificações dos sistemas dinâmicos, que podem ser classificadas de acordo com as quatro categorias a seguir: sistemas discretos ou contínuos no tempo, sistemas invariantes ou variantes no tempo, sistemas "concentrados" ou distribuídos e sistemas não lineares ou lineares.

Sistema dinâmico discreto no tempo: é um sistema intrinsecamente descrito por equações discretas em que a sua condição só varia dentro dos instantes $\{t_0, t_1,$

$t_2, \dots\}$. No intervalo de tempo entre dois desses momentos, o estado permanece o mesmo. Já um sistema dinâmico contínuo no tempo é um sistema que envolve variáveis e funções que são determinadas em todos os instantes de tempo. Ou seja, em sistemas contínuos, o espaço de estados t é contínuo e consiste de valores reais ou complexos (VILLATE, 2007).

Em sistemas invariantes, ou ainda, estacionários, segundo Kluever (2018), não há mudança nas propriedades ao longo do tempo. Já o oposto acontece com os sistemas variantes, por exemplo: em sistemas variantes, o coeficiente de atrito muda no instante t_1 para o instante t_2 . Pode-se ainda, de forma análoga, comparar o conceito de sistema dinâmico invariante, com o conceito de regime permanente de mecânica dos fluidos, que de



acordo com Bistafa (2018) é o regime de escoamento onde nos diversos pontos do espaço cruzados pelo fluido em movimento, as partículas passam por esses pontos sempre com os valores constantes de determinada grandeza relacionada à partícula fluida.

Sobre sistemas distribuídos e concentrados, define-se sistema distribuído como aquele que necessita de um número infinito de variáveis, por isso é representado através de equações diferenciais parciais (EDPs). Por outro lado, um sistema concentrado é definido como aquele que envolve um número finito de variáveis, e, assim, é modelado por equações diferenciais ordinárias (EDOs). Por exemplo, se no processo de modelagem, for considerada toda a distribuição de pressão na câmara do cilindro de um pistão hidráulico, temos um sistema distribuído. Mas se toda a distribuição de pressão for concentrada em um único termo de pressão, então temos um sistema concentrado (MONTEIRO, 2006).

Enfim temos os sistemas lineares e não lineares, sendo assim, de acordo com Ogata (2010), um sistema é denominado linear se o princípio da superposição for aplicável a ele. O princípio da superposição declara que a resposta alcançada pela aplicação concomitante de duas funções de determinação diversas é o total gerado pela soma das respostas individuais. Então, para o sistema linear, a resposta a inúmeras entradas pode ser calculada abordando uma entrada por vez, e então, fazendo a somatória dos resultados. Já o oposto se aplica para sistemas não lineares, ou seja, um sistema é dito não linear se e somente se o princípio da superposição não é aplicado a ele. Assim, para um sistema não linear, não é possível obter a resposta a duas entradas síncronas considerando as entradas uma por vez e somando os resultados.

Vale ressaltar, ainda, que embora muitas relações de grandezas físicas sejam expressas por equações lineares, na maior parte dos casos a relação entre elas não é de fato linear. Se feito um estudo cuidadoso dos sistemas físicos, o mesmo revelará que os chamados 'sistemas lineares' são efetivamente lineares somente para intervalos delimitados de operação (OGATA, 2010).

2.3 Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos

Para analisar um sistema dinâmico, o primeiro passo é sempre desenvolver um modelo matemático que represente a dinâmica do sistema. O segundo é determinar a resposta do sistema a uma entrada específica, ou seja, resolver as equações que compõem o modelo previamente determinado. Sendo assim, a determinação da resposta do sistema, pode ser obtida por meio de duas formas: métodos analíticos ou soluções numéricas usando um computador digital (KLUEVER, 2018).

Vale ressaltar que os resultados obtidos a partir de um modelo matemático específico são apenas aproximações. E que a proximidade da resposta do modelo com a resposta real, depende da complexidade do modelo. A sensibilidade do engenheiro deve ser aplicada para avaliar a complexidade do modelo, de acordo com a exatidão desejada da análise.

Não linearidades são corriqueiramente desprezadas em um estudo preliminar de um projeto de forma a desenvolver modelos lineares de menor ordem. Contudo, a utilização de modelos lineares aproximados de menor ordem, algumas vezes, pode não ser sufi-



ciente para representar de forma precisa a dinâmica do sistema. Tornando-se necessário a adoção de modelos de maior ordem, ou ainda, modelos não lineares que necessitam de soluções numéricas concebidas através de programas de simulação (KLUEVER, 2018).

2.4 Redes Neurais Artificiais (RNA)

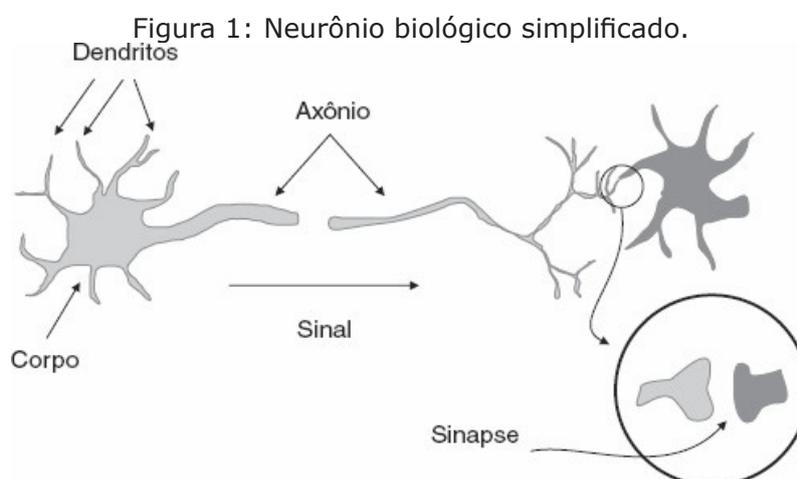
Na busca pela construção de sistemas com comportamento inteligente, e por simular o processo de aprendizado, um modelo natural que inspirou diversas pesquisas é o do cérebro. O cérebro é formado por células nomeadas como neurônios, que trocam informações por meio de sinapses. Permitindo que o mesmo seja capaz de realizar certos processos muito mais rapidamente que o mais poderoso computador digital existente. Sabendo disso, o desenvolvimento das RNAs tomou como inspiração a estrutura e o funcionamento do sistema nervoso, com o objetivo de simular a capacidade de aprendizado do cérebro humano na aquisição de conhecimento (CARVALHO, 2021).

Segundo Haykin (2001), rede neural artificial é um processador maciço paralelamente distribuído formado por unidades de processamento simples, que tem a capacidade natural para acumular conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Assim se assemelhando ao cérebro em dois aspectos: sendo, o primeiro, a capacidade de adquirir o conhecimento a partir do ambiente no qual está imersa, através de um processo de aprendizagem, e o segundo aspecto é que forças conectivas entre neurônios, nomeadas de pesos sinápticos, são utilizadas para guardar o conhecimento aprendido.

2.4.1 Neurônio Biológico

O cérebro humano possui mais de dez bilhões de neurônios, cada qual conectado a milhares de outros neurônios. Estas conexões são conhecidas por sinapses e o cérebro humano possui cerca de 60 trilhões destas conexões (COPIN, 2010).

Na figura 1 pode-se observar os principais componentes de um neurônio que são: dendritos, corpo celular e axônio.



Fonte: Carvalho (2021)

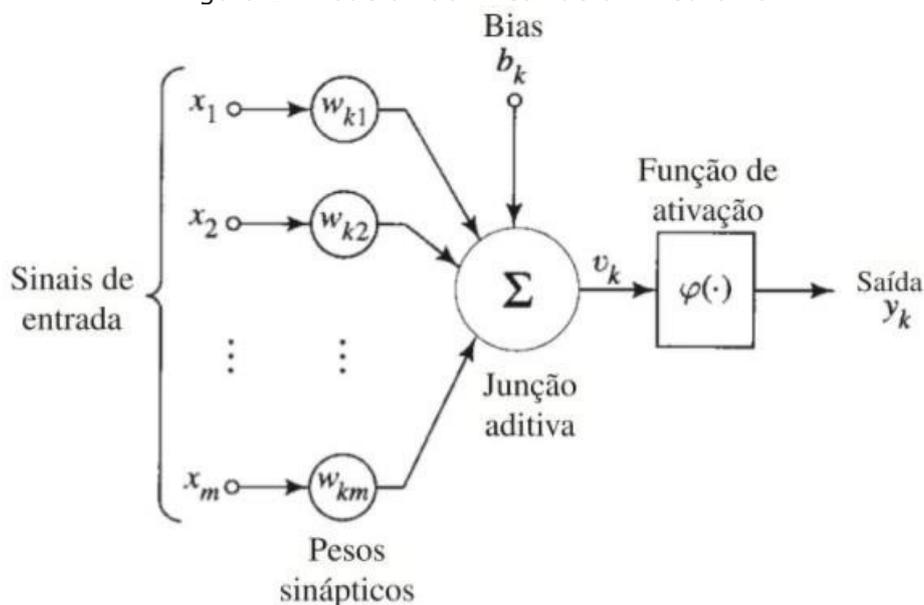
Os dendritos são alongamentos dos neurônios, sendo esses, especializados para receber impulsos nervosos oriundos de dendritos de outros neurônios ou do ambiente. Esses estímulos são então transmitidos para o corpo celular ou soma. O soma coleta, combina e processa as informações advindas dos dendritos. De acordo com a intensidade e frequência dos sinais recebidos, o corpo celular produz um novo estímulo, que é encaminhado para o axônio. Sendo axônio um prolongamento dos neurônios, incumbido pela condução dos impulsos elétricos gerados no corpo celular até outros neurônios (CARVALHO, 2021).

2.4.2 Neurônio Artificial

As RNAs são sistemas de computador distribuídos integrados por unidades de processamento simples, densamente interconectadas. Unidades essas, designadas como neurônios artificiais. O neurônio artificial é primordial para a operação de uma rede neural. No entanto, os neurônios utilizados para construir redes neurais, são primitivos se comparados aos encontrados no cérebro (HAYKIN, 2001).

Na figura 2, pode-se observar os três elementos básicos de um modelo neuronal.

Figura 2: Modelo não-linear de um neurônio



Fonte: Haykin (2001)

Onde os elementos básicos de um neurônio são: um conjunto de sinapses caracterizadas por um sinal de entrada x , conectada a um neurônio k e multiplicada por um peso sináptico w , temos também, um somador para somar todos os sinais de entrada, ponderados pelos respectivos pesos, e por último temos uma função de ativação para reduzir a amplitude da saída de um neurônio (HAYKIN, 2001).

Em termos matemáticos podemos descrever um neurônio, através das equações 1, 2 e 3:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (1)$$

$$v_k = u_k + b_k \quad (2)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (3)$$

Onde

u_k é a saída do combinador linear (somador);

x_j são os sinais de entrada;

w_{kj} são os pesos sinápticos;

v_k é o campo local induzido;

b_k é o bias;

y_k é o sinal de saída do neurônio e;

$\varphi(.)$ é a função de ativação.

2.4.2.1 Tipos de Função de Ativação

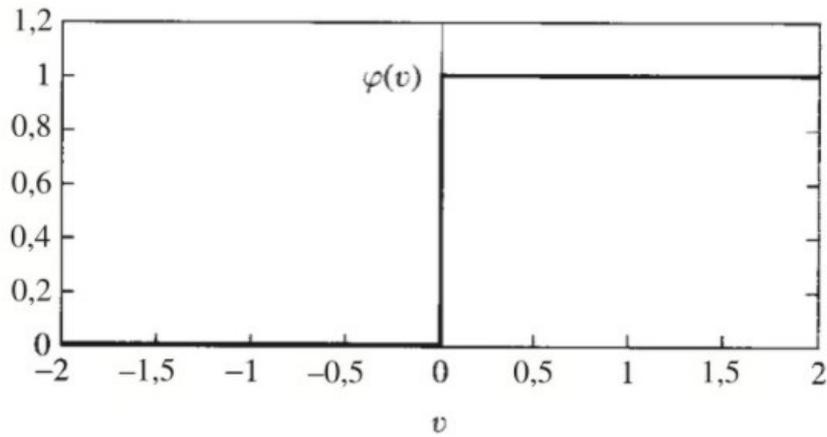
A função de ativação $\varphi(.)$ aplicada ao campo local induzido v_k , define a saída de um neurônio. A seguir são apresentados os três tipos básicos de função de ativação:

Função de limiar. Na figura 3 é possível observar o comportamento da função regida pela equação 4.

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v_k \geq 0 \\ 0, & \text{se } v_k < 0 \end{cases} \quad (4)$$



Figura 3: Comportamento da função de limiar

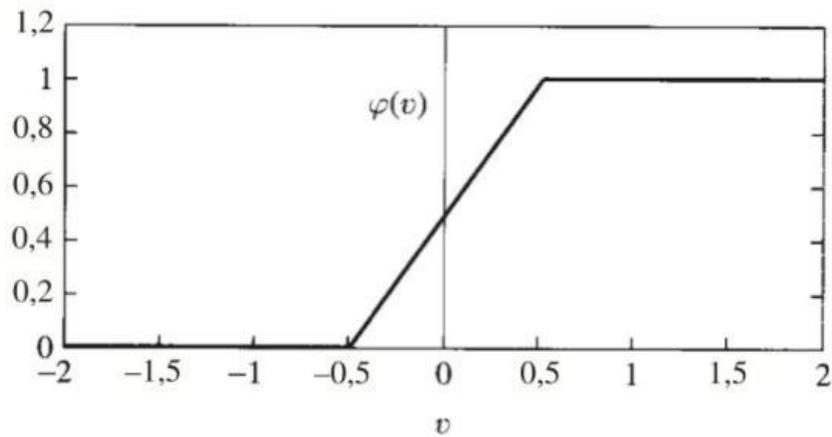


Fonte: Haykin (2001)

Função linear por partes. A função linear por parte representada na figura 4, é regida pela equação 5. Onde é assumido que o fator de amplificação dentro da região linear de trabalho é a unidade (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2014).

$$\varphi(v_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } v_k \geq +2 \\ v_k, & \text{se } -2 < v_k < +2 \\ 0, & \text{se } v_k \leq -2 \end{cases} \quad (5)$$

Figura 4: Comportamento da função linear por partes



Fonte: Haykin (2001)

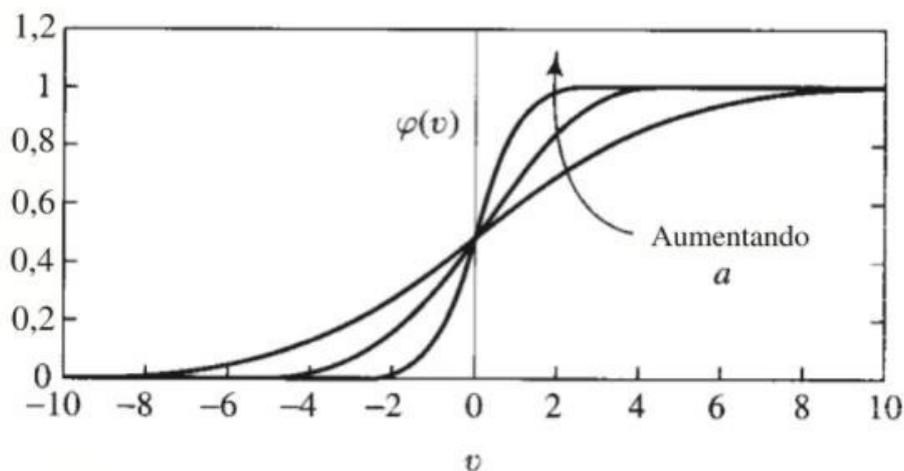
Função sigmóide. A função sigmóide regida pela equação 6, cujo gráfico representado na figura 5 tem forma de s, é a forma de função de ativação mais utilizada para construir redes neurais artificiais. Ela é definida como uma função puramente crescente que exibe um balanceamento conveniente entre comportamento linear e não linear (HAYKIN, 2001).

$$\varphi(v_k) = \frac{1}{1 + \exp(-av_k)} \quad (6)$$

Onde a é o parâmetro de inclinação da função sigmóide. Ao variar o parâmetro

a , é possível obter funções sigmóides com diferentes inclinações. Vale comentar, que quando tal parâmetro tende ao infinito, a função sigmóide assume o comportamento de uma função de limiar. No entanto, diferentemente desta, a função sigmóide é diferenciável.

Figura 5: Comportamento da função sigmóide



Fonte: Haykin (2001)

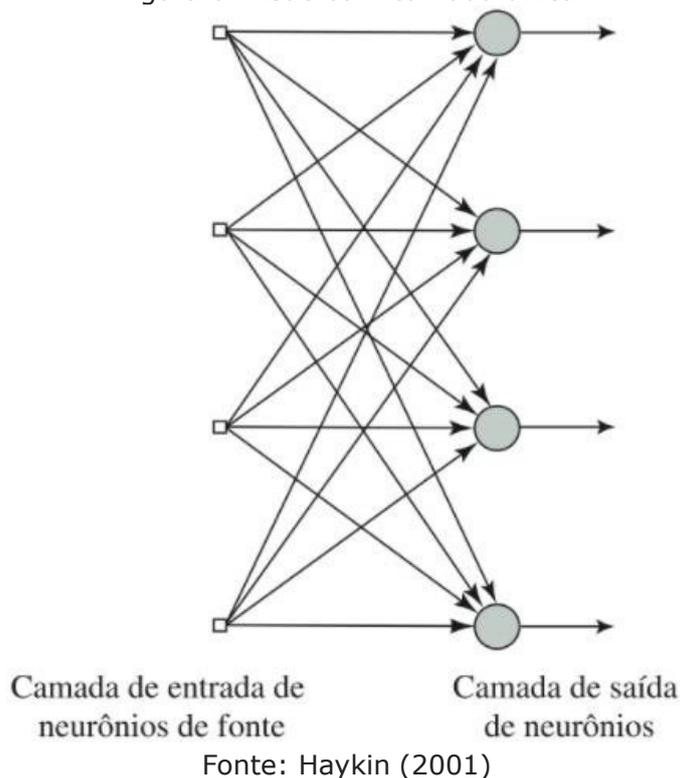
4.2.3 Estruturas de Rede

Uma RNA é um modelo matemático simplificado de um neurônio biológico, que consiste na conexão de várias unidades básicas denominadas elementos de processamento (neurônios). Sendo assim, a capacidade computacional de uma rede neural está nas conexões (pesos sinápticos) entre os elementos processadores. Onde a forma pela qual esses elementos estão estruturados, está ligada com o algoritmo de aprendizagem utilizado para treinar a rede. Em geral, as classes de arquiteturas de rede substancialmente diferentes, são organizadas em três tipos: redes alimentadas adiante com camada única, redes alimentadas adiante com múltiplas camadas e redes recorrentes (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2014).

4.2.3.1 Redes Alimentadas Adiante com Camada Única (*Feedforward*)

Na forma mais simples de uma rede organizada em camadas, têm-se uma camada de entrada de nós de fonte que se projeta sobre uma camada de saída de neurônios (nós computacionais), mas não vice e versa. Como exemplo, temos a rede representativa da figura 6. Onde a mesma é uma rede de camada única com quatro nós tanto na camada de entrada como na de saída. Sendo que a nomeação "camada única" se refere à camada de saída de nós computacionais (neurônios). A camada de nós de entrada não é contada, pois nela não é realizada qualquer computação (HAYKIN, 2001).

Figura 6: Rede com camada única

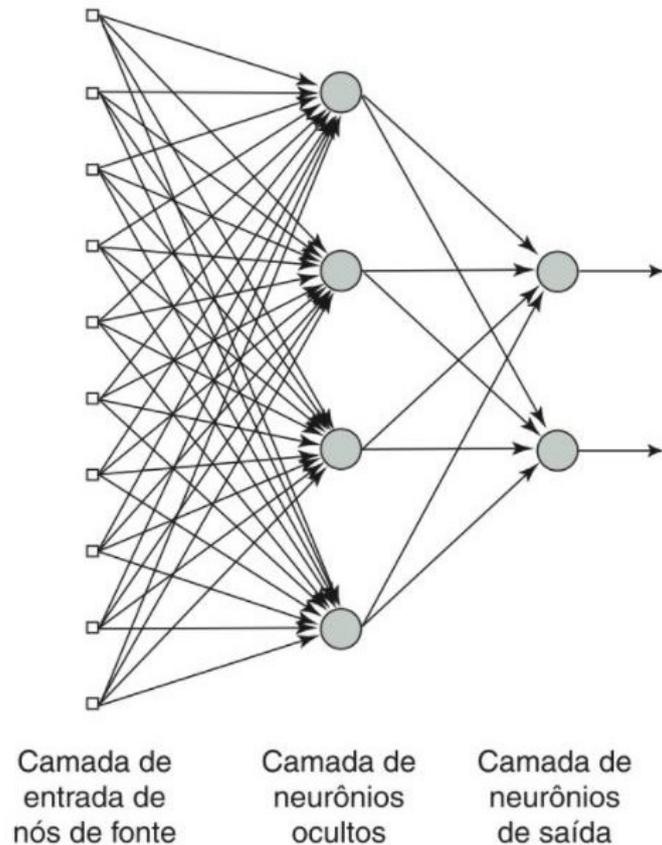


4.2.3.2 Redes Alimentadas Adiante com Múltiplas Camadas (*Feedforward*)

Esta classe de rede neural alimentada adiante se distingue pela presença de uma ou mais camadas ocultas, cujos nós computacionais são chamados de neurônios ocultos. A função dos neurônios ocultos é intervir entre a entrada e a saída da rede de uma forma útil. Adicionando-se camadas ocultas, a rede torna-se capaz de extrair estatísticas de ordem elevada (CHURCHLAND; SEJNOWSKI, 1992).

Na figura 7 é representada uma rede de múltiplas camadas totalmente conectada, ou seja, cada um dos nós de uma camada está conectado a todos os nós da camada seguinte.

Figura 7: Rede com múltiplas camadas

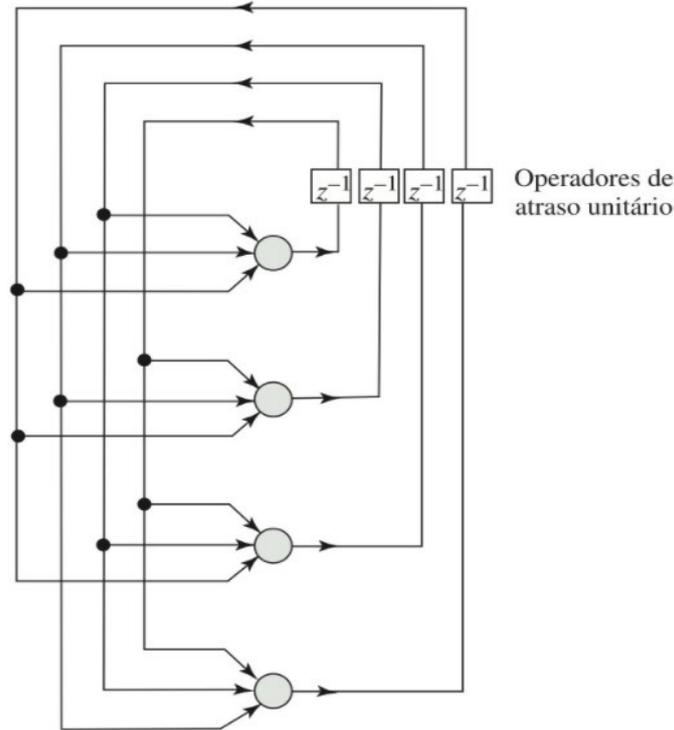


Fonte: Haykin (2001)

4.2.3.3 Redes Recorrentes

Segundo Haykin (2001), uma rede neural recorrente se diferencia de uma rede neural alimentada adiante por ter um ou mais laços de realimentação. Uma rede recorrente pode consistir, por exemplo, de uma única camada de neurônios com cada neurônio alimentando seu sinal de saída de volta para as entradas de todos os outros neurônios, assim como ilustrado na figura 8. Além disso, há algumas redes nas quais unidades computacionais competem entre si, de modo que somente as saídas de alguns neurônios são consideradas nos processamentos resultantes.

Figura 8: Rede recorrente



Fonte: Haykin (2001)

Onde z^{-1} é um elemento de atraso unitário que compõem os laços de realimentação.

4.2.4 Algoritmo de Treinamento *Back-propagation*

O algoritmo *back-propagation* (retropropagação) é o método usado para treinar redes *feedforward* de múltiplas camadas, mais especificamente as redes perceptron de múltiplas camadas (MLP, *multilayer perceptron*). O algoritmo consiste de duas fases, uma fase para frente (*forward*) e uma fase para trás (*backward*) (LIMA; PINHEIRO; SANTOS, 2014).

Na fase *forward*, segundo Carvalho (2021), cada objeto de entrada é apresentado à rede. O objeto é primeiramente recepcionado por cada um dos neurônios da primeira camada intermediária, quando é multiplicado pelo peso relacionado a suas conexões de entrada correspondentes. Cada neurônio nessa camada tem a função de ativação aplicada a sua entrada e gera um valor de saída, que é usado como valor de entrada pelos neurônios da camada posterior. Esse processo prossegue até que os neurônios da camada de saída gerem cada um seu valor de saída, que é então comparado ao valor desejado para a saída desse neurônio. A diferença entre os valores de saída gerados e desejados para cada neurônio da camada de saída indica o erro cometido pela rede para o objeto apresentado, erro esse calculado através da equação 7.

$$e_s = y_d - y_k \quad (7)$$

Onde e_s é o erro da camada de saída, y_d representa a saída desejada para o neurônio e y_k é o mesmo da equação 3.

O valor do erro de cada neurônio da camada de saída é então usado na fase *backward* para atualizar seus pesos de entrada. A atualização prossegue da camada de saída até a primeira camada intermediária. A equação 8 ilustra como é feito o ajustado dos pesos da camada de uma rede MLP pelo algoritmo *back-propagation* (CARVALHO, 2021).

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \eta \delta_l y^{l-1} \quad (8)$$

Onde $w(.)$ representa o conjunto de pesos não atualizados, $w(n+1)$ representa os pesos atualizados, η é o fator de aprendizagem da rede, δ_l é o gradiente de erro do neurônio da camada na qual os pesos estão sendo atualizados e y^{l-1} representa concomitantemente a entrada recebida pelo neurônio e a saída do neurônio da camada anterior.

Segundo Carvalho (2021), o gradiente de erro de um neurônio de dada camada intermediária é estimado como a soma dos gradientes de erros dos neurônios da camada seguinte, cujos terminais de entrada estão conectados a ele, ponderados pelo valor do peso associado a essas conexões. Assim, a forma de calcular o gradiente de erro depende da camada em que se encontra o neurônio. Sendo assim, a equação 9 demonstra como calcular o gradiente para camada de saída, já a equação 10 demonstra como calcular o gradiente para uma camada oculta qualquer.

$$\delta_l = e_s \dot{\varphi}(v_k) \quad (9)$$

$$\delta_l = \dot{\varphi}(v_k) \sum \delta_{l+1} w_{l+1} \quad (10)$$

Onde

$\dot{\varphi}(v_k)$ representa a derivada da função de ativação aplicada ao campo induzido;

v_k da camada de neurônios;

δ_{l+1} é o gradiente de erro da camada seguinte e;

w_{l+1} representa o vetor de pesos da camada seguinte.

4.2.4.1 Critério de Parada

De forma geral, não é possível demonstrar que o algoritmo de retropropagação convergiu e não há critérios bem definidos para encerrar a sua operação. Contudo, existem critérios razoáveis que podem ser usados para encerrar a atualização dos pesos. Em especial tem-se o critério do erro quadrático médio total, sendo esse calculado através das equações 11 e 12. De acordo com Haykin (2001) é considerado que o algoritmo de retropropagação convergiu se a taxa de variação do erro médio quadrático por época for pequena. Onde a taxa de variação do erro médio quadrático total é considerada pequena, quando se encontra no intervalo de 0,1 a 1 por cento.

$$E_m = \frac{1}{N} \sum E \quad (11)$$

$$E = \frac{1}{2} e^2 \quad (12)$$

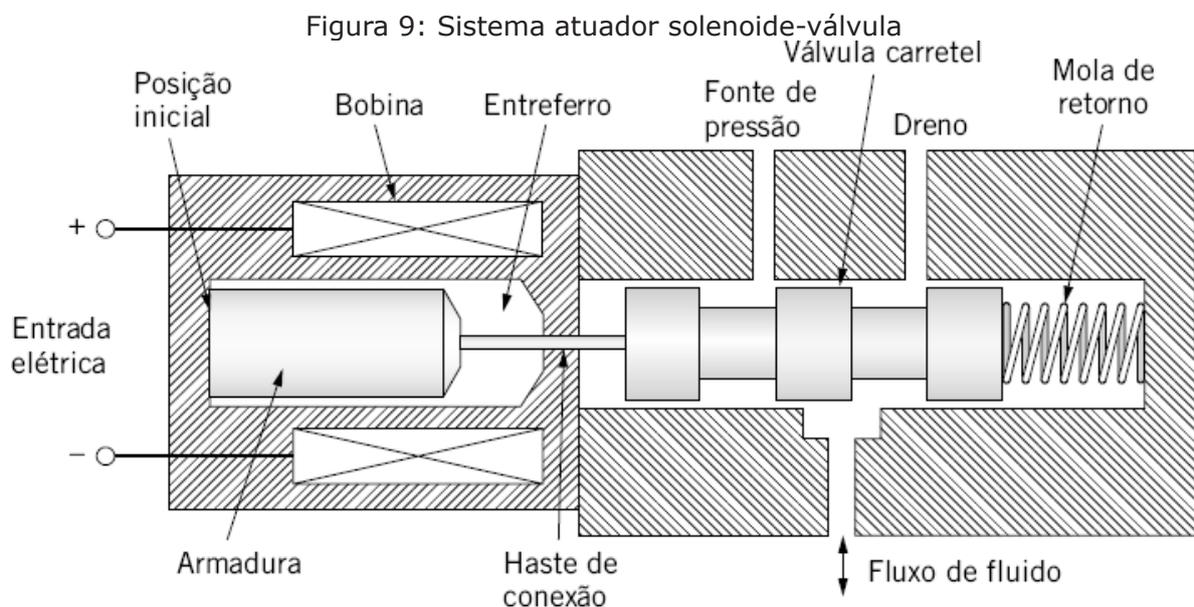
Onde E_m é o erro quadrático médio total, N é a quantidade de entradas que o *dataset* (conjunto de dados) de treino possui, já E representa a soma dos erros quadrados na camada de saída.

3. METODOLOGIA

3.1 O Sistema Dinâmico Modelado

Grande parte dos sistemas físicos, factuais de engenharia, são compostos por subsistemas interconectados de variados campos: mecânicos, elétricos e fluidos. Diante disso, o sistema dinâmico escolhido para ser modelado por meio de uma rede neural, ilustrado na figura 9, foi um atuador por solenoide de alta velocidade e válvula.

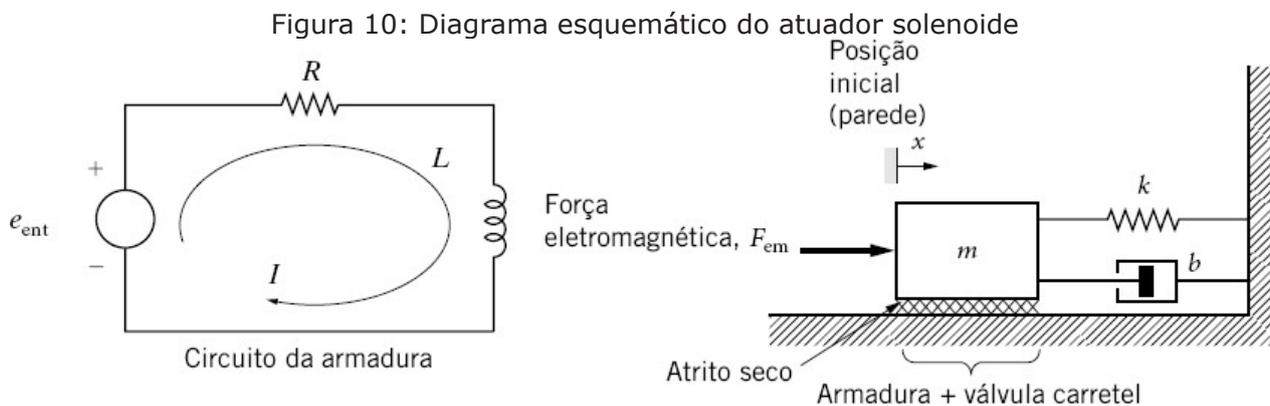
Esse tipo de atuador é usado em sistemas hidráulicos e pneumáticos para posicionar válvulas carretel visando o controle do fluxo de fluido. A corrente elétrica circula na bobina que envolve a armadura (pistão) e gera um campo magnético, que produz uma força atrativa na armadura, puxando-a para a direita. Desse modo, a força eletromagnética puxa a armadura para o centro da bobina e fecha o entreferro (KLUEVER, 2018).



Para a modelagem do sistema, foi considerado que a indutância L do solenoide e o coeficiente de força "contraforça eletromotriz" K são constantes, assumiu-se também que a armadura é rigidamente conectada ao carretel por meio de uma haste, e, portanto, eles podem ser considerados uma única massa concentrada e conectada a uma mola de cons-

tante k . O movimento da massa m armadura-válvula é puramente de translação e na direção horizontal, e ambos a força eletromagnética F_{em} e o deslocamento x da massa são positivos para a direita. Onde a massa está submetida aos efeitos de atrito viscoso e seco.

Portanto tal sistema eletromecânico é não linear, devido a força eletromagnética e aos efeitos do atrito seco, sendo assim, a figura 10 mostra um diagrama esquemático do atuador solenoide modelado pelas equações 13, 14 e 15, que constituem o modelo matemático do sistema.



Fonte: Adaptado de Kluever (2018)

$$L\dot{I} + RI = e_{ent} - KI\dot{x} \quad (13)$$

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + F_{seco} \operatorname{sgn}(\dot{x}) + kx = F_{em} \quad (14)$$

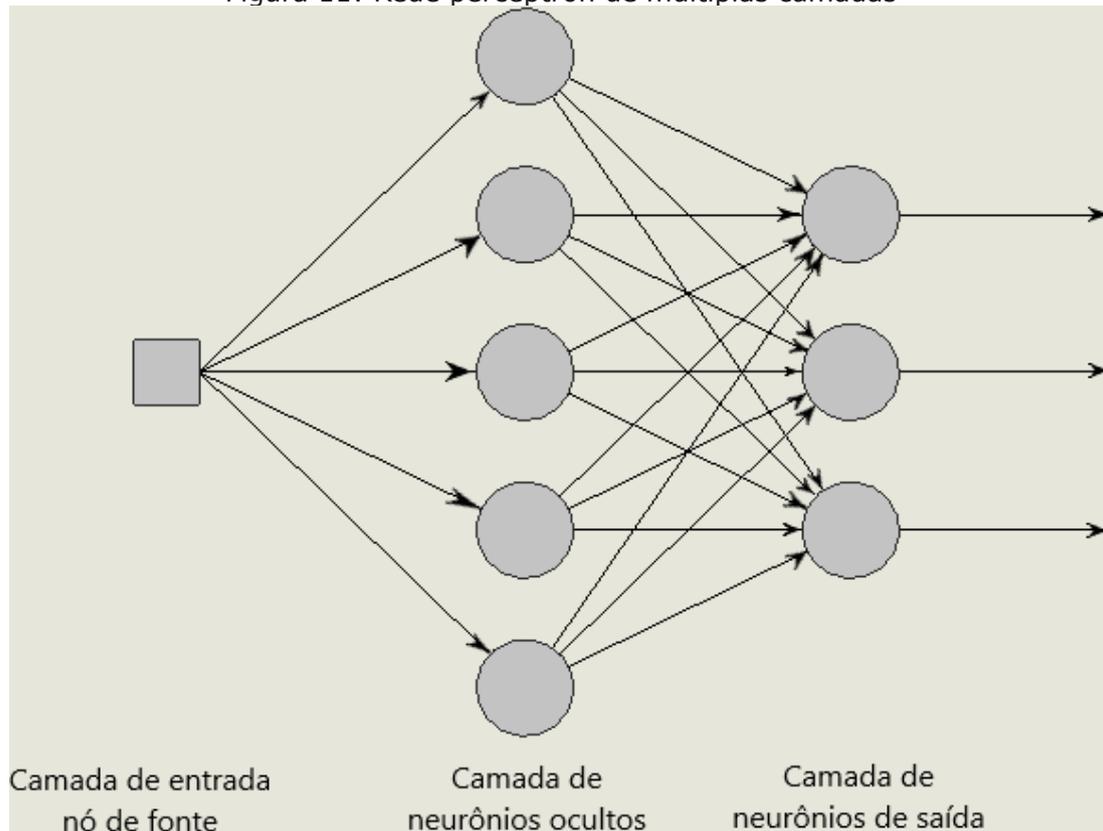
$$F_{em} = 0,5KI^2 \quad (15)$$

Onde I é a corrente na bobina, R a resistência da armadura, e_{ent} a tensão de entrada, b o coeficiente de atrito viscoso e F_{seco} a força exercida pelo atrito seco.

3.2 RNA Utilizada para Modelar e Simular o Sistema Dinâmico

A rede neural usada, foi uma rede alimentada adiante totalmente conectada com múltiplas camadas, mais especificamente, uma rede perceptron de múltiplas camadas. A rede possui uma camada com um único nó de fonte, uma camada oculta composta de 5 neurônios computacionais e uma camada de saída com três neurônios. O grafo arquitetural da rede pode ser observado na figura 11.

Figura 11: Rede perceptron de múltiplas camadas



Fonte: Adaptado de Haykin (2001)

Onde a entrada é uma tensão e_{ent} e as três saídas da rede são: a corrente I na bobina (enrolamento) do solenoide, a força eletromagnética F_{em} e o deslocamento total x da válvula.

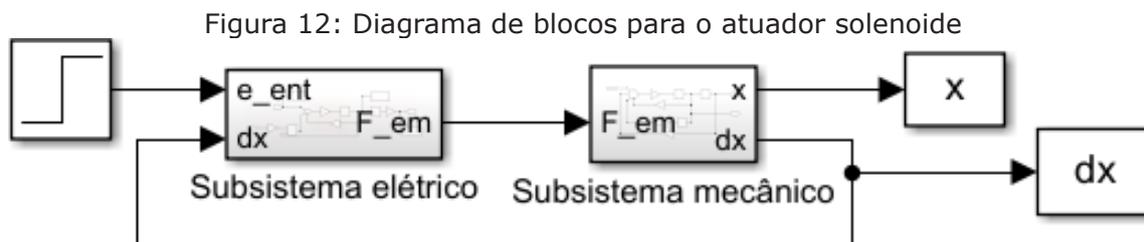
3.3 Dataset de Treino e Treinamento da Rede Neural Artificial

A rede foi treinada para aproximar os valores de saída (I, F_{em} e x) a partir de uma entrada (e_{ent}). Para essa tarefa foi utilizado um ambiente de desenvolvimento integrado IDE (*integrated development environments*) nomeado PyCharm, onde o mesmo é baseado em Python. Sobre o treinamento, esse foi realizado utilizando um *dataset* (conjunto de dados) de treino obtido através de simulação do sistema dinâmico com uso do *Simulink* (ferramenta de simulação do *software* MATLAB). Onde MATLAB, segundo a Mathworks (2021), é uma plataforma de computação numérica e programação usada por engenheiros e profissionais de diversas áreas para desenvolver algoritmos, analisar dados e criar modelos. Já Python, segundo Borges (2014) é uma linguagem de programação de altíssimo nível voltada a objeto, de tipagem forte e dinâmica, interativa e interpretada.

3.3.1 Simulação Através do *Simulink*

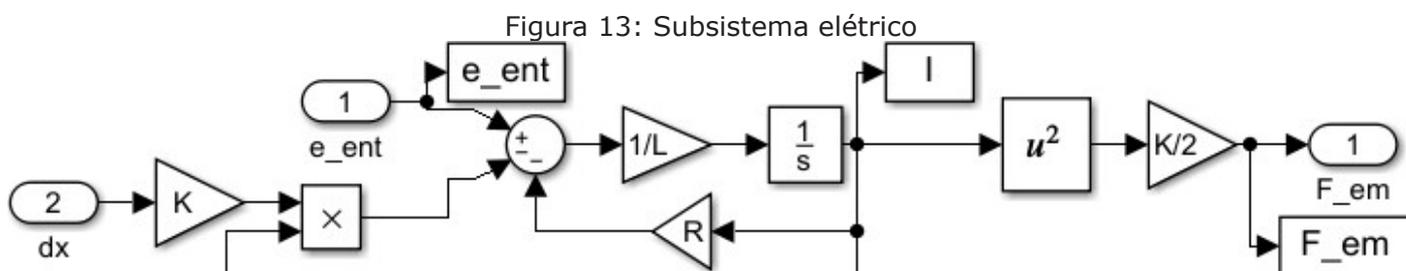
Como já citado, para obter um conjunto de dados para o treinamento da rede, utilizou-se a ferramenta de simulação *Simulink*. Construiu-se um diagrama de blocos funcio-

nal para o sistema do atuador solenoide. A figura 12 exibe o diagrama criado dentro do ambiente de simulação da ferramenta *Simulink*. Os parâmetros utilizados na simulação podem ser observados na tabela 1.



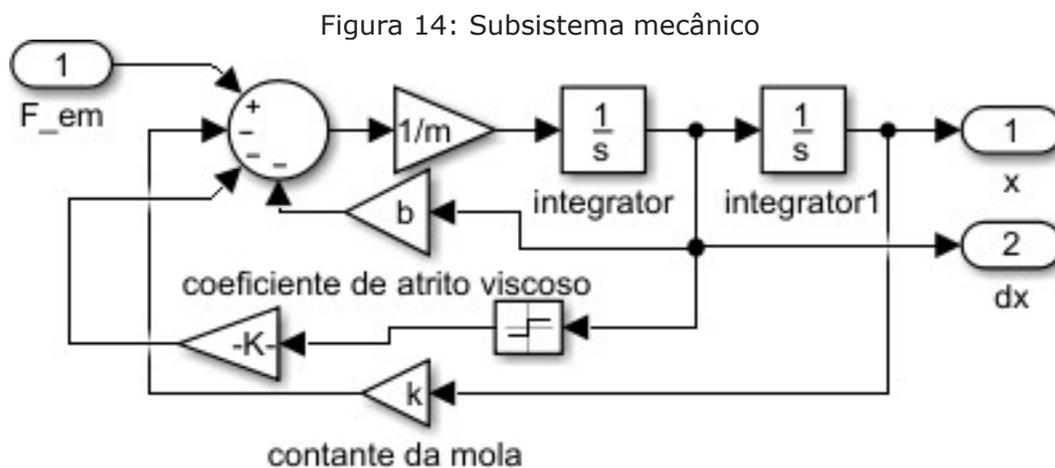
Fonte: Autor (2021)

O sistema completo é composto, ainda, por dois subsistemas: um elétrico e um mecânico. O subsistema elétrico está exibido na figura 13 e o mecânico na figura 14.



Fonte: Autor (2021)

O modelo elétrico de primeira ordem, exibido na equação 13, envolve uma única variável de estado a corrente I e duas variáveis de entrada, a fonte de tensão e e a velocidade da armadura-válvula, para determinação do termo da contra-fem.



Fonte: Autor (2021)

O modelo mecânico de segunda ordem, representado na equação 14, envolve duas variáveis de estado x e \dot{x} , requer também uma variável de entrada a força F_{em} .

Tabela 1: Parâmetros do sistema

Parâmetros do sistema	Valor
Resistência do enrolamento (R)	3Ω
Indutância do rolamento (L)	$0,005H$
Constante de força e contra-fem (K)	$6N/A^2$
Massa da armadura-válvula (m)	$0,03kg$
Coefficiente de atrito viscoso (b)	$12N.s/m$
Constante da mola (k)	$6000N/m$
Força de atrito seco (F_{seco})	$0,5N$

Fonte: Adaptado de Kluever (2018)

3.3.2 Treinamento da Rede Neural Artificial

Para o treinamento da rede MLP foi utilizado o algoritmo *back-propagation*, a fase *forward* está ilustrada na figura 15 e a fase *backward* está ilustrada na figura 16.

Figura 15: Fase de propagação (*forward*)

```
while True:
    cont += 1
    for i in range(N):
        Wb1 = np.hstack((b1.T, W1.T)) # Insere bias ao vetor de pesos W1
        # PROPAGAÇÃO (forward)
        # Entrada da 1ª camada
        Xi = np.hstack(Xb[:, i]) # Pega o i-ésimo dado de entrada
        # Saída da camada escondida
        u1 = np.dot(Wb1, Xi) # Campo local induzido da 1ª camada escondida
        y1 = sigmoid(u1) # Aplicação da função de ativação sigmoide
        # Entrada da camada de saída
        yb1 = np.hstack((bi, y1)) # Insere bias na saída da 1ª camada
        # Saída da rede
        u2 = np.dot(Wb2, yb1) # Campo local induzido da camada de saída
        Y = u2 # Aplicação de uma função de ativação linear
        # Cálculo do erro
        Yi = np.hstack(Yd[:, i]) # Pega o i-ésimo dado de saída
        e = Yi - Y # Erro da camada de saída
        E = E + pow(e, 2)
```

Fonte: Autor (2021)

Assim como ilustrado na figura 15, a fase de propagação é onde os dados de entrada são apresentados ao nó de entrada da RNA, onde é calculado o vetor campo induzido por meio da equação 2. Nessa fase é aplicada a função de ativação da equação 6, gerando assim a saída dos neurônios da camada oculta. Por fim é calculado o erro na saída da rede através da equação 7.

Assim como exibido na figura 16, a fase de retropropagação é onde os gradientes de

erro são calculados através das equações 9 e 10. É também onde os pesos sinápticos são atualizados, por meio da equação 8, de forma a minimizar o erro quadrático médio, calculado por meio da equação 11, cometido pela RNA.

Figura 16: Fase de retropropagação (*backward*)

```
# RETROPROPAGAÇÃO (backward)
# Cálculo dos gradientes
G21 = e[0]
G22 = e[1] # Gradientes da camada de saída
G23 = e[2]
# vetor gradiente da camada escondida
G1 = (y1 * (1 - y1)) * ((G21 * (Wb2.sum())) + (G22 * (Wb2.sum())) + (G23 * (Wb2.sum())))
# Atualização dos pesos
# Pesos da camada de saída
Wb2[0] = Wb2[0] + (n * G21 * yb1)
Wb2[1] = Wb2[1] + (n * G22 * yb1)
Wb2[2] = Wb2[2] + (n * G23 * yb1)
# Pesos da 1ª camada
W1 = W1 + (n * G1 * X[i])
b1 = b1 + (n * G1)
# Critério de parada
E = E / 2
Em = (E.sum()) / N
if Em <= 0.1:
    break
```

Fonte: Autor (2021)

4. RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

4.1 Modelo Neural

Após o treinamento foi obtido o modelo neural que modela o sistema para obtenção da corrente, força eletromagnética e deslocamento, a partir de uma tensão inserida na entrada da rede. Onde tal modelo neural é a rede neural artificial em si, onde essa em sua essência é regida por seus pesos sinápticos que modelam a entrada da rede para obter uma resposta desejada. Sendo assim, o conjunto de pesos sinápticos da rede, capturado da aba *Run* do PyCharm, está ilustrado na figura 17.

Figura 17: Pesos sinápticos da rede neural artificial

```
Wb1 = [[ -3.33099972  0.29921323]
 [-29.68132414  0.97526769]
 [-20.8768225  0.82751846]
 [-49.40313875  1.42465058]
 [-8.9838278  0.47214323]]

Wb2 = [[ 0.84775582  5.40254842  1.65373856  1.79168872  1.119228  1.32372111]
 [-3.8658007  87.29891777  90.65088258  89.83021643  90.26401463  90.32022229]
 [-0.6970057  14.50439072  15.02266184  15.0155519  15.11747166  15.0565793 ]]
```

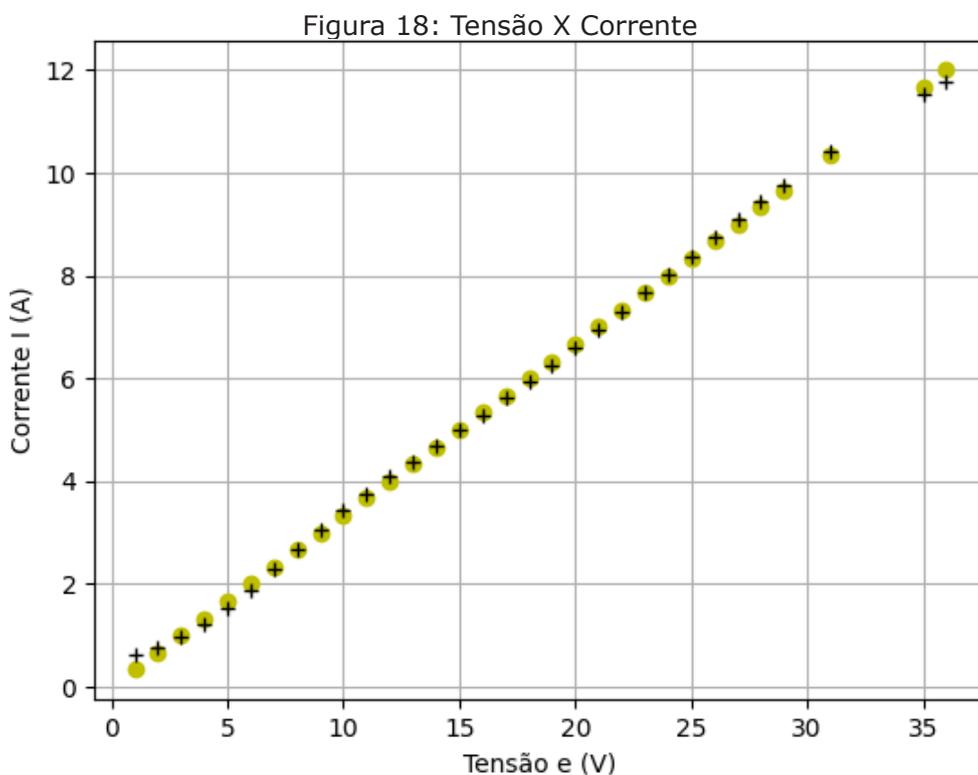
Fonte: Autor (2021)



Onde W_{b1} , é o conjunto de pesos da camada de entrada para a camada oculta e W_{b2} , é o conjunto de pesos da camada oculta para a camada de saída.

4.2 Generalização da Rede Neural Artificial

Nas figuras 18, 19 e 20 pode-se observar valores de um *dataset* de teste (obtido no *Simulink*), valores esses que até então não tinham sido apresentados a rede. O intuito de usar um *dataset* que a rede não teve acesso anteriormente, é para testar se a rede é capaz de generalizar o conhecimento obtido no treinamento. É possível observar também os valores das aproximações feitas pela rede neural, respectivamente para corrente, força eletromagnética e deslocamento total da válvula. Os pontos amarelos são os valores do *dataset* de teste e os sinais de soma são as aproximações da rede neural artificial.



Fonte: Autor (2021)

Observando a figura 18 que relaciona tensão e com a corrente I , é correto afirmar que à medida que a tensão aumenta, a corrente também aumenta de forma linear. É razoável afirmar também, que a rede foi capaz de generalizar de forma razoavelmente precisa tal comportamento linear, assim fazendo boas aproximações para os valores da corrente I .

Figura 19: Tensão X Força eletromagnética

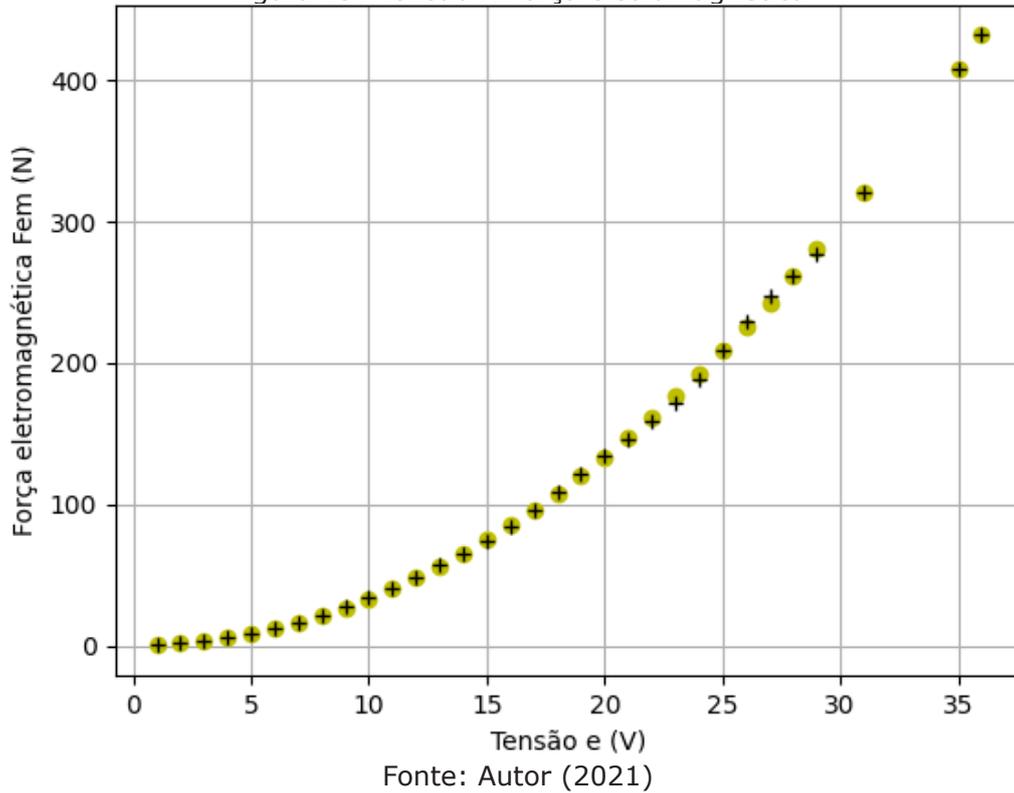
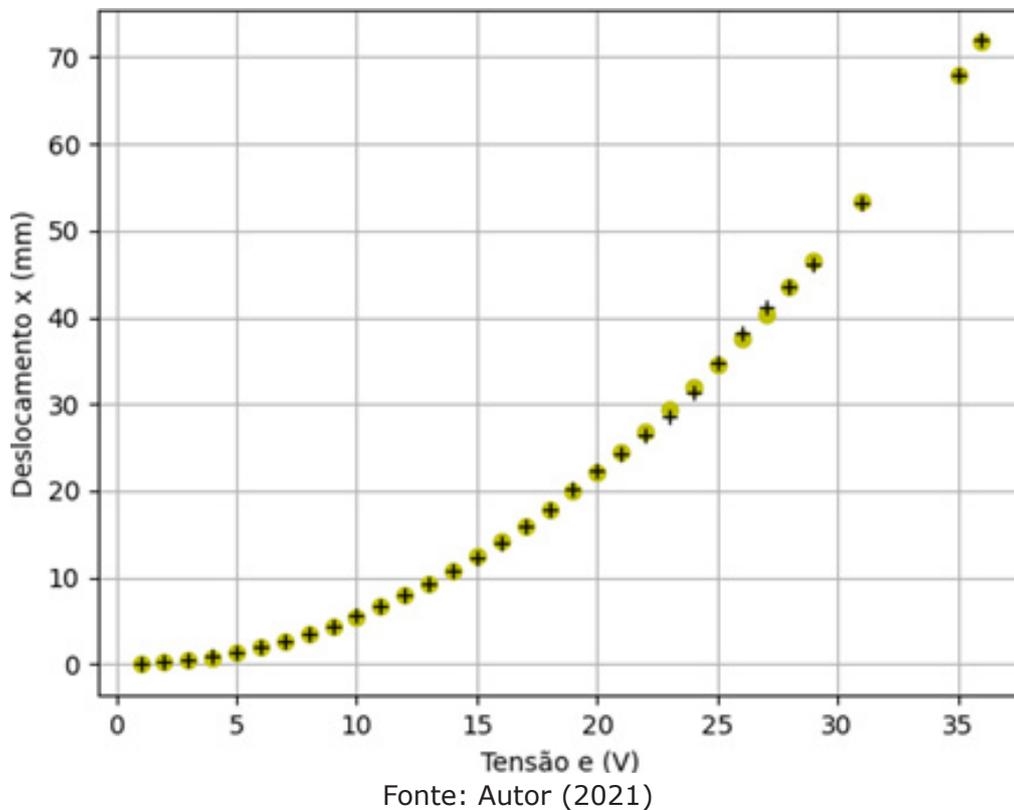


Figura 20: Tensão X Deslocamento



Observando os gráficos das figuras 19 e 20, que relacionam respectivamente, força eletromagnética F_{em} com a tensão e e deslocamento x com a tensão e . É correto afirmar que tais relações são não lineares, diferentemente da relação corrente-tensão da figura 18. Pode-se também, afirmar que a rede neural artificial alimentada adiante totalmente

conectada com múltiplas camadas, foi capaz de imitar o comportamento não linear de tais relações, assim realizando boas aproximações para as respostas de F_{em} e x . Dados diferentes valores de tensão.

5. CONCLUSÃO

Tendo em vista o objetivo inicial, que é modelar um sistema dinâmico através de uma rede neural artificial. Após análise dos resultados chegou-se à conclusão que a modelagem e simulação do sistema dinâmico proposto, um atuador solenoide, através de uma rede MLP que possui um nó de fonte na camada de entrada, 5 neurônios na camada escondida e 3 neurônios na camada de saída, foi eficiente, de modo que foi capaz de generalizar o conhecimento adquirido no treinamento, para dados de entrada não apresentados a mesma anteriormente. Assim fornecendo boas aproximações para as respostas da corrente na bobina, da força eletromagnética gerada e do deslocamento. Sendo capaz de mimetizar de forma satisfatória o comportamento das relações de I , F_{em} e x com a tensão e . Evidenciando, assim, a eficiência das redes neurais artificiais como ferramenta auxiliar no processo de modelagem e simulação.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, a minha família pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis. Agradeço também ao professor Hilton Seheris pela orientação e aos meus amigos de graduação André Barros, Daniel Ayrton, Elielson Alves e Vinicius Duarte. Pela companhia e ajuda durante minha jornada acadêmica, agradeço a eles também por seus comentários e análises que contribuíram para elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

- BISTAFA, Sylvio R. **Mecânica dos Fluidos: Noções e Aplicações**. São Paulo: EdgardBlücher Ltda, 2018.
- BORGES, Luiz Eduardo. **Python para Desenvolvedores: Aborda Python 3.3**. São Paulo: Novatec, 2014.
- CARVALHO, André Carlos Ponce de León Ferreira *et al.* **Inteligência Artificial: Uma Abordagem de Aprendizado de Máquina**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- CHURCHLAND, Patricia S.; SEJNOWSKI, Terrence J. **The Computational Brain**. Massachusetts: The MIT Press, 1992.
- COPPIN, Ben. **Inteligência Artificial**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- HAYKIN, Simon. **Redes Neurais: Princípios e Prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- KLUEVER, Craig A. **Sistema Dinâmicos: Modelagem, Simulação e Controle**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- LIMA, Isaías; PINHEIRO, Carlos A.M.; SANTOS, Flávia A. Oliveira. **Inteligência Artificial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- MATHWORKS. **MATLAB**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso



em: 15 abr. 2021.

MONTEIRO, Luiz Henrique Alves. **Sistema Dinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: PearsonPrentice Hall, 2010.

VILLATE, Jaime E. **Introdução aos Sistemas Dinâmicos: Uma Abordagem Prática com Máxima**. Porto: Universidade do Porto, 2007.



CAPÍTULO 8

A EFICIÊNCIA DO ALUMÍNIO COMO FONTE DE HIDROGÊNIO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

THE EFFICIENCY OF ALUMINUM AS A HYDROGEN SOURCE: A LITERATURE REVIEW

Matias Alencar da Silva¹

Rialberth Matos Cutrim²

1 Aluno concludente do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade CEUMA- matias76118@ceuma.com.br

2 Orientador- Professor Mestre em Engenharia Mecânica da Universidade CEUMA- rialberth.cutrim@ceuma.br

Resumo

O hidrogênio é um elemento químico de grande abundância no planeta terra. O mesmo também é uma excelente fonte de energia por unidade de massa do que qualquer outro combustível conhecido. Ele pode ser obtido através de diversas fontes, sejam elas renováveis ou não, assim sendo considerado um vetor energético. Com isso, o objetivo principal deste artigo é verificar a eficácia do alumínio como fonte de hidrogênio. Mediante o exposto, para que o objetivo fosse atendido, foram utilizados métodos qualitativos e bibliográficos utilizando-se artigos, monografias e dissertações pertinentes ao tema. Assim, conclui-se que é possível realizar a retirada de hidrogênio do alumínio por meio do uso de ácidos para a produção de combustível. Além disso, com esses achados, conclui-se que a produção energética através do hidrogênio traz uma grande revolução ambiental para o país e o mundo, pois é um meio de produção limpo e sustentável, permitindo novas perspectivas na produção energética do país.

Palavras- chave: Hidrogênio. Alumínio. Fonte de Energia.

Abstract

Hydrogen is a chemical element of great abundance on planet Earth. It is also an excellent source of energy per unit mass than any other known fuel. It can be obtained from different sources, whether they are renewable or not, thus being considered an energy veto. Thus, the main objective of this article is to verify the effectiveness of aluminum as a source of hydrogen. Based on the above, in order for the objective to be met, qualitative and bibliographic methods were used, using articles, monographs and dissertations relevant to the theme. Thus, it was possible to conclude that it is necessary to carry out the removal of hydrogen from aluminum through the use of acids for the production of fuel. In addition, with these findings, it is concluded that energy production through hydrogen brings a great environmental revolution for the country and the world, as it is a clean and sustainable means of production, allowing new perspectives in the country's energy production.

Key-Words: Hydrogen. Aluminum. Energy source.



1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional e conseqüentemente o aumento do consumo energético, é notório que os países estão passando por grandes mudanças na produção de energia. A preferência é por fontes renováveis, não poluentes e sustentáveis que motiva as nações a irem em busca de novas alternativas, que tragam qualidade e eficiência.

O alumínio é um elemento que apresenta considerada atividade reativa, ou seja, alta capacidade de perder elétrons. Quando esse metal entra em contato com alguns materiais, ele forma uma fina camada em sua superfície (óxido de alumínio) como forma de conter a reatividade. Com isso, apesar do alumínio ser consideravelmente reativo e sob determinadas condições chegar a produzir hidrogênio em sua reação, sua camada passiva impede a produção em cadeia de hidrogênio, que é um elemento viável como combustível.

Neste contexto, o hidrogênio é considerado um combustível relevante, principalmente por se tratar de uma fonte de energia renovável, inesgotável e não poluente, que visa benefícios para toda a humanidade, incluindo o meio ambiente. Ele é caracterizado por possuir maior quantidade de energia por unidade de massa comparado a qualquer outro combustível conhecido.

Conforme mencionado, o uso do hidrogênio como combustível, traz diversos benefícios e poucos são os estudos voltados a esse elemento químico como fonte energética. Desta forma, este trabalho de conclusão de curso é necessário ser realizado, pois trata-se de um tema relevante, não só para a comunidade acadêmica, como também para toda a humanidade.

Assim, dados do Centro de Gestão e Estudos Estratégico (CGEE) mostram que o Brasil é líder em Pesquisa Desenvolvimento e Inovação (PD&I) em tecnologias de hidrogênio na América Latina, diante disso, o objetivo principal deste trabalho é verificar a eficiência do alumínio como fonte de hidrogênio e para complementação, objetiva-se, especificamente, analisar aspectos gerais sobre o alumínio e o hidrogênio, identificar a importância do alumínio para a produção do hidrogênio, descrever o processo de produção do hidrogênio através do alumínio, identificar as vantagens da substituição do uso de combustíveis fósseis pelo hidrogênio como fonte de combustível e compreender o princípio do funcionamento das células a combustível.

Para atingir os objetivos supracitados, o trabalho está composto com um referencial teórico contendo informações sobre os elementos químicos alumínio e hidrogênio, bem como, importância e produção de hidrogênio através do alumínio (Eletrólise). Nos resultados e discussões estão presentes os itens sobre eficiência do alumínio como fonte de hidrogênio, vantagens da substituição do uso de combustíveis fósseis pelo hidrogênio como fonte de combustível e por último, está descrito o princípio do funcionamento das células a combustíveis.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Alumínio

A história do alumínio teve início em 1824 quando o cientista Hans Christian Oersted anunciou em uma Academia Dinamarquesa que ele havia conseguido obter o alumínio através do aquecimento lento de cloreto de alumínio e amálgama de potássio. Após um espaço de tempo, Frederick Whoeler conseguiu classificar o elemento em um metal maleável. Assim, apesar dessas descobertas, após trinta anos Henry Saint Claire Deville, expôs a primeira barra de alumínio produzida através da solução de cloreto de amônio e sódio, sendo notável a substituição do potássio pelo sódio (NAGEM, 2013; ROMANO *et al.*, 2016).

Mais tarde, em 1821, descobriu-se a bauxita como principal matéria prima para extração desse metal. O método tinha como base a calcificação de uma mistura de bauxita junto ao carbonato de sódio a 1.200°C seguida de uma lixiviação do clínquer (ROMANO *et al.*, 2016). Logo após 30 anos, Charles Martin Hall realizou a dissolução de óxido de alumínio em banho de fluoreto de sódio e alumínio e se utilizando da corrente elétrica conseguiu expor o elemento no estado metálico (NAGEM, 2013).

Em paralelo aos trabalhos de Hall, Paul Louis Héroult, conseguiu fazer a mesma descoberta e ainda descreveu o método eletrolítico para obtenção do material em questão, desta forma o processo eletrolítico para obtenção do metal foi chamado de processo de Hall- Héroult (NAGEM, 2013; ROMANO *et al.*, 2016).

Neste contexto, entre vários outros elementos químicos que são estudados, o alumínio tem ganhado destaque na produção do hidrogênio, um elemento químico com baixo poder calórico no que se refere à quantidade de energia que um combustível libera, principalmente por ser um material reciclável e por se apresentar em abundância na natureza. A técnica de extração do hidrogênio através desse metal é viável, uma vez que ele apresenta um alto teor de pureza (99%) e não emite poluentes para o meio ambiente (PEREIRA, 2017).

2.2 Hidrogênio

Jeremy Rifkin, economista americano, em seu livro 'A Economia do Hidrogênio' destaca a importância do aproveitamento do hidrogênio como fonte de energia. Ele enfatiza que o hidrogênio é fundamental para a sociedade desde quando os barris de petróleo, nos anos 70 e 80, tiveram seus preços exorbitantes, por situações políticas e econômicas. O autor dá sinais de que o investimento no hidrogênio poderia representar uma libertação do uso direto do petróleo, já que o uso de reservas de fósseis, em diversos países, traz consequências para a geração de energia e questões geopolíticas relacionadas (RIFKIN, 2003 *apud* ANDRADE, 2003).

Após a crise do petróleo, destacada anteriormente, o EUA e países da Europa fizeram maiores investimento para estudo do elemento em questão, onde prevalece uma ideia de



retirada dos combustíveis fósseis para a adesão da tecnologia voltada ao hidrogênio. Ainda sobre essa perspectiva, Rifkin explana a importância das células de combustíveis, as quais podem ser definidas como “substâncias provenientes do hidrogênio capazes de produzir eletricidade em grande quantidade”. Desta maneira, elas são diferentes das baterias convencionais, porque produzem energia à medida que são alimentadas por combustíveis externos. Vale ressaltar que elas produzem grandes quantidades de energia, mas com pequenas fontes de produção o que, segundo o autor, é um subsídio importante para defini-la como uma fonte de energia sustentável (RIFKIN, 2003 *apud* ANDRADE, 2003, p. 225).

A busca por energia limpa e renovável tornou-se razão para os diversos investimentos na pesquisa por todo o mundo, pois o propósito principal é solucionar os problemas ambientais causados por combustíveis fósseis, os quais são os maiores responsáveis pela emissão de gás carbônico para a atmosfera e conseqüentemente provocam o aumento do efeito estufa no planeta (gasolina, óleo diesel, querosene, gás natural e outros). Desta maneira, sendo o hidrogênio um combustível alternativo, traz soluções para esse tipo de problema, pois ele existe em abundância no universo, possui elevada quantidade de energia por unidade de massa e, quando é utilizado, libera ao meio ambiente apenas a molécula da água (H₂O) (ESTÊVÃO, 2008).

Contudo, o hidrogênio não se apresenta livre no universo, boa parte da sua obtenção é por meio de processos, tais como: gaseificação de combustíveis (gás natural, biomassa e carvão) e pela própria eletrólise da água (ESTÊVÃO, 2008; PORCIÚNCULA, 2013).

Vale destacar que atualmente, são produzidas cerca de 40 milhões de toneladas de hidrogênio por todo o mundo, dados estes que tendem a aumentar no decorrer dos anos. Em 2010, o CGEE mostrou que no Brasil, o mercado aproximava-se de 920 mil toneladas por ano. Diante disso, é importante enfatizar que os setores que mais se destacam nessa produção são as refinarias de petróleo, as indústrias de fertilizantes, siderúrgicas, e outros, percebendo-se que se trata de um hidrogênio proveniente de combustíveis fósseis, não renováveis.

Vale ressaltar que o gás hidrogênio é muito inflamável. Ele é capaz de queimar 4% no ar, sendo sua equação balanceada conforme mostra a equação 1.



A combustão tem um valor de entalpia de (ΔH_c°) é de -286 kJ/mol , que se define como a energia liberada em forma de calor por meio da queima de 1 mol de qualquer substância estando os reagentes no estado padrão de temperatura (25°C) e pressão de (1 atm). A temperatura de ignição do hidrogênio é de 560°C por consequência da grande quantidade de energia que é liberada (JUNIOR, 2017).

2.3 Importância do alumínio na extração do hidrogênio

É evidente a grande importância dos achados desses estudiosos, pois o alumínio apresenta diversas utilidades para a sociedade e trata-se de um material de boa aparência, facilidade na fabricação, boa resistência à corrosão, baixa densidade, alta proporção de



força para o peso e alta resistência à fratura. Além disso, a alta capacidade do alumínio reagir com outros elementos possibilita sua aplicação em diversas áreas. Normalmente são usados em estruturas de embarcações, aeronaves, veículos terrestres e no revestimento de embalagens de determinados produtos.

Contudo, o alumínio também apresenta diversas variações químicas, entre elas destaca-se o hidróxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$ que em sua forma não-cristalina é capaz de se polimerizar em meio aquoso, pois ele é classificado como anfótero, termo usado por se tratar de uma molécula capaz de reagir tanto com uma base como com um ácido. O formato amorfo anfótero, reage com ácido para formar sais que compõem o íon $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ (ROCHA, 2013).

Neste contexto, entende-se a importância da extração do hidrogênio por meio da utilização do alumínio, pois para sua obtenção é necessário que haja uma reação química entre o metal e a água, todavia, se o metal for alcalino, ele pode apresentar uma reação extremamente violenta, o que não ocorre se o metal for o alumínio, uma vez que a reatividade acontece de forma mais controlada.

Ressalta-se que essa reação alumínio- água advém na presença de álcalis em solução aquosa principalmente NaOH e KOH. Em suma, o alumínio pode ser definido como uma fonte indireta de energia, uma vez que libera hidrogênio durante a corrosão no meio alcalino (PORCIÚNCULA, 2013).

2.5 Produção de hidrogênio através do alumínio: Eletrólise

A eletrólise é o método mais defendido de produção do hidrogênio, pois é uma fonte de energia limpa, onde só são liberados os átomos de hidrogênio e oxigênio. Vale destacar que apesar de ser um método positivo para o meio, trata-se de um processo que não ocorre espontaneamente, mas necessita de uma grande quantidade de energia para que aconteça, o que conseqüentemente requer maior investimento financeiro (PEREIRA, 2017).

Um dos maiores problemas na utilização do método de eletrólise é justamente esse consumo de energia elétrica, todavia, a maior vantagem desse processo consiste na integração da produção de energias renováveis com a eletrólise da água (JUNIOR, 2017).

O processo de extração ocorre, de maneira simplificada, assim: no momento em que o alumínio entra em contato com o NaOH, ele se dissolve promovendo a liberação do hidrogênio, o que gera o aluminato de sódio (NaAlO_2) e hidrogênio (H_2). Essa reação é disposta conforme a equação 2 (SANTOS, 2018):



Essa reação é classificada como exotérmica, porque libera calor. Como a temperatura se eleva rapidamente, promove fervura na água, o NaOH libera calor para absorver na água e a reação também libera calor. O aluminato deixa a água na cor preta e o hidrogê-



nio é dissipado no ar (SANTOS, 2018). É justamente este hidrogênio dissipado no ar que vai servir de fonte de energia principalmente para as células de combustíveis, usadas em aeronaves, por exemplo, assunto tratado nos próximos itens deste trabalho.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente projeto trata-se de um estudo descritivo do ponto de vista dos objetivos delimitados. Para a análise dos dados serão utilizados os métodos qualitativos e bibliográficos de pesquisa, uma vez que serão levantados artigos, monografias e dissertações pertinentes ao tema, em plataformas como a Scielo, Google Acadêmico e Capes.

A pesquisa descritiva, exige do investigador uma vasta quantidade de informações as quais se deseja estudar. Quanto ao procedimento adotado, a pesquisa bibliográfica, refere-se a um levantamento de teorias e trabalhos da literatura que darão embasamento ao que está sendo analisado. No que se refere à abordagem, o estudo qualitativo não se detém a dados numéricos, mas à compreensão do que está sendo levantado (GERHARDT, 2009).

Para a escolha dos materiais bibliográficos utilizados, o critério de seleção teve como base a presença dos descritores: alumínio, hidrogênio, fonte de energia ou célula de combustível. Um ou mais dos descritores eram essenciais estarem presentes no título e no resumo do trabalho, para melhor restringir o assunto em estudo. Neste contexto, vale ressaltar que descritores são palavras organizadas que facilitam a pesquisa dos artigos e trabalhos científicos em geral (BRANDAU; MONTEIRO; BRAILE, 2005).

Neste estudo o foco principal será a análise da eficácia do alumínio na produção do hidrogênio- uma fonte de combustível limpa-, identificando aspectos relacionados a importância desse procedimento, determinando as vantagens dessa extração e compreendendo o funcionamento da célula de combustível proveniente do uso do hidrogênio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Eficiência do alumínio como fonte de hidrogênio

O foguete de sondagem brasileiro Sonda IV é um exemplo da aplicabilidade e eficiência do alumínio para a produção de combustível, com um bloco de propelente à base de perclorato de amônio e pó de alumínio (PALMERIO, 2017).

Conforme o que foi supracitado, é notório a presença do alumínio como um dos constituintes principais na geração de energia. Sendo assim, é importante destacar que o alumínio metálico, apenas por entrar em contato com o ar atmosférico (O_2), forma uma camada passiva em sua superfície. Para isso, certas substâncias químicas são capazes de eliminar essa camada e produzir o hidrogênio.



Vale ressaltar que estudos apontam uma eficiência energética global de 20% no processo de reciclagem do óxido de alumínio gerado. Isto faz referência ao uso de células combustíveis, importantes ferramentas na produção de energia, com uso do hidrogênio, por exemplo, sem prejuízos ambientais.

Logo, verifica-se a importância do uso do hidrogênio como fonte de combustível, sendo relevante salientar que os dados presentes na literatura confirmam a eficiência na produção do hidrogênio utilizando metais em meio aquoso, como no caso do alumínio, que é encontrado com grande abundância na natureza e é bastante usado na fabricação de diversos produtos de uso pessoal. Os parágrafos seguintes trazem dados da literatura que mostram a eficiência da produção do hidrogênio através do alumínio.

Em um estudo realizado por Slama (2013), objetivou-se produzir o hidrogênio por eletrólise da água fazendo o uso da energia fotovoltaica. Neste experimento, foram utilizados sete materiais metálicos, entre eles o alumínio. Também se empregou células eletrolíticas com o eletrólito sendo uma solução de NaCl (em condições ambientes de 25°C em 1atm de pressão). Diante disso, pode-se confirmar que houve eficiência no uso desse metal quanto ao fluxo de hidrogênio produzido.

Outro trabalho realizado por Kargi (2011), que também procurou estudar a produção do hidrogênio pela hidrólise de compostos orgânicos presentes em águas residuais industriais utilizando painéis fotovoltaicos, mostrou a eficiência de conversão de energia para a produção de gás hidrogênio (energia hidrogênio/ energia elétrica) o qual foi encontrado 74% de eficiência com os elétrodos de alumínio, dados superiores ao encontrados nas análises com o grafite e o aço inoxidável (0,92% e 42%).

Em complementação e afirmação dos dados apontados anteriormente, vale ressaltar a análise realizada por Fatouth *et al.*, (2013) que objetivou avaliar a produção do hidrogênio a partir de um álcali eletrolizador sobre vários sistemas operacionais e parâmetros geométricos, tais como concentrações do eletrólito KOH de 5 a 45%, temperatura de 40 a 70% e outros. Com o trabalho, foi possível mais uma vez concluir que, com o eletrodo de alumínio foi encontrada a maior produção de hidrogênio (134 cm³/min), dado esse superior aos do aço inoxidável, eletrodo de titânio, de cobre e do aço galvanizado.

É interessante mostrar que a produtividade do hidrogênio como fonte de energia, além de já ser considerada uma fonte limpa e sustentável, pode se tornar ainda mais benéfica quando se observa o trabalho realizado por Quadros *et al.*, (2014). A pesquisa propôs a utilização de latas de bebidas recicláveis como fonte de alumínio para realização da extração do hidrogênio. A reação foi realizada com KOH ou NaOH em concentrações que variaram de 1 a 5molL⁻¹ a temperaturas que variavam de 25 a 45°C. Ele concluiu que é possível produzir o hidrogênio via corrosão alcalina de alumínio e identificou que o procedimento é vantajoso quanto às questões econômicas principalmente por se tratar de uma matéria prima reciclável.

Em síntese, a eficiência do alumínio como fonte de hidrogênio é notória diante do cenário apresentado anteriormente. Dessa forma, é indiscutível as vantagens da substituição do uso de combustíveis fósseis pelo hidrogênio como fonte de combustível, pois além de ser facilmente produzido, não provoca impactos ambientais, pode ser extraído de materiais recicláveis e ainda apresenta bons resultados de caráter comercial.



4.2 Vantagens da substituição do uso de combustíveis fósseis pelo hidrogênio como fonte de combustível

Há centenas de milhões de anos a matéria orgânica surgiu e conseqüentemente passou pelo ciclo de vida terminando em morte e sofrendo decomposição. Diante disso, com a influência do ambiente essa matéria orgânica era depositada em fundos lodosos e foram se acumulando.

Com o passar dos tempos, várias camadas foram se sobrepondo na terra e conseqüentemente foram se fossilizando e viraram materiais homogêneos dando origem ao carvão mineral, por exemplo. Em outras situações a matéria orgânica presente em meios aquáticos também morreu e seu material foi incorporado em leitos de mares e lagos formando os componentes básicos para o petróleo. Diante de altas temperaturas e pressões, também foram sendo criadas condições favoráveis para criação de gases (CARVALHO, 2008).

Todo esse material se transformou em petróleo, gás natural e carvão e são conhecidos como combustíveis fósseis, pois com o beneficiamento desses materiais, é possível a produção de combustível e conseqüentemente de energia.

O uso de combustíveis fósseis faz parte da matriz energética mundial e está relacionado à insustentabilidade, neste cenário, é necessário que sejam usadas fontes de energia renováveis, para que não haja grandes impactos ao meio ambiente.

A grande preocupação quanto a não substituição dos recursos não renováveis é a emissão de poluentes na atmosfera, fator este que trás sérios riscos ao aquecimento global com o aumento do efeito estufa. O gás carbônico (CO_2) e o gás metano (CH_4) estão entre os principais vilões neste contexto.

Apesar de mundialmente o uso de combustível fóssil ainda possuir preferência, principalmente pela abundância e possuir melhor custo-benefício comparado às fontes de energias alternativas, no Brasil, segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégico (CGEE, 2010) os recursos renováveis também são abundantes e existe um aumento no uso de fontes renováveis. Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias para a economia do hidrogênio trará grande eficiência energética e ainda abrirá portas ao país em participar do mercado mundial de equipamentos e serviços que sejam relacionados às energias renováveis, incluindo o uso do hidrogênio.

O CGEE (2010) apresenta um enorme incentivo governamental quanto ao uso de tecnologias para o uso do hidrogênio como fonte de combustível, entre as vantagens são destacadas: diminuição de impactos ambientais na geração e utilização de energia, aumento da segurança energética, melhora quanto ao uso e aproveitamento de recursos naturais, desenvolvimento regional, desenvolvimento de parque industrial competitivo e geração de emprego.

Além dessas, há a necessidade de uma diversificação da matriz energética no nosso país com o uso de combustíveis renováveis, pois diminui a necessidade de depender da exportação de combustíveis fósseis, produz hidrogênio através do gás natural, contribui para desenvolvimento da base tecnológica para atribuir confiabilidade aos consumidores

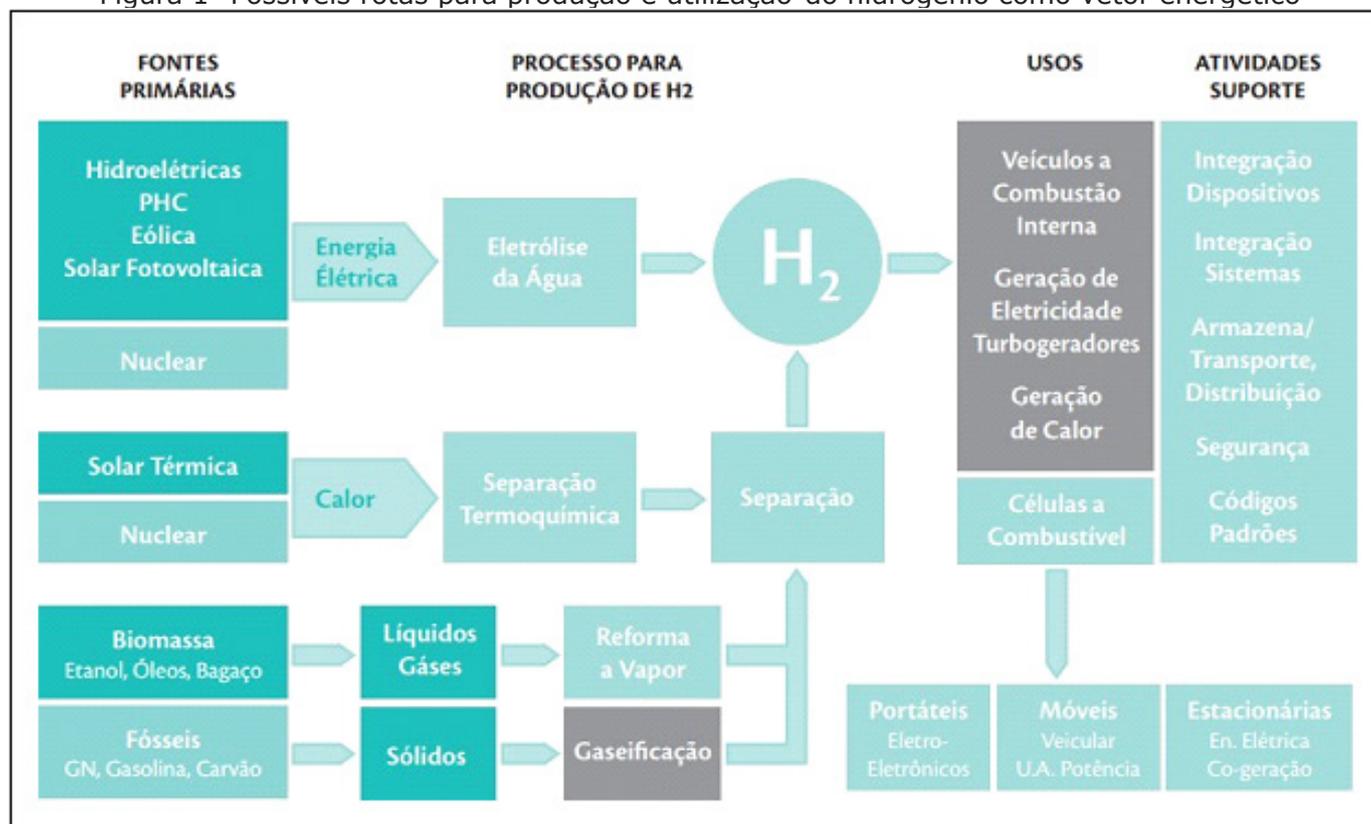


e auxilia na participação da indústria nacional de bens e serviços no desenvolvimento da nova economia. Tudo isso contribuirá para a melhoria ambiental e financeira do nosso país (CGEE, 2010).

Ainda sobre as vantagens da substituição dos combustíveis fósseis pelo hidrogênio, enfatiza-se os meios de transportes, já que são eles os principais emissores dos gases poluentes para a atmosfera. Todavia, vale ressaltar que o hidrogênio não é encontrado livremente no meio ambiente, ele precisa passar por algum processo para que seja utilizado. Ele normalmente está ligado a um outro elemento ou composto químico. Ainda assim, a fonte para encontrar átomos de hidrogênio não tem limites, pois se trata de um elemento que possui em grande abundância no planeta, de maneira que qualquer composto que contenha seus átomos na sua composição tem potencial para produzir esse combustível.

Vale destacar que uma das vantagens na utilização do elemento químico em questão é que ele pode ser produzido através de diversos insumos e processos como é observável na figura 1.

Figura 1- Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético



Fonte: CGEE, 2010.

É inquestionável que o uso do hidrogênio como fonte de combustível carrega diversas vantagens, principalmente quando falamos em sustentabilidade, e essa eficiência fica mais evidente quando associada à utilização de células a combustível na função de converter o hidrogênio em energia elétrica.

As vantagens quanto ao uso das células a combustível são inúmeras, inclusive para uso veicular levando-se em consideração as maiores eficiências desses sistemas, obtidas pelo conjunto célula a combustível e motor elétrico e também às emissões locais quase inexistentes (CGEE, 2010).

4.3 Células a combustíveis

Cientistas de vários países tem lançado esforços no uso de hidrogênio como combustível alternativo em motores de combustão interna e também para a fabricação de Células a combustível em Veículos Híbrido-Elétricos. Além disso, o hidrogênio pode ser usado como combustível em motores de ignição por centelha e em motores com ignição por compressão (DAMASCENA, GOÉS, 2013).

Entre todas essas opções, a célula a combustível é considerada o melhor meio para se utilizar o hidrogênio como combustível. Neste cenário, a eficiência é representativa e a maneira de operar é mais segura comparada aos motores a combustão. É importante destacar que os motores clássicos que fazem o uso de hidrogênio são considerados mais viáveis do que os motores convencionais.

Um outro aspecto importante de ser mencionado, quanto ao uso do hidrogênio como combustível, é que o hidrogênio não sofre a queima da maneira tradicional, na verdade ele passa por um processo eletroquímico que realiza a conversão da energia armazenada em corrente elétrica liberando uma quantidade mínima de calor e também de água (JUNIOR, 2017).

Outrossim, o entendimento sobre as propriedades eletroquímicas dos metais ajudou no desenvolvimento das recentes tecnologias das baterias. Isso inclui as células de combustíveis (Células de Energia), que são tipos de baterias de funcionamento contínuo que possuem a capacidade de produzir corrente pela combustão eletroquímica (combustão fria) através de um combustível gasoso tal qual o hidrogênio. Em outras palavras, são dispositivos eletroquímicos capazes de converter o hidrogênio em energia elétrica, conforme citado anteriormente (ANDRADE; LORENZI, 2015).

Essas características das células a combustível permitem destaca-las como uma excelente forma de inovar os motores clássicos, bem como as baterias em diversas formas de aplicação dentro da sociedade, uma vez que o mundo tem girado em torno da busca por melhores fontes de energia, as quais sejam compensatórias tanto para questões financeiras quanto ambientais.

Em geral, as células a combustíveis são movidas por gases, que podem ser CO₂, CO ou o próprio H₂, objeto de estudo deste artigo. Diante disso, entende-se que o uso do hidrogênio como um vetor energético pode ser produzido pelo uso de biomassas e biocombustíveis, pela energia elétrica de fontes limpas como eólica, solar e hidráulica e ainda pode transformar a eletricidade em energia transportável e armazenável. Todas essas maneiras são identificadas como eficientes quando associada à utilização de células a combustível (CGEE, 2010).

Essas células baseadas em hidrogênio, conferem muitas vantagens quando comparadas aos meios de produção de energia convencionais, entre essas vantagens tem-se a inexistência de poluição lançada ao meio ambiente, pois o produto gerado durante a reação é exclusivamente a água; a alta eficiência comparada às tecnologia existentes e também a simplicidade, uma vez que os componentes da célula são simples, não apresentam partes móveis e tem baixo ruído, beneficiando seu uso em locais como hospitais e residências (GOMES *et al.*, 2014).



4.3.1 Princípio do funcionamento das células a combustível

As células a combustível de membrana condutora de prótons são as mais usadas na produção energética com o hidrogênio. As eficiências elétricas obtidas por essas células estão em torno de 45 a 60% conforme Nascimento (2009).

Ainda, entre as eficiências é válido destacar que funcionam com baixa temperatura de operação, com valores entre 60 e 140°C, sendo o tempo para início do funcionamento pequeno comparado a outros tipos de células a combustível (GOMES *et al.*, 2014). Diante do exposto, o hidrogênio é oxidado a prótons dentro de um eletrodo o qual libera os elétrons conforme a equação 3:



Com relação ao eletrodo oposto, tendo como base as membranas que trocam de prótons (meio ácido), resulta na equação 4:



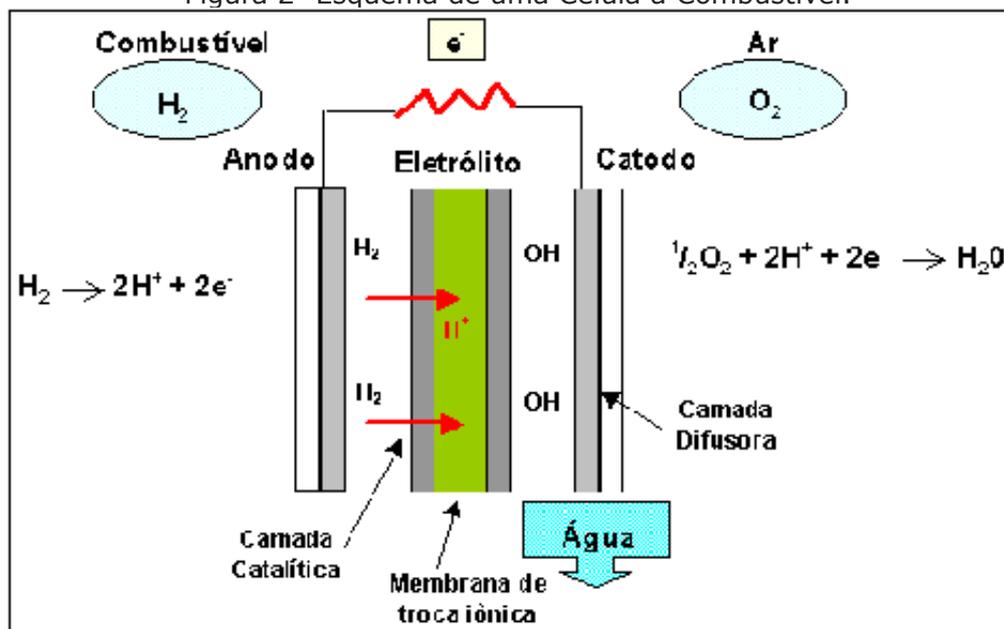
Em suma, a reação global pode ser escrita da seguinte forma (Equação 5):



Na figura 2, verifica-se o esquema de uma célula a combustível com seus principais componentes e elementos fundamentais para o bom funcionamento da produção de energia utilizando o hidrogênio. Vale ressaltar que para que estas reações ocorram continuamente, entende-se que os elétrons produzidos no anodo devem migrar através do circuito elétrico para o catodo (GOMES *et al.*, 2014).

Tanto a célula a combustível que utiliza eletrólito ácido quanto a que utiliza eletrólito alcalino, o princípio de funcionamento é basicamente o mesmo, o que muda é que em uma o eletrólito permite a passagem apenas de íons hidróxidos (OH⁻) (alcalina), e na outra o fluxo do íon OH⁻ é o inverso do fluxo do íon H⁺ nas células (ácido).

Figura 2- Esquema de uma Célula a Combustível.



Fonte: Pereira, 2021.

Evidencia-se que uma célula a combustível gera o equivalente a 0,7V, o que não é suficiente para determinadas funções. Diante disso, foram criadas essas células em série como forma de melhorar seu desempenho e conseqüentemente aumentar a voltagem a ser produzida. Este processo é chamado de *stack* (pilha). Devido à geração de pouca voltagem, quando a pilha se conecta na borda de um ânodo com a borda de um cátodo as perdas seriam significativas principalmente pela resistência do meio (JUNIOR, 2017).

A fim de que essas perdas não aconteçam, é importante usar uma placa bipolar conforme Junior (2017, p. 29):

Para que essas perdas não ocorram, deve-se utilizar uma placa bipolar, fazendo conexão através de toda a superfície do ânodo com toda a superfície do cátodo de outra célula. Ao mesmo tempo que a placa bipolar reduz perdas com resistência, ela também proporciona melhor distribuição do oxigênio para o cátodo e hidrogênio para o ânodo.

Em síntese, essas células são muito eficientes como provedoras de energia elétrica, além disso, são simples de operar, não apresentam partes móveis nem engrenagens complexas, o que contribui como um sistema duradouro e confiável. Ainda assim, são silenciosas, o produto final é a água e libera pouca quantidade de calor. Por outro lado, a grande desvantagem no momento é com relação à fase de desenvolvimento e os custos atrelados a elas, pois ainda possuem valores muito elevados inviabilizando sua utilização em massa. Contudo, acredita-se que, devido aos esforços que têm sido empregados para a utilização de fontes de energia mais sustentáveis, mais investimentos serão realizados e as dificuldades quanto ao uso das células diminuirão com o passar dos tempos.

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise sobre a eficiência do alumínio como fonte de hidrogênio, um elemento capaz de ser utilizado como combustível em setores automobilísticos, industriais e aeroespaciais, por exemplo. Além disso, também permitiu uma pesquisa bibliográfica sobre o alumínio, modo de extração do hidrogênio através do alumínio, vantagens da substituição de combustíveis fósseis por hidrogênio combustível e células a combustíveis de maneira geral.

No sentido de atender os objetivos delimitados no trabalho, pode-se entender que vários estudos têm demonstrados a eficiência na extração do hidrogênio, utilizando-se o alumínio, pois os estudos mostraram a viabilidade dos processos, confirmando a importância dessa fonte de combustível.

Quanto às vantagens da substituição de combustíveis fósseis pelo uso do hidrogênio, é indiscutível que esta tornou-se um padrão ouro dentro das novas tecnologias de produção de energia, uma vez que se trata de um produto capaz de produzir energia sem afetar diretamente o meio ambiente, podendo ser classificado como um meio sustentável.

Na sequência, concluiu-se que as células a combustíveis são ferramentas fundamentais na atualidade, pois ela apresenta-se com alta eficiência na produção energética com o uso de um combustível gasoso (hidrogênio, por exemplo), e é um excelente aparato comparado aos meios de produção de energia convencionais.

Dada à importância do assunto, torna-se necessário o desenvolvimento de mais pesquisas sobre esta temática, pois o mundo tem como matriz energética o uso de combustíveis fósseis, mas essa realidade pode ser mudada, começando primeiramente pela dissipação desses conhecimentos e seguido de maiores investimentos governamentais. Sendo assim, o planeta agradecerá e a sociedade poderá ter um futuro melhor, pois se continuar assim, o aquecimento global vai aumentar, os poluentes continuarão prejudicando nossa saúde e conseqüentemente a vida no planeta ficará comprometida.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. A economia do hidrogênio. **Ambiente & Sociedade**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 223-226, 2003. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2003000200014>. Acesso em: 26 abr. 2021.

ANDRADE, T. N.; LORENZI, B. R. Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no Brasil. **Sociedade e Estado**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 727-747, dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-69922015.00030007>. Acesso em: 08 jun. 2021.

BRANDAU, R.; MONTEIRO, R.; BRAILE, D. M. Importância do uso correto dos descritores nos artigos científicos. **Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 7-9, mar. 2005. FapUNIFESP. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-76382005000100004>. Acesso em: 26 abr. 2021.

CARVALHO, J. F. Combustíveis fósseis e insustentabilidade. **Energia Ambiente e Sociedade**, São Paulo, p. 30-33, 2008. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v60n3/a11v60n3.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2021.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Hidrogênio energético no Brasil**: subsí-



dios para políticas de competitividade. 2010-2025, Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários, Brasília, 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_2_2102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5. Acesso em: 08 jun. 2021.

DAMASCENA, P. J. V.; GOÉS V. Z. **Viabilidade técnica da utilização de Hidrogênio produzido "in situ" em motores de combustão interna**. 2013. 69 f. TCC (Graduação)- Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2012-2_vtor_zonta_de_goe-se_pedro_jose_vieira_damascena.pdf. Acesso em: 09 jun. 2021.

ESTÊVÃO, T. E. R. **O Hidrogênio como combustível**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.

FATOUH, M.; SHEDID, M. H., ELSHOKARY, S. Effect of operating and geometric parameters on hydrogen production from an alkali electrolyzer. **International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE)**, Cairo, v. 4, n. 4, p. 395-399, jan. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Shedid/publication/263890354_Effect_of_operating_and_geometric_parameters_on_hydrogen_production_from_an_alkali_electrolyzer/links/0f31753c46ea676afb000000/Effect-of-operating-and-geometric-parameters-on-hydrogen-production-from-an-alkali-electrolyzer.pdf. Acesso em: 08 jun. 2021.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Porto Alegre) (org.). **Métodos de pesquisa**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil- UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica. Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.

GOMES, A. C. O.; UIEDA, B.; TAMASHIRO, A. A.; RUVOLLO FILHO, A. C.; PESSAN, L. A.; PARANHOS, C. M. Membranas híbridas com potencial uso em células a combustível - parte 1: nanocompósitos de poli(eterimida) sulfonada. **Polímeros**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 464-473, ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1131>. Acesso em: 08 jun. 2021.

JUNIOR, N. G. **Célula a combustível**: uma análise da viabilidade econômica e energética dos principais modelos no mercado. 2017. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: https://monografias.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/5298/1/Celulaacombustivel_Monografia.pdf. Acesso em: 07 jun. 2021.

KARGI, F. Comparison of different electrodes in hydrogen gas production from electrohydrolysis of wastewater organics using photovoltaic cells (PVC). **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 3450-3456, mar. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.010>. Acesso em: 07 jun. 2021.

NAGEM, N. F. **Geopolímero a partir de resíduos oriundos da indústria de alumínio para reutilização e coprocessamento**. 2013. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9EAGF4>. Acesso em: 19 mar. 2021.

NASCIMENTO, A. C.; MOHALLEM, N. D. S. Materiais usados na constituição dos principais componentes de células a combustível de óxido sólido. **Cerâmica**, [S.L.], v. 55, n. 333, p. 46-52, mar. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100006>. Acesso em: 09 jun. 2021.

PALMERIO, A. F. **Introdução à Tecnologia de Foguetes**. São José dos Campos, SindCT, 2017. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/CFD/bibliografia/Palmerio-IAE-livro_2017.pdf. Acesso em: 07 jun. 2021.

PEREIRA, J. C. **O uso racional dos recursos naturais será a prioridade número um para a humanidade neste século**. Grupo Geradores, 2021. Disponível em: https://www.joseclaudio.eng.br/geradores/celula_combustivel_OQ#. Acesso em: 08 jun. 2021.

PEREIRA, L. A. **Viabilidade na produção de hidrogênio através da reação entre o alumínio e a água em meio alcalino**. 2017. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20410/1/2017_LarissaAntoniaPereira_tcc.pdf. Acesso em: 26 abr. 2021.



PORCIÚNCULA, C. B. **Simulação e operação de célula de combustível com geração *in situ* de hidrogênio através da corrosão alcalina do alumínio.** 2013. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

QUADROS, G. P.; MELO, M. C.; CAVALCANTI, G. G.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. **Produção de hidrogênio via corrosão alcalina de latas de Alumínio recicláveis.** Blucher Chemical Engineering Proceedings. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobec-ic/05-rc-098.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2021.

ROCHA, G. A. **Síntese e caracterização de hidróxidos de alumínio com duas dimensões nanométricas (Morfologia fibrilar) ou com uma dimensão nanométrica (Morfologia de placas/ lâminas).** 2013. 211 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R.G.; CINCOTTO, M. A. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, [S.L.], v. 62, n. 363, p. 215-223, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623632039>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SANTOS, C. S. B. **Aspectos de sustentabilidade em um processo de produção de hidrogênio com a reutilização do alumínio.** 2018. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia e Sociedade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SLAMA, R. B. Hydrogen Production by Water Electrolysis Effects of the Electrodes Materials Nature on the Solar Water Electrolysis Performances. **Natural Resources**, [S.L.], v. 04, n. 01, p. 1-7, 2013. Scientific Research Publishing. Disponível em: 10.4236/nr.2013.41001. Acesso em: 08 jun. 2021.



CAPÍTULO 9

MODELO PARA APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE PARA OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO PLANEJADA NA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL

MODEL FOR RELIABILITY-CENTRIC MAINTENANCE APPLICATION
FOR PLANNED MAINTENANCE OPTIMIZATION IN TOTAL PRODUCTIVE
MAINTENANCE

Daniel Ayrton Cirino Pires¹

José Ribamar Santos Moraes Filho²

1 Graduando em Engenharia Mecânica – daniel80301@ceuma.com.br

2 Orientador – Me. José Ribamar Santos Moraes Filho

Resumo

Atualmente, existem inúmeras técnicas e ferramentas com o intuito de diminuir, suprimir e tratar as falhas de um sistema, dentro dessas está a Manutenção Centrada na Confiabilidade ou *Reliability Centered Maintenance* (MCC) e a Manutenção Produtiva Total ou *Total Productive Maintenance* (TPM), onde a primeira é de origem norte-americana e a segunda tem origem japonesa. A TPM como é mais conhecida, é uma metodologia que busca dentro da empresa, promover a maximização do rendimento operacional das máquinas e equipamentos e ainda um sistema onde todos os níveis hierárquicos atuem de forma conjunta. A MCC é uma metodologia que usando uma abordagem sistemática detalhada, estuda determinado equipamento, definindo o plano de manutenção mais adequado em busca de prevenir ou minimizar uma possível falha. Através de uma revisão bibliográfica, esse trabalho consiste em elaborar uma metodologia para auxiliar, considerando um ambiente onde ainda não se tem implantada a TPM, na implantação de uma manutenção planejada mais eficiente com o auxílio da MCC.

Palavras-chaves: Manutenção. Confiabilidade. MCC. TPM. Metodologia.

Abstract

Currently, there are numerous techniques and tools to reduce, suppress and treat the failures of a system, within these are Reliability Centered Maintenance (MCC) and Total Productive Maintenance Productive Maintenance (TPM), where the first is of North American origin and the second is of Japanese origin. The TPM as it is better known, is a methodology that seeks within the company, promote the maximization of the operational performance of machines and equipment and a system where all hierarchical levels act together. MCC is a methodology that, using a detailed systematic approach, studies a particular equipment, defining the most appropriate maintenance plan to prevent or minimize a possible failure. Through a literature review, this work consists of developing a methodology to assist, considering an environment where the TPM has not yet been implemented, in the implementation of a more efficient planned maintenance with the help of MCC.

Key-words: Maintenance. Reliability. MCC. TPM. Methodology



1. INTRODUÇÃO

No ambiente competitivo atual, os mercados estão se tornando mais globalizados, interativos e voltados para o consumidor. Os consumidores munidos de ferramentas como a *internet*, onde é possível ter acesso rápido e fácil a uma vasta gama de produtos e serviços, exigem cada vez mais diversidade, melhores serviços e qualidade. Com o desenvolvimento tecnológico avançando rapidamente, resultando em inovação de produtos e melhoria dos processos produtivos. O ambiente competitivo resultante exige, além de um grau crescente de adaptação, custos baixos e alta qualidade do produto. Partindo desse pressuposto as empresas buscaram novas formas de aumentar a produtividade e diminuir os gastos com paradas para manutenção, tornando-a mais objetiva e eficiente, podendo identificar uma possível falha antes que a está aconteça.

Se antes a manutenção era percebida como uma perda financeira, hoje é entendida como um ativo da empresa, visando a redução de custos de produção ou serviços, bem como a melhoria de processos e também de qualidade, tendo assim equipamentos com menos avarias, maior melhoria no produto e da produtividade, tornando os clientes mais satisfeitos, empresas mais competitivas, trabalhadores motivados, aumento dos lucros da empresa através da eventual aquisição de novas máquinas e do aumento do número de funcionários. Existe um papel estratégico para a manutenção, que deve estar focado nos resultados do negócio da organização (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Atualmente quando se fala em gestão de manutenção existem diversas ferramentas e técnicas para implementação de programas de manutenção, dentre essas tem-se a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).

A TPM fora desenvolvida na década 1970, no Japão, fora utilizada pela primeira vez pela *Nippon Denso KK*, uma subsidiária da Toyota, como uma evolução da manutenção corretiva para a preventiva. Buscando novos conceitos de manutenção, introduzindo formas de diminuir ou até mesmo evitar que o produto tivesse algum defeito oriundo de um possível mau funcionamento do equipamento utilizado. A TPM instiga pela eficácia da instituição através da maior qualificação dos profissionais e de melhores equipamentos (MOUBRAY, 2000).

A MCC teve início na década de 1950, mas somente na década de 1960 que de fato seus conceitos foram desenvolvidos pela indústria aeroespacial dos Estados Unidos, como forma de conter a baixa qualidade da manutenção preventiva à época que era baseada em tempo de funcionamento dos equipamentos que ocasionalmente geravam mais custos de manutenção. Esse é um modelo que visa ordenar as condições de manutenção de um determinado equipamento, quanto a sua operação. Nesse sentido, a MCC analisa de forma detalhada um equipamento ou um sistema, procurando uma possível falha e definindo a manutenção adequada para impedir a falha ou minimizar os efeitos dela, reduzindo assim possíveis perdas de equipamentos (KARDEC; NASCIF, 2013).

Buscando aperfeiçoar o pilar manutenção planejada da TPM, esse trabalho fará um levantamento teórico sobre as técnicas de TPM e MCC, e elaborara uma metodologia para aplicação da MCC no pilar manutenção da TPM.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manutenção Produtiva Total (TPM)

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, o governo japonês criou vários planos e metas para serem atingidos pelas empresas japonesas, dentre elas estava a Toyota, para ajudar na recuperação da economia do Japão. Assim essas empresas buscaram novos conceitos e sistemas de administração visando a melhora de suas infraestruturas e suas finanças, para criar empregos e aumentando a capacidade produtiva. Dentre esses novos sistemas um estava voltado para a manutenção, que tinha como base as manutenções preventiva e preditiva, buscando também capacitar os próprios operadores das máquinas com o intuito de maximizar o rendimento da máquina e do operador (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Em 1971 a *Nippon Denso KK*, uma empresa pertencente a Toyota, junto com o *Japan Institute of Plant Maintenance* (JIPM), desenvolveram o sistema de manutenção produtiva total (TPM). Esse sistema foi baseado na Manutenção do Sistema de Produção (MSP), adicionada à Prevenção de Manutenção (PM), sistemas esses de origem norte-americana. Unidos com essas ideias a *Nippon Denso KK* e o JIPM, as unificaram e refinaram dando origem à TPM (NAKAJIMA, 1989).

A manutenção produtiva total foi direcionada para reduzir as despesas com manutenção do equipamento durante a sua vida útil, com a combinação de projetos de manutenção preventiva e melhorias sustentáveis feitas durante a manutenção do equipamento.

2.1.1 Conceito de TPM

A TPM sustenta-se em alguns componentes gerais. Dentre esses destacam-se: (i) uma mudança cultural, com o objetivo de maximizar o rendimento de um modo geral dos equipamentos; (ii) implementar uma sistemática com o intuito de prevenir perdas relacionadas aos equipamentos e ao ambiente de trabalho (zero acidentes, zero defeito de qualidade, zero perda); (iii) efetivação envolvendo todos os setores da empresa; (iv) abranger todos os colaboradores em atividades de aperfeiçoamento contínuo, partindo da gerência da empresa até os operadores mais simples; (v) instrução e treinamento, com objetivo de aperfeiçoar tanto a consciência quanto a competência dos colaboradores (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Na sigla TPM, cada letra tem seu próprio significado, sendo eles (NAKAJIMA, 1989):

- “T” significa “*Total*”, referindo-se a uma eficiência global, de todo o ciclo de vida útil total do sistema de produtivo até na participação de todos os departamentos.
- “P” significa “*Productive*”, refere-se a uma busca pela eficiência máxima do sistema de produção, alcançando o zero defeito, zero acidente e zero quebra/falha, isto é, suprimir qualquer perda até atingir o nível zero;



- “M” significa “*Maintenance*”, ou seja, uma ampla manutenção, onde o ciclo de vida total do sistema de produção é o objetivo.

2.1.2 Objetivos da TPM

TPM objetiva maximizar o tempo de funcionamento dos equipamentos, buscando uma interação entre os cuidados do operador com o equipamento e a manutenção planejada elaborada pela empresa (NETTO, 2008).

Para Kardec e Nascif (2009), a TPM tem como objetivo aumentar a eficácia da empresa, buscando melhor qualificação dos colaboradores e com melhorias nos equipamentos. Também procura habilitar e desenvolver os funcionários e as empresas para as futuras tecnologias. Habilitando e desenvolvendo os funcionários, será possível promover modificações nos equipamentos. Essas modificações podem trazer melhorias no resultado final global da empresa.

2.1.3 As Grandes Perdas

Qualquer dispositivo ou equipamento está propício a perdas. Procurando melhorar o rendimento deles, é preciso encontrar, avaliar e eliminar essas perdas, sendo esse um dos conceitos principais da TPM, que classifica as grandes perdas em seis.

Em 1989, Nakajima classificou em seis as grandes perdas de rendimento operacional dos equipamentos, como mostra o quadro 1:

Quadro 1 – Perdas de rendimento

Perdas por quebra	<ul style="list-style-type: none"> • São responsáveis pela maior parte da redução no desempenho operacional dos equipamentos. Sendo dividida em dois tipos (KARDEC; NASCIF, 2013): • Perda total da capacidade: motivada por uma falha do equipamento (quebra do equipamento) • Perda parcial da capacidade: ocasionada pela redução do funcionamento do equipamento, quando o equipamento apresenta uma degradação gradativa.
Perdas por paradas para mudança de linha	<ul style="list-style-type: none"> • Ocorrem quando há uma mudança de linha, onde é necessário interromper o funcionamento da máquina para prepará-la para um novo produto. Nesse período de parada, está incluído tempo para serem feitas alterações, ajustes e regulagens necessárias na máquina (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).
Perdas por operações em vazio e pequenas paradas	<ul style="list-style-type: none"> • Decorrentes da necessidade de parada do equipamento por um curto intervalo de tempo devido algum problema na máquina ou na operação, que necessite de uma reiniciação do equipamento ou por um baixo fluxo no processo (KARDEC; NASCIF, 2013).
Perdas por queda de velocidade de produção	<ul style="list-style-type: none"> • Ocorrem quando o equipamento sofre uma queda na velocidade normal e trabalho, decorrente de uma possível falha mecânica, problemas relacionados à qualidade outras condições que forcem o equipamento a reduzir a sua velocidade de trabalho (NAKAJIMA, 1989).
Perdas por produtos defeituosos	<ul style="list-style-type: none"> • Compõe-se pelas perdas resultantes de retrabalhos ou ainda exclusão de produtos com defeitos produzidos durante o processo de fabricação (COUSSEAU, 2003).
Perdas por defeitos no início da operação	<ul style="list-style-type: none"> • Também conhecida por perda para entrada em regime de produção. É o tempo gasto que a produção leva para dá início ao processo normal, podendo ser acarretada por instabilidade da operação, ferramentas inadequadas, falta de manutenção, imperícia do operador ou escassez de matéria prima (COUSSEAU, 2003).

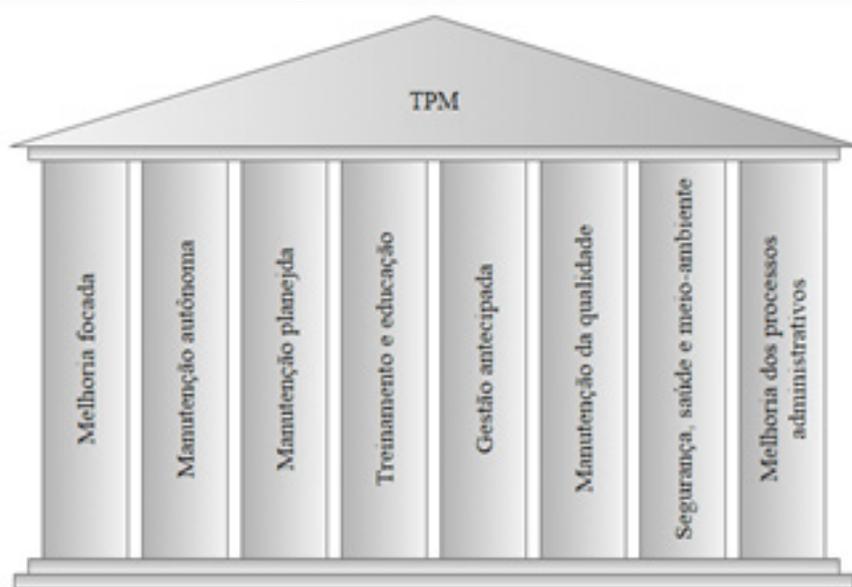
Fonte: Adaptado de Cousseau (2003).

2.1.4 Pilares da TPM

NAKAJIMA (1989) estabeleceu cinco pontos base para a TPM, chamados de pilares da TPM: (i) melhoria focada; (ii) manutenção autônoma; (iii) manutenção planejada; (iv) educação e treinamento; (v) controle inicial. O *Japan Institute of Plan Maintenance* acrescentou mais três pilares aos cinco que foram definidos por Nakajima: (vi) manutenção da qualidade; (vii) áreas administrativas; (viii) segurança, higiene e meio ambiente, conforme ilustra a figura 1.



Figura 1 – Pilares da TPM



Fonte: Adaptado de Kardec; Nascif (2013)

2.1.4.1 Melhoria Focada

Segundo Kardec e Nascif (2013), esse pilar visa o desenvolvimento do negócio da empresa, buscando uma forma de reduzir os problemas nas máquinas através de melhorias específicas, conseqüentemente, melhorando o rendimento.

Essas melhorias devem ser, de início, aplicadas em um só equipamento, de forma experimental, sendo que as áreas responsáveis por planejamento, manutenção e operação devem trabalhar em conjunto, buscando as melhorias possíveis para o equipamento e as inserindo no mesmo, melhorando seu funcionamento e sua produtividade, e buscando atingir a Quebra Zero/ Falha Zero (COUSSEAU, 2003).

2.1.4.2 Manutenção Autônoma

Busca o treinamento dos operadores para que sejam capazes de identificar irregularidades no funcionamento do equipamento e poderem corrigi-las. A manutenção autônoma também busca manter o equipamento sempre em excelente estado de funcionamento, para isso o operador deve ser capaz de fazer operações autônomas de manutenção, *checklists* diários de funcionamento, além de manter as condições básicas para que a máquina sempre esteja em excelentes condições de funcionamento, como: lubrificação e limpeza (ABDON; NOGUEIRA; ARAÚJO, 2020).

Para Nakajima (1989), uma manutenção autônoma de qualidade, exige que sete passos fundamentais consolidados e devem ser primorosamente executados, sendo esses passos: (i) limpeza inicial; (ii) eliminação de causadores de problemas e locais de difícil acesso; (iii) elaboração de padrões de limpeza e inspeção; (iv) inspeção geral; (vi) inspeção autônoma; e (vii) Consolidação da manutenção autônoma.

2.1.4.3 Manutenção Planejada

Para implementação da manutenção planejada, deve-se incluir três métodos de manutenção: preditiva, preventiva e corretiva. Com a utilização dos recursos disponíveis e os conhecimentos adquiridos dos outros métodos de manutenção, torna-se possível o desenvolvimento de um sistema de manutenção que viabiliza alcançar a falha zero (GISSONI, 2016).

Nakajima (1989), fala que para se desenvolver a estrutura da manutenção planejada alguns itens devem ser considerados: (i) missão da manutenção no contexto organizacional; (ii) tipos de manutenção; (iii) forma básicas de organização da manutenção; (iv) estrutura funcional adotada; (v) gestão das peças de reposição; (vi) gestão dos custos de manutenção; (viii) gestão da lubrificação dos equipamentos; (ix) apoio de *software* para gestão da manutenção.

2.1.4.4 Educação e Treinamento

Busca capacitar e desenvolver todos os funcionários que estão ligados a TPM, com treinamentos voltados para independência, versatilidade e senso de comando. Procurando atingir o melhor desempenho possível dos funcionários e dos equipamentos (GISSONI, 2016).

2.1.4.5 Controle Inicial

Refere-se a estrutura administrativa dos equipamentos desde seu projeto até o seu funcionamento. Busca melhorar a performance ainda na fase de projeto, evitando a menor quantidade e perdas possíveis até o funcionamento, com levantamentos de dados de outros equipamentos (COUSSEAU, 2003).

2.1.4.6 Manutenção da Qualidade

Neste pilar, são desenvolvidos métodos necessários para garantir que a produção continue operando com total capacidade sem perda de qualidade dos produtos. Estabelecendo condições que mantenham os produtos sem defeitos (KARDEC; NASCIF, 2013).

2.1.4.7 Áreas Administrativas

Sendo um pilar muito importante, busca estabelecer conceitos da TPM na área administrativa, visando buscar o máximo de eficiência possível dos colaboradores envolvidos



nesse setor. Havendo perdas de produtividade nessa área, irá refletir nos demais setores, causando um efeito cascata, causando perdas de produtividades nos outros setores (KARDEC; NASCIF, 2013).

2.1.4.8 Segurança, Higiene e Meio Ambiente

Busca reduzir o índice de acidentes de trabalho para zero, verificando as condições de trabalho dos colaboradores, e fazendo um gerenciamento dos equipamentos (KARDEC; NASCIF, 2013).

2.2 MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE (MCC)

Após a segunda guerra mundial, na década de 1950, as indústrias buscavam novas formas para melhorar a qualidade de seus equipamentos e produtos com máquinas cada vez mais mecanizadas, que exigiam maiores cuidados e manutenção. Nesse período foram se desenvolvendo ideias e métodos para prevenir falhas nos equipamentos (MOUBRAY, 2000).

Somente na década 1960 que foram desenvolvidos os primeiros conceitos de manutenção centra na confiabilidade, com pesquisas desenvolvidas pelo setor aéreo norte-americano, com o objetivo de normalizar e otimizar os procedimentos de manutenção o setor. Um documento conhecido com MSG-3 foi a base para a MCC (MOUBRAY, 2000).

2.2.1 Conceitos e Objetivos da MCC

Fogliato e Ribeiro dizem que a MCC é uma metodologia que utiliza várias técnicas em conjunto com uma abordagem sistemática para preservar os equipamentos e maquinários da empresa sempre em excelentes condições.

Para Kardec e Nascif, MCC é uma ferramenta utilizada para avaliar um equipamento ou um sistema de forma detalhada. Onde analisa uma possível falha e elabora o melhor plano de manutenção para prevenir a ocorrência dessa falha ou minimizar as perdas ocasionadas por ela.

2.2.2 As Setes Questões Básicas da MCC

Através de pesquisas bibliográficas, é possível observar que a várias versões para implantação da MCC. Elas se diferenciam pelo número de etapas, a ordem em que as etapas são implantadas ou pela experiência de quem está implantando a MCC, mas todas

possuem abordagens e objetivos semelhantes.

A MCC busca soluções para setes questões básicas sobre o sistema ou o processo que está sendo analisado (MOUBRAY, 2000):

- Quais as funções e padrões de desempenhos dos sistemas em seu atual estado?
- Quais falhas podem acontecer?
- O que causa a falha funcional?
- Quais os impactos causados pela falha?
- Qual a importância da falha?
- O que fazer para evitar a falha?
- O que deve ser feito, caso não seja encontrado um modo de prevenir a falha?

2.2.2.1 Funções e Padrões de Desempenho

Todo sistema ou equipamento é designado para determinada função, esses, devem ter um padrão de desempenho igual ao projetado. Sabendo desses aspectos, deve-se entender que cada equipamento possui funções primárias e secundárias. Onde as primárias são as operações principais que o equipamento deve realizar, como: velocidade de trabalho, capacidade, quantidade de trabalho entre outras. As funções secundárias se referem ao equipamento proporcionar segurança, controle, conforto, integridade estrutural e outras. A MCC precisa que todas essas funções sejam estabelecidas e definidas, para ter uma direção programada, vale ressaltar que os gerentes de produção e operadores devem estar diretamente ligados a programação da MCC (KARDEC; NASCIF, 2011).

2.2.2.2 Quais Falhas Podem Acontecer

Uma das funções da MCC é identificar eventos que podem vir a causar alguma falha, esses eventos são conhecidos como modos de falha.

Nesse ponto uma das ferramentas mais usadas é a Análise de Modos e Efeitos de Falha ou *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) que consiste em encontrar, de forma sistemática, possíveis falhas no sistema, equipamento ou processo, e determinar quais os efeitos dessa falha e o que a causou (SOUZA; MARÇAL, 2009).

Os modos de falhas, incluem as falhas que já ocorreram no equipamento ou em um equipamento semelhante que exerce a mesma atividade, as falhas que já estão sendo pre-



venidas, além das falhas que ainda não ocorreram, mas com potencial para ocorrerem. Em sua grande parte, os modos de falhas são ocasionados por desgaste ou deterioração, mas existem outros causadores, como erro humano e falhas no projeto (MOUBRAY, 2000).

2.2.2.3 Falhas Funcionais

São as falhas que impossibilitam os equipamentos de realizarem as funções para os quais foram designados, ou com padrão de funcionamento abaixo do aceitável. O que causa essas falhas, devem ser identificados nos mínimos detalhes para garantir que as intervenções a serem adotadas, atuem na origem do problema (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

2.2.2.4 Efeitos da Falha

Conhecer as consequências de uma falha, é tão importante quanto identificar as suas causas. Sendo assim, a MCC procura listar os efeitos da falha, descrevendo o que pode acontecer caso essa falha venha a acontecer, onde essas descrições são (MOUBRAY, 2000):

- Qual a evidência de que a falha aconteceu;
- Como a falha ameaça à segurança e o meio ambiente;
- Como ela afeta a produção ou a operação;
- Qual dano físico pode ser ocasionado pela falha;
- O que pode ser feito para reparar a falha.

2.2.2.5 Importância da Falha

Em uma indústria pode haver vários modos de falhas, onde cada um afeta de um modo diferente a produção e cada um com grau de efeito diferente. Com a MCC é possível fazer um estudo dessas falhas e elaborar ações preventivas e definir as atividades prioritárias para manutenção (MOUBRAY, 2000).



2.2.2.6 Prevenir e Impedir Falhas

Na gestão de falhas, estão englobadas as tarefas proativas e reativas, sendo elas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011):

- As tarefas proativas são realizadas antes da ocorrência das falhas, com intuito de impedir que elas ocorram. Nessas ações estão inclusas as manutenções preditiva e preventiva.
- As tarefas reativas dizem respeito a como agir quando os componentes apresentam falhas. Elas são determinadas quando não há formas de exercer alguma atividade proativa.

2.2.2.7. Tarefas *Default*

Quando não há como realizar uma atividade de prevenção de falha, considera-se o grau da falha. Quando a falha é considerada grave, pode-se executar atividades de busca de falha ou até redesenhar o subsistema, promovendo alterações nos componentes e incorporando alarmes de avisos para alerta de falhas, mas vale ressaltar que redesenho não é uma atividade comum da MCC, e deve ser feito com todas as precauções possíveis (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

2.2.3 Etapas Para Implantação da MCC

Segundo Moubray (2000), para poder dar-se início as análises e especificações da manutenção a ser executada no sistema ou equipamento, deve-se saber quais são esses equipamentos e sistemas e quais desses estão disponíveis para serem submetidos a MCC. Após esse levantamento de dados, algumas etapas são necessárias para implementação da MCC.

2.2.3.1 Definição das Equipes de MCC

Assim como muitos outros processos de organização, existe a necessidade de escolha de um líder, nesse caso é chamado de facilitador, esse deve definir as equipes de para planejamento e implementação das atividades. O facilitador é responsável por coordenar as equipes e manter um canal de comunicação com a gerência da empresa, este, deve ter total domínio das técnicas existentes na MCC e compartilhar seu conhecimento com as equipes. O número de integrantes das equipes depende do porte e da complexidade da planta industrial, devem ser multidisciplinares, abrangendo colaboradores da operação, manutenção, engenharia, inspeção e segurança, em alguns casos é necessário a colaboração de agentes externos com os fabricantes dos equipamentos e especialistas que a empresa não tem em seu quadro de funcionários TELES, 2019).



2.2.3.2 Seleção do Sistema

Aqui serão definidos os sistemas a serem analisados na MCC, a seleção do sistema baseia-se nos seguintes critérios: sistemas com altos índices de manutenção preventiva ou altos custos de manutenção preventiva, sistemas com altos índices de manutenção corretiva, sistemas que causam muitas paradas paradas na produção e sistemas com alta probabilidade de causar danos às pessoas e ao ambiente. Como nem todos os sistemas foram parte do processo da MCC, é necessário que eles sejam analisados minuciosamente para definir quais foram parte da MCC (TELES, 2019).

2.2.3.3 Definição das Funções e Falhas Funcionais

Nessa etapa será feito o levantamento das interfaces de entrada e saída do sistema, identificar e descrever as funções do sistema, descrever os padrões de desempenho e definir como o sistema pode vir a falhar. Para auxiliar na execução dessa etapa, é adequado que sejam elaborados diagramas de blocos do sistema, com a utilização desses diagramas é possível dividir os sistemas em subsistemas, onde serão descritas as interfaces de entrada e saída de cada subsistema. Após definição de todos os parâmetros dessa etapa, elaborase a planilha de funções e falhas funcionais (SMITH, 1993).

2.2.3.4 Seleção dos Itens Físicos Críticos

Os itens críticos são aqueles com alta relevância para o sistema de produção e correm alto risco de falha. Essa seleção é importante para indicar os itens que trarão maior retorno financeiro. Esses devem ser escolhidos de acordo com sua importância para a produção e seus impactos nos custos de manutenção. É importante que seja feita uma Matriz de Criticidade (SMITH, 1993).

2.2.3.5 Coleta e Análise de Informação

Na MCC a coleta de informações é de extrema importância para o seu sucesso. Essas informações podem ser divididas em três grupos: informações de projeto, operacionais e de confiabilidade. Dentre essas informações devem estar contidas o histórico de falhas do equipamento, a frequência com que as falhas acontecem e suas causas (MOUBRAY, 2000).

2.2.3.6. Definição dos Modos e Efeitos de Falha

Procura-se identificar os modos de falhas que potencialmente serão causadores de falhas funcionais e fazer o levantamento dos efeitos dessas falhas, relacionando-as com



os modos de falhas. Quando se analisa os modos de falhas deve-se ter pelo menos três fontes de informações: histórico de falhas do equipamento, informações dos operadores e dados retirados do FMEA (MOUBRAY, 2000).

2.2.4 Definição de Estratégia e Periodicidade das Atividades de Manutenção

Para seleção da estratégia de manutenção das atividades de manutenção, deve-se levar em conta três itens: (i) como as atividades de manutenção reduzirão as chances de uma possível falha ocorrer; (ii) como as atividades de manutenção reduziram a severidade de uma possível falha; e (iii) como as atividades de manutenção aumentaram as chances de detectar uma possível falha ainda em seu início de ocorrência (TELES, 2019).

Para essa etapa as atividades de manutenção são classificadas em dois tipos:

- Recorrentes – Realizadas de maneiras sistemáticas, com periodicidade calculada e devem fazer parte do plano de manutenção;
- Reprojeto – Alterações feitas ao longo do processo, sendo essas, definitivas e causaram redução no número de prioridade de risco ou *risk priority number* (RPN).

Quanto a definição da frequência das atividades de manutenção, para a MCC quanto menos se intervém de forma ativa em um equipamento ou sistema, maiores são as chances destes sofrerem uma falha. Como o cálculo de confiabilidade dos ativos tem embasamento em procedimentos probabilísticos, onde as variáveis devem estar sobre controle. Quando se tem intervenções humanas, diversas novas variáveis são incluídas no sistema, consequentemente novos modos de falhas serão adicionados ao sistema, comprometendo a confiabilidade do mesmo. Com o desenvolvimento das técnicas de manutenção preditiva, as manutenções preventivas são realizadas só em casos de extrema necessidade, reduzindo o máximo possível o número de intervenções nos ativos (TELES, 2019). Para minimizar os efeitos das intervenções, deve-se elaborar um plano de manutenção preventiva e a frequência para realização dessas manutenções.

3. METODOLOGIA

Segundo Cervo e Bervia (2002), a pesquisa científica pode ser classificada de acordo com a sua natureza, a abordagem utilizada, pela especificidade dos objetivos e os procedimentos técnicos adotados.

Segundo Minayo (2002), a pesquisa qualitativa busca fazer um levantamento de informações e dados com um elevado grau de qualidade, tem como meta compreender a ocorrência e o comportamento do fenômeno analisado.

O presente trabalho quanto a sua natureza, é qualitativo centrado no levantamento



de informações sobre o tema proposto. Quanto aos objetivos, são de caráter exploratório e abordados teoricamente. E quanto aos procedimentos técnicos utilizados para levantamentos de informações, este trabalho baseia-se em um aspecto teórico-analítico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Proposta para Otimização da Manutenção Planejada com Auxílio da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)

No Tópico 2, fora mostrado que a Manutenção Planejada da TPM, procura organizar o sistema de manutenção em vários pontos, sendo eles: (i) utilizar *backup* (equipamentos reservas) e estoque de sobressalentes; (ii) sistemas de manutenção com auxílio de *softwares* computacionais; (iii) sistemas de manutenção preventiva e preditiva; (iv) sistemas de ordem deserviços; (v) planejamento e programação da manutenção; e (vi) histórico de utilização e falha do ativo.

Quanto a MCC, é mostrado que essa utiliza um sistema metodológico que busca instituir manutenções preventiva e preditiva, com o objetivo de alcançar a máxima eficiência do ativo. Para isso, a MCC estabelece alguns objetivos: (i) preservação das funcionalidades dos sistemas; (ii) identificação dos modos de falhas; (iii) priorização das funções; (iv) seleção das tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas; (v) aprimoração dos níveis de confiabilidade do ativo.

Com base nos conceitos apresentados acima e os que estão presentes no referencial teórico, será apresentado a seguir um método que busca viabilizar o aperfeiçoamento do pilar manutenção planejada da TPM com auxílio da MCC.

Para que os objetivos estabelecidos sejam alcançados, procura-se definir os sistemas e subsistemas e dentro desses, busca-se definir suas funções, falhas funcionais a quais estão sujeitos, os modos de falhas, as causas e os efeitos dessas falhas além das estratégias de manutenção a serem adotadas.

Para implementar a MCC em uma planta industrial, deve-se as seguintes fases: (i) seleção da equipe para implementação da MCC; (ii) seleção de sistemas funcionais; (iii) análise das funções e falhas funcionais; (iv) seleção de itens críticos do sistema; (v) análise dos modos e efeitos de falha; (vi) seleção das atividades de manutenção preventiva; e (vii) determinação do plano de manutenção. Nos itens a seguir, serão expostos procedimentos e métodos para serem utilizados em cada fase, de acordo com a metodologia proposta.

4.1.1 Seleção da Equipe de Implantação

Para se dá início a implementação da manutenção centrada na confiabilidade, começa-se pela seleção da equipe que será responsável por desenvolver e implantar as metodologias da MCC. A equipe deve ser constituída por: (i) um facilitador, que é um instrutor



para o processo de implementação, ele é responsável por coordenar a equipe além de manter um canal de comunicação com a gerência da empresa. Esse, necessita ter uma vasta experiência e conhecimento sobre MCC e sobre a operação do sistema de produção; (ii) engenheiro e supervisor de manutenção; (iii) supervisor de produção e operação; (iv) técnicos de manutenção; (v) operadores; e (vi) especialistas externos (necessário caso a empresa necessite de um especialista de determinada área e ela não possua um em seu quadro de colaboradores).

Toda a equipe deve trabalhar em conjunto e de maneira harmônica, para conseguir o melhor rendimento possível na MCC.

4.1.2 Seleção dos Sistemas Funcionais

Nessa fase, procura-se analisar e entender o sistema de produção, para assim definir os sistemas funcionais que possuem maior influência no processo produtivo. A definição desses sistemas é tão importante para o processo de implementação da MCC que se a escolha desses forem falhas ou equivocadas, todas as demais fases serão comprometidas, ocasionando em um insucesso na implantação da manutenção centrada na confiabilidade.

No quadro 2, será mostrado um modelo para seleção de sistemas funcionais.

Quadro 2 – Modelo de documento para seleção de sistema e coleta de

Seleção de Sistema e Coleta de		
Facilitador:		Data:
Auditor:		Página:
Equipe:		
1) Seleção do Sistema		
1.1) Método utilizado para seleção do		
1.2) Critério utilizado para seleção do		
1.3) Sistema		
1.4)		
2) Coleta de Informações		
2.1) Documentação do Sistema:		
2.2) Contexto Operacional do		
2.3) Descrição das Fronteiras do		

Fonte: Teles (2019)



4.1.3 Análise das Funções e Falhas Funcionais

Para esta fase, deverão ser exploradas as funções e as falhas funcionais dos subsistemas que foram definidos na primeira fase. As especificações de cada função devem ser descritas de forma precisa, com utilização de um verbo de ação. Também é recomendado fazer a correlação entre às funções e seus padrões de desempenho.

Para se iniciar as análises das funções e das falhas funcionais, deve-se elaborar e preencher a Planilha de Funções e Falhas Funcionais que será demonstrada no quadro 3. Salvo lembrar que todos os sistemas funcionais que serão abordados na implementação da MCC, deverão ser abordados na planilha.

Quadro 3 – Planilha de Funções e Falhas Funcionais

MCC		PLANILHA DE FUNÇÕES E FALHAS FUNCIONAIS			
		SISTEMA:	TURBINA DE 5MW		
		SUB-SISTEMA:	SISTEMA DE EXAUSTÃO		
		DATA:	22/11/2000	EQUIPE:	
FUNÇÃO		FALHA FUNCIONAL (Perda de função)			
1	Canalizar todo o gás quente da turbina sem restrições a um ponto fixo de 10m acima do telhado	A	Incapaz de canalizar o gás		
		B	Fluxo de gás restrito		
		C	Falha para conter o gás		
		D	Falha para levar o gás a 10m acima do telhado		
2	Reduzir os níveis de ruído até a taxa de ruído da ISO 30 a 150m	A	O nível de ruído excede a taxa de ruído da ISO 30 a 150m		
3	Assegurar que a temperatura superficial da tubulação na sala da turbina não passe de 60°C	A	A temperatura superficial da tubulação passa de 60°C		

Fonte: Adaptado de MOUBRAY (2000)

4.1.4 Seleção de Itens Críticos do Sistema

O objetivo aqui será encontrar os itens físicos com maior criticidade, isto é, que possuem maior potencial crítico às falhas funcionais que foram identificadas na fase 3.

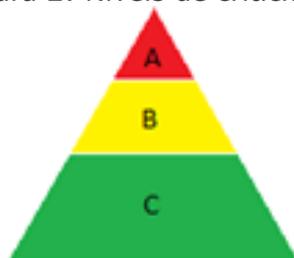
Para ajudar nessa fase, é importante que seja feita a matriz de criticidade. Para elaboração da dessa matriz deve-se levar em conta os seguintes pontos: (i) produção; (ii) custode manutenção; (iii) segurança; (iv) backup; (v) qualidade; e (vi) frequência. Cada um desses itens será graduado de 0 a 3 seguindo os seguintes critérios, como apresentado no quadro 4.

Quadro 4 – Critérios de avaliação da criticidade

Grau	Produção	Custo de manutenção	Segurança	Frequência e Backup	Qualidade
0	Em caso de falha do ativo, ocorrerá interrupção do processo de produção maior que horas, provocando lucros cessantes e custos induzidos (multas)	Caso o ativo falhe, o custo de manutenção se eleva em mais que 30% no ano.	Em caso de falha do ativo, provocando risco de morte e/ou causando danos graves ao meio ambiente.	Elevado índice de parada devido às falhas (mais de por ano). Não há possibilidade técnica e econômica de se ter e/ou instalar um back-up do equipamento.	Em caso de falha do ativo, impactará de forma irre recuperável a experiência do cliente.
1	Em caso de falha do ativo, ocorrerá interrupção no processo de produção por até horas, de maneira irre recuperável.	Caso o ativo falhe, e possua custo de manutenção corretiva maior que 20% do custo total de manutenção.	Caso o ativo falhe, causando lesões corporais permanentes.	Paradas ocasionais (entre e por ano) Não possui backup.	Caso o ativo falhe, comprometerá a qualidade do produto de forma irre recuperável.
2	Em caso de falha do ativo, ocorrerá interrupção da produção por até horas, de forma recuperável.	Caso o ativo falhe, e possua custo de manutenção corretiva entre 10% e 15% do custo total de manutenção.	Caso o ativo falhe, causando riscos controláveis a segurança e meio-ambiente.	Paradas pouco frequentes (menos de por ano) Possui back-up, mas não está instalado em paralelo.	Se o ativo falhar, ocorrerá comprometimento da qualidade do produto de forma recuperável.
3	Em caso de falha do ativo, não ocorrerá interrupção do processo de produção.	Caso o ativo falhe, e possua custo de manutenção corretiva menor que 10% do custo total de manutenção.	Caso o ativo falhe, não causando riscos à segurança e meio-ambiente.	Sem registro de paradas. Possui back-up instalado em paralelo.	Se o ativo falhar, não ocorrerá comprometimento a qualidade do produto

A matriz de criticidade divide os equipamentos em três níveis de criticidade A, B e C. Onde A é o nível mais críticos, isto é, são os equipamentos de maior importância para o processo de produção, B são os equipamentos de importância intermediária e C é o menos crítico, equipamentos de menor importância. A figura 2, ilustra os níveis de criticidade.

Figura 2: Níveis de criticidade



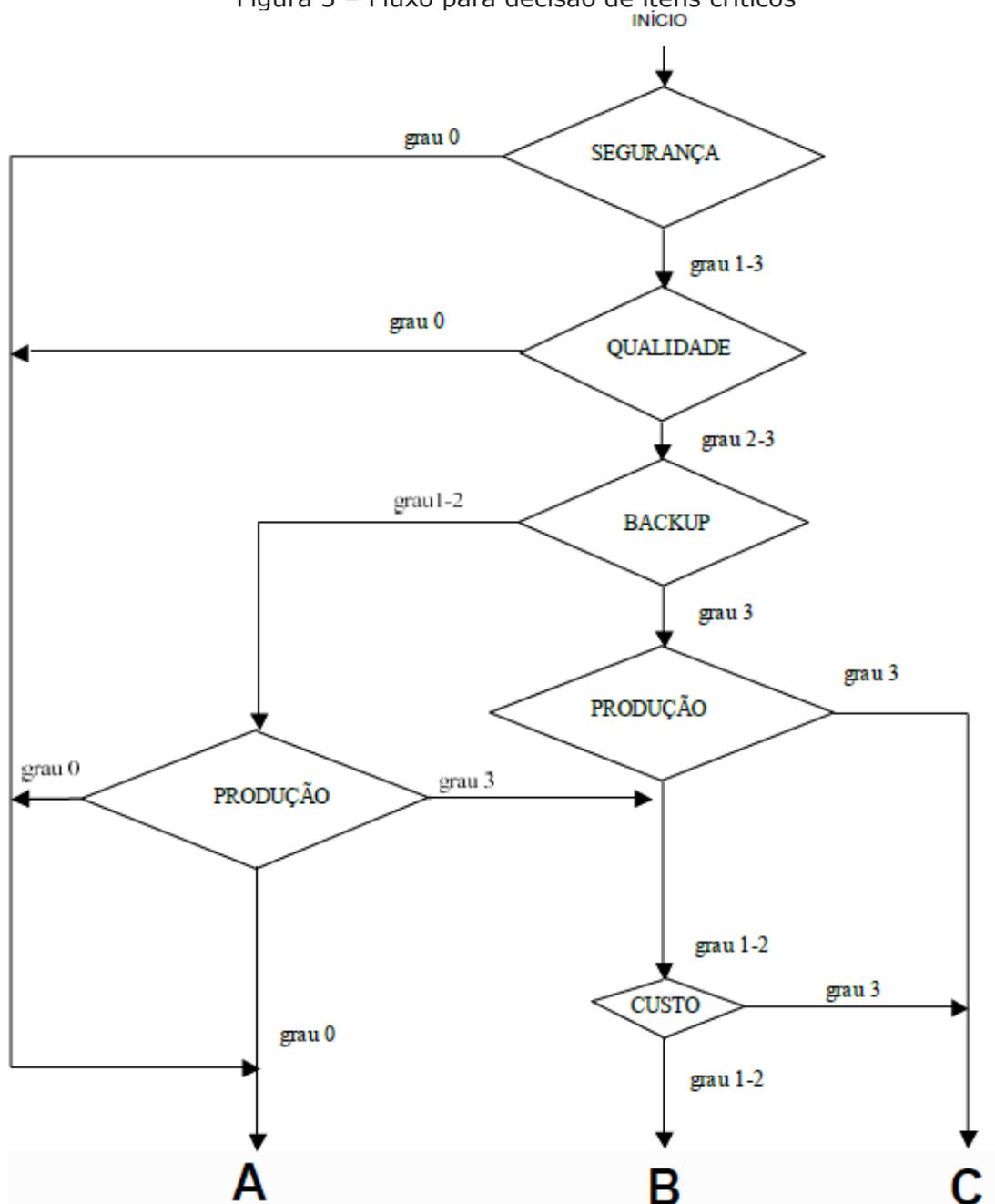
Fonte: Adaptado de Teles (2019)

Para aplicação dessa etapa, este trabalho sugere a elaboração de fluxo de decisão, com o objetivo de auxiliar na escolha dos itens críticos.

Como cada processo de produção possui suas próprias características, portanto, possui necessidades diferentes. Levando isso em conta, quando a equipe responsável pela MCC for definir quais os itens físicos críticos, esses devem definir quais as especificações para os graus 1, 2 e 3 referentes aos fatores produção e frequência. Essa definição deve ser considerada levando em conta o nível de impacto causado ao sistema de produção em relação ao processo produtivo.

Em seguida, o grupo deve estabelecer a graduação para cada falha funcional de acordo com os critérios e classificar os itens físicos A, B e C, como mostrado no fluxo de decisão na figura 3. Esses dados devem ser registrados em uma planilha, como mostrado no quadro 5.

Figura 3 – Fluxo para decisão de itens críticos



Fonte: o Autor (2021)

No fluxo de decisão exposto na figura 3, é mostrado as decisões para cada critério de acordo com o grau que fora definido na planilha do quadro 5.

Um exemplo é, caso uma falha funcional for definida como de grau 0 no critério segurança, esse item físico deve ser considerado como item de criticidade "A", sem necessidade de levar em conta os demais fatores.

Cada nível de criticidade, tem seu intervalo de notas. Os ativos para serem de criticidade "A", devem ter pontuação 0 a 55, os de criticidade B, de 56 a 161 e os de criticidade C, de 162 a 243. Para se calcular a criticidade do ativo, multiplica-se as notas dos fatores de criticidade, como mostrado na equação 1.

$$(nota\ Prod.\) \times (nota\ Cus.\ manu.\) \times (nota\ Segu.\) \times (nota\ Backup) \times (nota\ Quali.\) = Criticidade \quad (1)$$

Após os cálculos de criticidade dos ativos, poderá ser elaborada a matriz de criticidade. Como mostrado no quadro 5.

Quadro 5- Matriz de criticidade

Matriz de Criticidades							
Empresa XXXX							
Equipamento		Produção	Segurança	Custo	Qualidade	Backup	Criticidade
1	Bomba XPTO 1	1	2	1	2	2	8 = A
2	Bomba XPTO 2	3	2	2	3	2	72 = B
3	Motor Elétrico TUAH 2	2	3	3	1	1	18 = A
4	Motor Elétrico TUAH 22	3	3	2	2	1	36 = A
5	Redutor PLTO1	3	2	3	1	2	36 = A
6	Redutor PLTO 3	3	3	3	3	3	243 = C
7	Redutor PLTO2	3	2	1	1	2	12 = A
8	Válvula de Segurança VESG1	2	1	2	3	3	36 = A
9	Bomba XPRT 2	3	3	3	2	2	108 = B
10	Painel Elétrico PORI1	2	3	3	3	3	162 = C
		Criticidade A			Criticidade B		Criticidade C
Qtd.	6			2		2	
%	60%			20%		20%	

Fonte: Adaptado de Teles (2019)

4.1.5 Análise dos Modos e Efeitos de Falha

Nesta fase, procura-se identificar os modos de falhas, as causas das falhas funcionais e fazer o levantamento dos efeitos dessas falhas em associação a cada modo de falha. Para esta fase, será utilizado a ferramenta FMEA – Análise de Modos e Efeitos de Falhas.

Para elaboração do FMEA, a equipe deve indicar a função do equipamento, os componentes do equipamento, as falhas, número de ocorrências, o modo de falha, detecção efeitos da falha, severidade, o Número de Prioridade de Risco (RPN - *Risk Priority Number*) e as ações para controle da falha.

O RPN é calculado conforme mostrado na equação 2:

$$\text{ocorrência} \times \text{detecção} \times \text{severidade} = \text{RPN} \quad (2)$$

Onde:

- Ocorrência: é a probabilidade da causa ou modo de falha ocorrer, ou seja, a quantidade de vezes que já ocorreu ou pode vir a ocorrer;
- Detecção: é a probabilidade de se detectar uma possível falha antes chegar ao consumidor final, utilizando os mecanismos de controles existentes na empresa;
- Severidade: avalia o nível de impacto do efeito da falha no cliente;

No anexo A, serão mostrados os critérios para avaliação da ocorrência, detecção e severidade. No anexo B, é apresentado um modelo de planilha para elaboração do FMEA.

4.1.6 Seleção das Atividades de Manutenção Preventiva

Nesta fase, tem-se como objetivo selecionar as atividades de manutenção preventiva que podem ser aplicadas aos modos falhas que foram identificados no FMEA. Para essa seleção, este trabalho indica o uso de uma planilha de decisão, nessa planilha serão depositadas todas as informações e decisões que forem tomadas ao longo do processo de seleção das atividades.

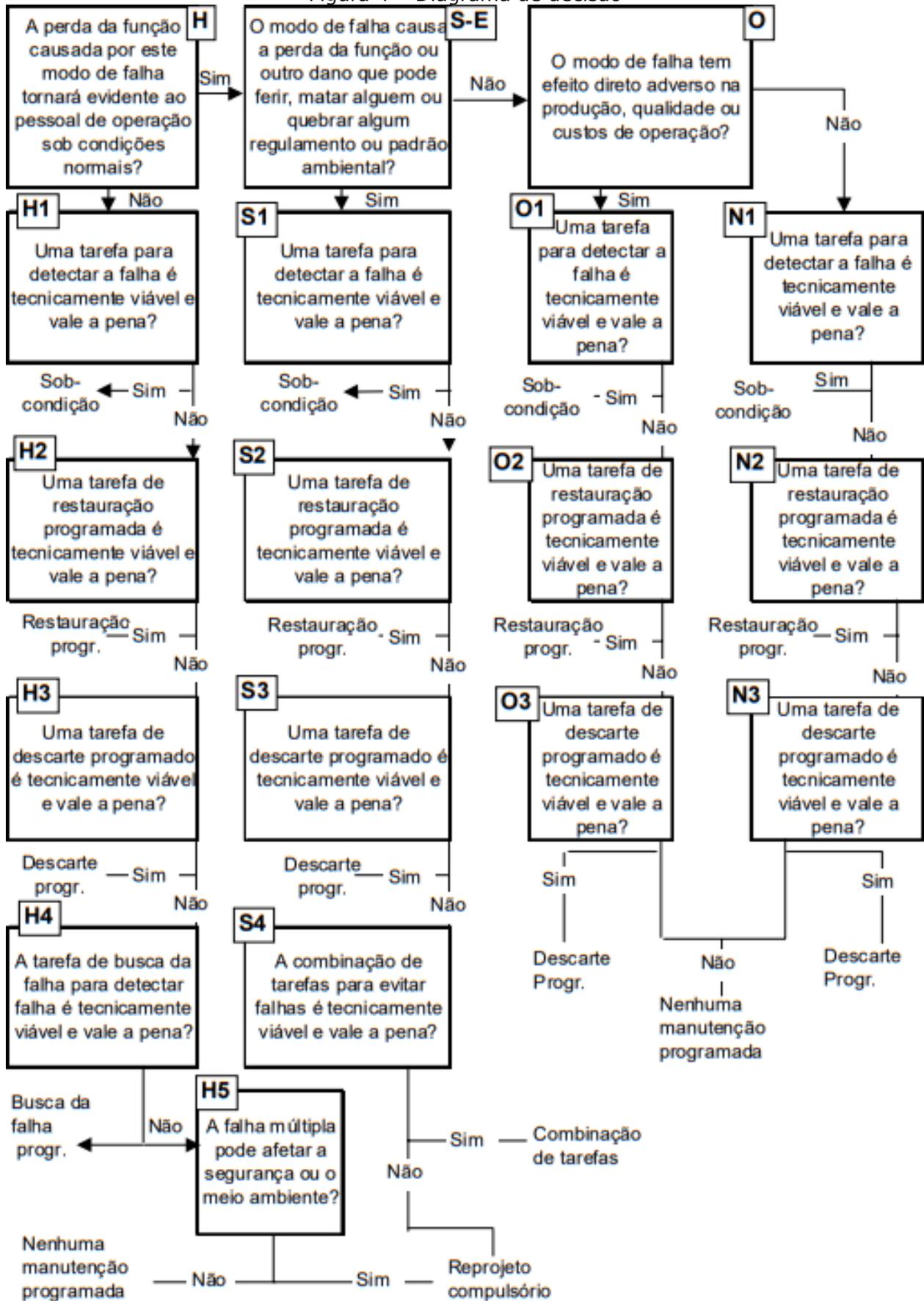
Para elaboração da planilha de decisão, deve-se elaborar o diagrama de decisão da MCC, com o auxílio desse diagrama, a equipe de implantação da MCC poderá desenvolver a rotina de manutenção a ser empregada, fazer o levantamento das falhas que podem vir a ocasionar um reprojeto e os casos em que uma decisão acordada permita a ocorrência da falha.

Com o diagrama de decisão, também busca-se identificar os modos de falha que estão ocultos, que possuem grande probabilidade de causar danos ao operador, potenciais efeitos ao meio ambiente e grande efeito sobre a produção.



Na figura 4, é exposto um exemplo para elaboração de um diagrama de decisão.

Figura 4 – Diagrama de decisão



Fonte: Adaptado de Moubray (2000)



Após elaboração do diagrama de decisão, as informações levantadas devem ser compiladas na planilha de decisão, como exposto no quadro 6.

Quadro 6 – Planilha de decisão da MCC

MCC			PLANILHA DE DECISÃO DA MCC											
			SISTEMA:			TURBINA DE 5 MW								
			SUBSISTEMA:			SISTEMA DE EXAUSTÃO								
			DATA:			14/06/2021				EQUIPE:				
Referência Informação			Avaliação de Consequências			Ação Pró- ativa			Ação <i>Default</i>		Tarefa Proposta	Frequência	Responsável	
F	FF	FM	H	S-E	O	H1	H2	H3	H4	H5	S4			
						S1	S2	S3						
						O1	O2	O3						
						N1	N2	N3						

Fonte: Adaptado Moubroy (2000)

4.1.7 Determinação do Plano de Manutenção

Na última fase, será elaborado o plano de manutenção. Para elaboração desse plano, cada item físico deve ser relacionado a atividade de manutenção que fora recomenda para os modos de falhas que foram estabelecidos na fase anterior. Nesse plano também deve ser estabelecido a frequência com a qual devem ser realizadas as atividades de manutenção. Para criação desse plano, pode-se usar a planilha apresentada na fase anterior, exposta no quadro 6. Esse trabalho também indica que seja feito uma comparação entre os planos de manutenção, no caso, o plano de manutenção existente antes da MCC e elaborado após a MCC.

Essa comparação objetiva a compreensão da diferença entre as duas propostas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema abordado nesse trabalho, buscou apresentar uma metodologia para auxiliar na implantação da manutenção centrada na confiabilidade, com o intuito de aprimorar as técnicas de manutenção do pilar manutenção planeja da manutenção produtiva total.

Como fora exposto, a TPM como objetivos principais, maximizar a tanto o rendimento operacional das máquinas, quanto dos equipamentos, e a atuação em conjunto de todos os setores da empresa.



Para alcançar o primeiro objetivo, é de extrema importância que o pilar manutenção planejada possua uma programação de manutenção extremamente eficaz. E nesse ponto, entra a importância da utilização da MCC, pois na TPM, não existe um padrão ou uma estratégia de manutenção preventiva definida. Com isso, a metodologia de MCC proposta neste trabalho, visa definir uma estratégia mais adequada, com base em critérios lógicos e racionais.

REFERÊNCIAS

- ABDON, F. F.; NOGUEIRA, J. de S.; ARAÚJO, M. C. B. de. **Implantação da Manutenção Autônoma**: Um Estudo de Caso na Indústria de Alimentos. *IN: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 40., 2020, Foz do Iguaçu. **ANAIS [...]**. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2020. Disponível em: < TN_STO_342_1753_39591.pdf (abepro.org.br)>. Acesso em: 30 mar 2021.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P A. **Metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- COUSSEAU, V. L. **Aplicação de um Método de Implantação da Manutenção Produtiva Total A Partir da Ótica da Teoria das Restrições na Linha de Fabricação de Painéis da Tramontina Farropilha S.A.** Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) UFRGS. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <Microsoft Word - Disserta..o - Valter LinoCousseau.doc (ufrgs.br)>. acesso em: 29 mar. 2021.
- FOGLIATTO, F. S.; DUARTE, J. L. R. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- GISSONI, R. T. **Aplicação De Recursos De Gestão Produtiva Total (TPM) Para Gestão De Ativos Em Empresas De Distribuição De Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ambiente) UFMA. São Luís, 2016. Disponível em: <Dissertacao- RogerToledoGissoni.pdf (ufma.br)>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.
- MINAYO, M. C. de S.; DESLANDES, S. F.; GOMES, R. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. Petrópolis: Editora Vozes. 2002.
- MOUBRAY, J. **RCM II: Manutenção Centrada em Confiabilidade**. São Paulo: Aladon Ltda, 2000.
- NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM - Total Productive Maintenance**. São Paulo: IMC Internacional Sistemas Educativos Ltda., 1989.
- NETTO, W. A. C. **A Importância e a Aplicabilidade da Manutenção Produtiva Total (TPM) nas Indústrias**. Monografia (Graduação em Engenharia Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2008. Disponível em: <Wady-UFJF-Engenharia-Monografia.pdf>. acesso em: 02 abr. 2021.
- SMITH, A. M. **Reliability Centered Maintenance**. Boston: McGraw-Hill, Inc. 1993.
- SOUZA, J. B. de; MARÇAL; R. F. M. **Reliability Centered Maintenance (RCM) e Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): uma reflexão teórica-analítica**. *IN: SSIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 16., 2009. Disponível em: <Reliability Centered Maintenance (RCM) e Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): uma reflexão teórica- analítica - PDF Download grátis (docplayer.com.br)>. Acesso em 03 abr. 2021.
- TELES, J. **Bíblia do RCM: O Guia Completo e Definitivo da Manutenção Centrada na Confiabilidade na Indústria 4.0**. Brasília: ENGETELES Editora. 2019.



ANEXO A - CRITÉRIOS DE OCORRÊNCIA, SEVERIDADE E DETECÇÃO

OCORRÊNCIA		
PROBABILIDADE DE FALHA	TAXAS DE FALHA POSSÍVEIS	ÍNDICE DE OCORRÊNCIA
REMOTA: Falha é improvável	Chance Remota de Falha	1
Baixa: Relativamente poucas falhas	Frequência muito baixa: 1 vez a cada 5 anos	2
	Pouco Frequente: 1 vez a cada 2 anos	3
Moderada: Falhas ocasionais	Frequência baixa: 1 vez por ano	4
	Frequência ocasional: 1 vez por semestre	5
	Frequência moderada: 1 vez por mês	6
Alto: Falhas Frequentes	Frequente: 1 vez por semana	7
	Frequência elevada: algumas vezes por semana	8
Muito Alta: falhas persistentes	Frequência muito elevada: 1 vez por dia	9
	Frequência máxima: muitas vezes por dia	10

Fonte: Teles (2019)

Severidade		
SEVERIDADE	EFEITO DA SEVERIDADE	ÍNDICE DE SEVERIDADE
Nenhum	Sem efeito identificado	1
Muito menor	Itens de ajustes, acabamento/chiado e barulho não-conformes. Defeitos evidenciado por clientes acurados (menos de 25%)	2
Menor	Itens de ajuste, acabamento/chiado e barulhos não-conformes. Defeito evidenciado por 50% dos clientes.	3
Muito baixo	Itens de ajuste, acabamento/chiado e barulho não-conformes. Defeito notado pela maioria dos clientes (menos que 75%)	4
Baixo	Equipamento operável, mas item(s) de conforto/conveniência operável(s) com níveis de desempenho reduzidos.	5
Moderado	Equipamento operável, mas item(s) de conforto/conveniência inoperável(s).	6
Alto	Equipamento inoperável, mas com níveis de desempenho reduzido.	7

Muito alto	Equipamento inoperável (perda das funções primárias).	8
Perigoso com aviso prévio	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha potencial afeta a segurança na operação do equipamento com aviso prévio.	9
Perigoso sem aviso	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha potencial afeta a segurança na operação do equipamento sem aviso.	10

Fonte: Teles (2019)

DETECÇÃO						
DETECÇÃO	CRITÉRIO	TIPOS DE INSPEÇÃO			FAIXAS SUGERIDAS DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO	ÍNDICE DE DETECÇÃO
		A	B	C		
Quase impossível	Certeza absoluta de não detecção			x	Não pode ser detectado ou não é verificado.	10
Muito remota	Controles prováveis não detectarão			x	Controle é alcançado somente com verificação aleatória ou indireta.	9
Remota	Controles tem chances remotas de detectar			x	Controle é alcançado somente com inspeção visual.	8
Muito baixa	Controles tem pouca chance de detectar			x	Controle é alcançado somente com dupla inspeção visual.	7
Baixa	Controles podem detectar		x	x	Controle é alcançado com métodos gráficos, tais como CEP (Controle Estatístico do Processo).	6
Moderado	Controles podem detectar		x		Controle é baseado em medições por variáveis, depois que as peças deixam a estação, ou em medições do tipo passa/não-passa feitas em 100% das peças depois que deixam a estação.	5
Moderadamente Alta	Controles tem boas chances para detectar	x	x		Detecção de erros em operações subsequentes, ou medições feitas na preparação de máquina e na verificação da primeira peça (somente para casos de preparação de máquina).	4

Alta	Controles tem boas chances para detectar	x	x		Detecção de erros na estação, ou em operações subsequentes por múltiplos níveis de aceitação, fornecer, selecionar, instalar, verificar. Não pode aceitar peça discrepante.	3
Muito alta	Controles quase certamente irão detectar	x	x		Detecção de erros na estação (medição automática com dispositivo de parada automática). Não pode passar peça discrepante.	2
Quase certamente	Controles certamente detectarão	x			Peças discrepantes não podem ser feitas porque o item foi feito a prova de erros projeto do processo/produto.	1

Fonte: Teles (2019)

ANEXO B – PLANILHA FMEA

FMEA - Análise dos Modos e Efeitos de Falha																
FMEA n°: Processo:	Data da Elaboração: Responsável:	Revisão: Revisor:	Data da Revisão:	Efeito de Falha	Severidade	S	RPN	Ação Recomendada	Componente	Função						
											Ocorrência	D	Deteção	O	Modo de Falha	
Comando elétrico da Ensacadora	FOLGA NO BORNE/PARAFUSO	4	VIBRAÇÃO	Controles quase certamente detectarão.	2	4	40	Reaperto dos bornes a cada 12 meses	SOBREAQUECIMENTO DO BORNE PODENDO LEVAR A UM CURTO-CIRCUITO	Há risco controlável de segurança, produção ou qualidade, sem a aviso prévio.						
											3	UMIDADE / POEIRA	Controles quase certamente detectarão.	2	30	Limpeza a cada 12 meses e aplicação de limpa contato sob condição.
	CORPO ESTRANHO NO NÚCLEO	Frequência muito baixa: 1 vez a cada 5 anos														

CAPÍTULO 10

A IMPORTÂNCIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

THE IMPORTANCE OF ENERGY EFFICIENCY IN THE BRAZILIAN
ELECTRIC SECTOR: A LITERATURE REVIEW

Eyder de Jesus Castro Júnior¹

Rialberth Matos Cutrim²

1 Graduando do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade - CEUMA. E-mail: eydercastro12@gmail.com

2 Graduado em Engenharia Mecânica. Mestre em ciências dos materiais. E-mail: rialberth.cutrim@ceuma.br

Resumo

Este trabalho de conclusão curso que traz como tema a importância da eficiência energética no setor brasileiro, bem como, apresenta discussões acerca da eficiência energética, tendo em vista que o setor energético brasileiro vem vivenciando diversas transformações desde o fim da década de 1990. Este estudo justifica-se em salientar que a eficiência energética se apresenta como um mecanismo mais eficaz no que concerne ao consumo de energia, isto é, oferecendo menos custo ao consumidor final. Tendo como objetivo geral analisar as contribuições que a eficiência energética traz para o setor elétrico brasileiro. Trata-se de um estudo de revisão de literatura, onde se realizou um levantamento de documentos acerca da importância da eficiência energética no setor elétrico brasileiro. Sendo realizado pesquisas em sites, revistas eletrônicas, periódicos utilizando descritores como: setor energético, eficiência energética, setor elétrico brasileiro. Posteriormente as buscas efetuadas nos apropriados site e revistas foram discutidas se baseando em contestações para o desfecho da temática. Diante das discussões realizadas compreende-se que os processos que levam a eficiência energética no Brasil passaram por diversas transformações, em especial as inovações tecnológicas e as mudanças do paradigma do setor elétrico, e que os expectativas do desempenho da eficiência energética no setor brasileiro baseiam-se nas condições estruturais, geográficas e econômicas do país e que não há uma receita única para as empresas do setor atuarem de maneira a se preparar para essas transformações. Em síntese, este estudo destacou a importância da eficiência energética no setor elétrico brasileiro, além de corroborar e fomentar a comunidade científica no sentido de ampliar as discussões acerca do tema investigado.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Setor Elétrico Brasileiro. Políticas de Eficiência Energética.

Abstract

This course conclusion work brings as its theme the importance of energy efficiency in the Brazilian sector, as well as presents discussions about energy efficiency, considering that the Brazilian energy sector has been experiencing several transformations since the late 1990s. It is justified to emphasize that energy efficiency presents itself as a more effective mechanism with regard to energy consumption, that is, offering less cost to the final consumer. The general objective is to analyze the contributions that energy efficiency brings to the Brazilian electricity sector. This is a literature review study, where a survey of documents about the importance of energy efficiency in the Brazilian electricity sector was carried out. Research being carried out on websites, electronic magazines, periodicals using descriptors such as: energy sector, energy efficiency, Brazilian electricity sector. Subsequently, the searches carried out on the appropriate websites and magazines were discussed based on contestations for the outcome of the theme. In light of the discussions held, it is understood that the processes that lead to energy efficiency in Brazil have undergone several transformations, especially technological innovations and changes in the paradigm of the electricity sector, and that the expectations of energy efficiency performance in the Brazilian sector are based on the structural, geographic and economic conditions of the country and that there is no single recipe for companies in the sector to act in order to prepare for these changes. In summary, this study highlighted the importance of energy efficiency in the Brazilian electricity sector, in addition to supporting and fostering the scientific community in order to broaden the discussions on the topic investigated.

Key-words: Energy Efficiency. Brazilian Electricity Sector. Energy Efficiency Policies.



1. INTRODUÇÃO

No início dos anos 2000, o Brasil vivenciou uma dura crise de abastecimento de eletricidade, fazendo com que o governo naquele período realizasse um racionamento de energia elétrica. Este fato prejudicou a economia do País, especialmente, a atividade industrial, tendo metas de redução a executar aos demais setores. A urgência do racionamento desencadeou problemas do setor elétrico nacional, que passou por diversas reformas desde então.

Neste cenário, a capacidade instalada de geração e transmissão foram expandidas. No entanto, frente as especificidades energo-intensiva da economia a demanda por eletricidade não parou de crescer. Hoje em dia, a política energética nacional se encontra diante de um contexto desafiador, como por exemplo, sua expansão de oferta estar com custos elevadíssimos e que estão em constante crescente, onde tal situação atemoriza um dos seus principais objetivos, que o controle tarifário.

Dessa forma, o incentivo a eficiência energética se apresenta como um mecanismo de enfrentamento ao problema. Haja visto, que estas quando bem-sucedidas promovem a diminuição da demanda por eletricidade sem prejudicar o bem-estar da população. Ademais, se apresenta como um dos poucos pontos de comum acordo entre os argumentos dos organizadores de políticas energéticas e ambientais.

Para entender melhor a problemática deste projeto é necessário salientar as inquietações no que concerne ao desenvolvimento de políticas que visem uma eficiência energética no setor brasileiro pelo fato que as pressões ambientais e os choques do petróleo dão impulso a formação de políticas com interesse na conservação de energia.

Neste sentido, este trabalho de conclusão de curso tem a seguinte problemática de estudo: quais são os principais benefícios proporcionados no setor elétrico brasileiro pela eficiência energética? E quais os parâmetros utilizados como eficiência energética?

Este estudo tem como percurso metodológico uma pesquisa de revisão bibliográfica, onde se realizou um levantamento de literaturas acerca da importância da eficiência energética no setor elétrico brasileiro. Neste sentido, realizou-se pesquisas em sites, revistas eletrônicas, periódicos utilizando descritores como: setor energético, eficiência energética, setor elétrico brasileiro. Posteriormente as buscas efetuadas nos apropriados sites e revistas foram discutidas se baseando em contestações para que assim se realizasse o desfecho da temática.

Portanto, este trabalho buscou mostrar a importância da eficiência energética para como o setor elétrico brasileiro, evidenciando mecanismos que fazem desse setor uma alternativa para a qualidade e distribuição de energia no país. Partindo do ponto de que o setor energético promove subsídios que fortalecem a economia no país, promovendo a qualidade de vida da população, menor índice de poluição atmosférica, maior eficiência no aquecimento e refrigeração de casas e prédios dentre outros benefícios.



2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: CONCEITO

Para Pereira (2000), a terminologia da eficiência energética estar relacionado entre a quantidade de energia final consumida e de um bem fabricado ou serviço executado, em que a eficiência está relacionada à quantidade efetiva de energia usada e não à demanda necessária para realização de determinado serviço, ou seja, a expressão eficiência é a capacidade de equipamentos que trabalham em ciclos ou processos produzindo objetivos a serem alcançados.

Neste sentido, entende-se que definir eficiência energética está direcionada à aquisição de serviços energéticos, em especial a produção, ao transporte e calor, por unidade de energia usada, sobretudo, o gás natural, carvão ou eletricidade dentre outros.

De acordo com Santos (2015), a eficiência energética tem como finalidade possibilitar o uso consciente de racionamento de energia e foi através desta visão que foi desenvolvido o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) desenvolvido pela Eletrobrás, onde este programa visa combater o desperdício e usando como emblema o Selo PROCEL. Este programa no Brasil a energia elétrica é concebido em sua maior parte através de água de rios, tornando-se imprescindível da energia elétrica de forma consciente.

Por eficiência energética compreende-se o uso racional da energia assegurando o mesmo ou maior quantidade de produção de bens e serviços. Percebe-se que será possível aprimorar significativamente os níveis de eficiência energética por meio de tecnologias e medidas comportamentais que auxiliem à diminuição dos consumos, comparativamente com os processos empregados convencionalmente, todavia, como acima supracitado, sempre preservando o mesmo nível de produção de bens e serviços (ALVES, 2016).

Nesta perspectiva, a utilização deste conceito de eficiência pode direcionar significativas reduções do consumo de energia capazes de grandes impactos, tanto econômicos como na atenuação da emissão de GEE para a atmosfera. A eficiência energética pode ser trabalhada a inúmeros padrões e em diversas escalas, seja no que concerne às políticas de ordenamento do território, às empresas ou mesmo ao nível do pequeno consumidor (COSTA, 2016).

Em síntese, podem descrever-se consideráveis impactos causados pela aplicação de medidas e tecnologias de eficiência energética, quais sejam, por exemplo, entre outras vantagens diretas e indiretas, o apoio a competitividade das empresas e dos países, o encolhimento da fatura energética dos países e conseqüente baixa da dependência energética, ou a atenuação de emissão de gases com efeito estufa (ANDRADE, 2019).

Mas cabe aqui destacar a diferença do que é eficiência energética e poupança energética: poupança de energia, quando vista separadamente, reflete a simples diminuição do consumo de energia, logo diminuição da atividade para a qual é empregada. Já eficiência energética retrata um conceito bem mais abrangente, de melhoria do consumo de energia, isto é, de poupança sem diminuição da atividade, mesmo com o crescimento da atividade de consumo (GARRIDO, 2012).

Dada a relevância da energia elétrica para a qualidade de vida da população, es-



pecialmente das sociedades urbanas. Deste modo, a eficiência energética no contorno das cidades, significa entender em pormenor o ciclo da energia elétrica. O entendimento deste ciclo é importante na percepção da maneira como se poderá interceder nas suas diferentes etapas, principalmente no que concerne a produção, distribuição, consumo de maneira a obter a máxima eficiência energética (SOUSA, 2011).

Todavia, uma vez que nós queremos debruçar sobre o papel das sociedades urbanas no objetivo da maximização da eficiência energética nas cidades, entendemos dirigir a nossa atenção para a componente do ciclo que mais bem pode ser percebida e potenciada por estas sociedades, concretamente a fase de consumo de energia elétrica. Sem prejuízo, obviamente, de continuar a relevar a necessidade de grande e especializada atenção às outras fases do ciclo da energia elétrica como forma de otimização da EE nas cidades (MEIRELES, 2018).

A utilização da energia até chegar aos lares geralmente passa por fases que vão desde o estágio em que ela é encontrada na natureza que é denominada de energia primária até os serviços energéticos essenciais, como a luz. Esta trajetória da chamada energia primária passa por mudanças e se expressa de várias maneiras que podem ser mensurados com uma mesma unidade, como se a energia fosse uma natureza de fluido perpassando todos os níveis da economia (PINTO, 2009).

Segundo Barros (2009), as mais diversas maneiras de como a energia se expressa estão organizadas em três grupos: o primeiro concerne a energia primária, o segundo a energia secundária e por último o serviço de energia também denominado como uso final. Dessa forma, aprimorar a eficiência energética quer dizer diminuir o consumo de energia primária fundamental na produção de um determinado serviço de energia elétrica. Dessa forma, a redução pode ocorrer em qualquer fase da cadeia das transformações (CAMPOS, 2013).

Já para Alves (2016), a muito tempo, a mudança de combustíveis por eletricidade resultou por diversas vezes diminuições na energia primária. Atualmente no Brasil, a substituição da eletricidade pelo gás natural em alguns processos térmicos pode diminuir a energia primária que é demandada.

Por questões práticas, é normal fragmentar o campo de atuação em duas grandes categorias, que são elas: a oferta e o uso final de energia. Esta fragmentação estar relacionada a enorme distinção existente entre as duas categorias. A categoria denominada oferta desenvolve sua produção de energia por meio de combustíveis fósseis e eletricidade e é representada por um pequeno número de empresas, cujos lucros são sensíveis à diminuição de qualquer perda ou desperdício (VARGAS, 2019).

Em síntese, sua função é negociar, processar e vender energia. Por outro lado, o uso final é constituído por um significativo número de empresas e pessoas, com as mais diversas especificidades (MATTOS, 2017). Para Pereira (2000), uma grande parte da energia vem introduzida nos produtos de consumo, que vão desde o pão até os veículos automotores, principalmente na forma de matérias energointensivas, especialmente o papel, vidro, alumínio e aço. Empresas que poupam esses materiais, incluindo a reciclagem ou reutilização, tem a tendência de economizar mais energia. Outro exemplo importante é a água, cujo bombeamento e tratamento exige muita energia. Outra situação destacada



pelo autor supracitado diz respeito a economia de água que é o mesmo que economizar energia e assim conceber serviços energéticos.

Diante do exposto nesse capítulo, trona-se relevante compreender que a eficiência energética não quer dizer racionamento e tão menos racionalização forçada, que intentam a diminuição do serviço energético. Hoje, com o país passando por medidas emergenciais, é fundamental que haja um uso mais racional de energia e assim não gerar um colapso no setor de energia.

2.1 Origem e Evolução das Políticas de Eficiência Energética

No cenário mundial, as preocupações no diz respeito a elaboração de políticas de eficiência energética manifestam-se, de forma mais ativa, ao longo da década de 1970. Nesse período, as pressões no setor ambiental e os choques do petróleo dão impulso a construção de políticas com alvo na preservação de energia (PEREIRA, 2000).

Nesta perspectiva, em 1972, o Clube de Roma divulgou um estudo chamado os Limites do Crescimento onde tal estudo levava as preocupações do consumo de energia e o consumo e a preservação do meio ambiente, ou seja, as consequências da utilização desordenada dos recursos naturais (SANTOS, 2015).

Segundo Sousa (2011), foi no ano de 1973, que ocorreu o primeiro choque do petróleo fazendo elevar o preço do barril de US\$2,995 para US\$13,436 ocasionado em serias consequências na economia mundial, especialmente a àqueles países particularmente importadores de combustíveis. Ainda segundo o autor acima, a crise provocada pela força de mercado da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) foi causada pela ajuda americana à Israel na Guerra do Yom Kipur trazendo grande relevância nos debates sobre a temática de segurança energética.

Nesse contexto, com a tensão no setor energético em 1973, as discussões sobre eficiência energética (EE), antes vistas sob uma visão ambientalista, ganha mais importância junto as temáticas econômicas e estratégias nacionais. Porém, apesar de oscilarem para este lado, as inquietações ambientais continuavam na agenda, emergidos pela urgência de racionalização do consumo de energia (ALVES, 2016).

De acordo com Pereira (2000), a Conferência das Nações Unidas realizada em 1973 que tinha como tema o Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD), a Organização das Nações Unidas (ONU), onde nesta ocasião divulgou a Declaração de Cocoyok demonstrando que os países industrializados deveriam reduzir seus níveis de consumo, ou seja, diminuindo sua contribuição negativa na poluição global.

Segundo Barros (2009), os países inerentes a importação de combustíveis se empenhou no sentido de variar suas matrizes energéticas, ampliando a participação de usinas térmicas nucleares e fontes renováveis. Assim, seus planejamentos contaram também com a inserção de políticas que visavam a racionalização e conservação de energia. Desta forma, a economia se preparava para encarar as variações do preço da *commodity*.



Na década de 1980, a ONU proferiu um relatório para o desenvolvimento sustentável denominado *Our Common Future*, também chamado de Relatório de Brundtland, onde preconiza, dentre outros, a redução do consumo de energia (SANTOS, 2015). Nos anos 90, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC8) publicou um relatório sobre as complicações dos gases de dióxido de carbono, especialmente, da queima de combustíveis fósseis.

Perante as discussões feitas neste capítulo, nota-se uma apreensão com a racionalização do consumo de energia, principalmente desde a década de 1970, tendo pautas em debates internacionais. No entanto, o impulso para isto costuma variar entre inquietações ambientais e os planejamentos econômicos nacionais. Portanto, as ações que visam a promoção de uma eficiência energética visam estreitar interesses fatores estratégicos-econômicos, como possibilitar uma maior segurança do abastecimento, se preocupando também com as questões ambientais.

2.1.1 Ações que Visam a Eficiência Energética

No cenário atual existe várias pesquisas que indicam para os benefícios da inserção de políticas de eficiência energética no cenário mundial. O relatório *Spreading the Net: the Multiple Benefits of Energy Efficiency* (CAMPOS, 2013), desenvolvido com apoio da IEA, fraciona as possíveis vantagens em quatro níveis que são eles: individual, setorial, nacional e internacional.

No que concerne ao nível individual: as vantagens trazem benefícios a saúde e o bem-estar graças a pequenos níveis de poluição na atmosfera providas de meios de transporte mais eficazes e da diminuição de gases resultantes da geração de energia. Ademais, proporciona melhorias no conforto, ou seja, uma maior eficiência no aquecimento e refrigeração de casas e prédios; redução da pobreza e universalização do acesso a eletricidade (ALVES, 2016).

Pois segundo Alves (2016), com a diminuição no consumo final, as distribuidoras de energia podem atender assim uma maior quantidade de lares, e, uma vez que as taxas de eletricidade se encaixam no orçamento familiar. Por meio, da diminuição na conta de luz provocada pela diminuição do consumo, existe uma liberação de parte da renda que poderá ser destinado a outras finalidades, tendo assim a possibilidade de conceber resultados macroeconômicos positivos.

Em relação ao nível setorial: existe uma crescente na produtividade e competitividade industrial por causa da diminuição no uso de recursos e poluição. Porém, proporciona vantagens na infraestrutura e distribuição de energia ocasionado uma diminuição nos custos operacionais e além disso promove um aumento nas margens de lucro. Ademais, existe uma valorização dos ativos, dado a existência de indicativos de que empresários estão dispostos a pagar um prêmio no aluguel, ou então na venda, de propriedades com melhores valores na taxa de consumo de energia (SANTOS, 2015).

No que tange o nível nacional, este por sua vez gera a criação de empregos, em razão do aumento da renda nacional, e do desenvolvimento da indústria para preservação de

energia, diminuição de gastos públicos associados a energia. Além disso, promove outras vantagens como: o aumento da segurança energética, efeitos positivos macroeconômicos, como o desenvolvimento do produto nacional, qualidade na balança comercial para países importadores de combustíveis, desenvolvimento da competitividade nacional, e ampliação dos postos de trabalho (ALVES, 2016).

Por fim, o nível internacional, promove vantagens como a redução dos gases que provocam o efeito estufa, cria mecanismo que visam a redução dos preços de energia. A diminuição na demanda mundial por combustíveis impacta de forma negativa os preços das *commodities* energéticas. Porém, pode-se destacar vantagens como, a redução na pressão por recursos naturais, maior alcance de objetivos sociais pelos países em desenvolvimento, que proporcionam o fim da pobreza e universalização do acesso ao consumo de energia (ALVES, 2016).

Nesse contexto discursivo, percebe-se que estes níveis visam o aumento potencial de conservação de energia por meio de inserção de políticas que fomentem a tomada de atuações de eficiência energética.

Um levantamento feito pelo Instituto Breakthrough (2011), diz que 52% dos ganhos com eficiência energética intencionados até o ano de 2030 serão desgastados pelo que se denomina efeito rebote. Isto remete a seguinte situação, ao passo que a eficiência energética auxilia na diminuição dos custos, seja dos lares, seja do setor industrial, ela acaba por demandar por um consumo maior de energia nos setores micro e macroeconômicos.

Para Alves (2016), no nível residencial, se um consumidor compra um ar-condicionado mais eficaz, conseqüentemente ele passa a utilizar esse aparelho por um período mais longo do que um com indicadores de consumo de energia mais alto. Dessa forma, o consumidor percebe uma qualidade no seu bem-estar, no entanto não modifica seu consumo energético, pois vai utilizar com mais frequência o aparelho novo.

Já em relação ao setor industrial, os ganhos de eficiência energética aspiram um aumento na competitividade da mesma. Quando isto ocorre, a demanda por seus produtos aumenta e, ela observará uma maior quantidade de energia para atender suas demandas (CAMPOS, 2013). Desta forma, uma vez inseridas políticas que visem a promoção da eficiência energética, o consumo de eletricidade pode aumentar como conseqüências destas ações.

2.1.2 Evolução da Demanda de Eletricidade no Setor Brasileiro

Ao verificarmos o comportamento da taxa de crescimento da demanda nacional por energia elétrica desde o período de 1990, observa-se que, até o racionamento de 2001, a demanda aumentava de forma significativa e acima da taxa de crescimento esperada pelo País. Esta característica manifesta uma economia com alta intensidade energética, isto é, onde a correlação de energia demanda por unidade de PIB (Produto Interno Bruto) é altíssima (MATTOS, 2017).

Conforme o autor acima, na realidade, a avanço do mercado brasileiro de eletricidade



não levou em conta até recentemente a introdução de instruções e diretrizes para assegurar a introdução de tecnologias eficazes. Até o fim da década de 70, por exemplo, assistiu-se a preocupação de fortalecer o mercado brasileiro de energia elétrica, desencadeando principalmente uma organização industrial fundamentada em segmentos intensivos em energia elétrica.

Ao final da década de 70 até os anos 90, o setor passou por vários períodos de reduções financeiras e diversas crises de energia, como foi o caso da alta de preços de petróleo nos anos 70. Durante essa época, em particular, houve empenhos governamentais e estímulos para a substituição de petróleo por eletricidade por meio de programas de eletrotermia e a seguir a introdução de instrumentos para absorção da energia de Itaipu (CAMPOS, 2013).

Os processos para criação e solidificação do mercado de energia elétrica são muito importantes, pois constituem uma infra-estrutura de consumo que muito dificilmente pode ser alterada em curto prazo. O Brasil tem seguido uma rota de crescimento da intensidade de utilização de eletricidade há vários anos. A racionalidade das empresas privadas de eletricidade as incentiva a procura de expansão de suas vendas como maneira de fortalecer seus lucros, o que as torna resistente a esforços de eficiência energética.

Neste sentido, são necessários elementos que determinem esses desincentivos. As reformas setoriais implementadas ao longo dos anos 90 assinalam o interesse das empresas privadas em buscar ampliar seu mercado de eletricidade e introduzir novos desafios que visem um planejamento de um mercado eficiente de energia.

De acordo com Barros (2012), na década de 90 é exposto um projeto de Lei que procurava gratificar as concessionárias de energia elétrica por seus investimentos em conservação de energia e estabelecer níveis mínimos de eficiência energética em equipamentos comercializados no país. Esse projeto de Lei apenas foi de fato aprovado, após necessárias melhorias, no ápice da crise de energia, no ano de 2001, dando origem a Lei 10.925 que retrata sobre a eficiência energética.

De acordo com Santos (2015), as finalidades na diminuição de consumo impostas pelo governo nos anos 2000 foram fundamentadas na quantidade da demanda por cada setor da economia. Desta forma, é importante salientar que os principais consumidores de energia no País estão nos setores industriais, residenciais e comerciais.

Assim, cada setor de consumo, seja ele industrial, residencial, comercial ou público, manifesta suas características próprias. No setor residencial, por exemplo, o consumo de eletricidade relacionado a posse e a utilização de eletrodomésticos. A partir do reconhecimento dos setores com maior consumo de energia elétrica, as autoridades energéticas podem centralizar esforços na construção de políticas voltadas, na função de que sejam capazes de diminuir as perdas. Desta forma, é importante conhecer o comportamento das taxas de crescimento das demandas de energia e assim vão auxiliar na construção destas políticas (ALVES, 2016).

Percebe-se que a quantidade de energia que é consumida pelo setor industrial é bastante volátil, por outro lado o consumo dos setores residencial e comercial cresce e as taxas mais constantes. Caso haja uma estabilidade na taxa de demanda por eletricidade



nos setores residencial e comercial facilitaria a inserção de políticas de conservação de energia para estes setores (PEREIRA, 2000).

Em conformidade com Santos (2015), a crescente da classe média, ocasionadas pelas políticas de inclusão social criadas nos últimos governos obrigou a demanda por energia. Quando existe um número maior de consumidores e esses têm a acesso a serviços, como a eletrodomésticos e eletroeletrônicos o consumo dos setores residencial e comercial cresce. Visto que as pretensões demonstram que o País marchara rumo a uma trajetória de crescimento econômico. Deste modo, Neto (2010), discorre que a renda nacional irá se desenvolver e conseqüentemente existirá um número maior de consumidores a produtos que consomem energia. E para atender a este aumento torna-se necessário ter uma redução tarifária, gerando assim uma maior eficiência energética no país.

Nesta perspectiva, para que haja garantia na segurança de abastecimento de energia elétrica no País é fundamental que a oferta seja capaz de suprir a necessidade, seja através de produção nacional, ou através da importação de carga. No Brasil, grande parte da energia elétrica que é consumida é suprida através das fontes nacionais (SANTOS, 2015).

De acordo com Mattos (2017), mesmo com a divulgação dos dados oficiais do governo indicarem que a oferta de energia elétrica no País aumenta a uma rapidez que acompanha o ritmo do consumo, o setor elétrico brasileiro passou por inúmeras crises nessas últimas décadas.

Nesta perspectiva Barros (2012), diz que:

As estatais do setor e o governo não detiam condições para investir no suporte do parque energético nacional e ainda menos na organização e capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia. Com o esgotamento da capacidade pública para investir na expansão da infraestrutura energética nacional de forma a suprir a necessidade de energia futura, o governo estabelece a liberalização do setor (BARROS, 2012, p. 12).

Para Pinto (2009), até o fim da década de 1970 existiu um grande investimento no setor elétrico brasileiro, especialmente no que concerne a geração de energia. Tais investimentos possibilitaram quase duas décadas de excesso de capacidade instalada no País, visto que não existiu novas intervenções, sendo somente nos anos 90 que o modelo de monopólio estatal necessitou ser reestruturado.

Segundo Pereira (2000), enquanto monopólio do estado, as empresas do setor elétrico eram pagas pelo custo de serviço. Porém, durante todo os anos 80 e meados dos anos 90, o Brasil passou por uma forte crise econômica. Fazendo com que as tarifas que pagavam a setorelétrico fossem fixadas pelo governo de maneira a não apertar os índices de inflação, sem grandes preocupações com a condição financeira das empresas do setor naquele período.

Porém, vale destacar que a transformação institucional no setor elétrico brasileiro se incorporou meio a uma condição universal, onde se acreditava que os monopólios naturais do segmento energético haviam perpassando o ponto ótimo, perdendo a capacidade de entregar serviços de qualidade a custos menores.



Dessa maneira, um sistema concorrencial deveria ser implementado com a finalidade de obter a eficiência econômica na gestão do setor energético, garantindo a redução tarifária e o suprimento da demanda energética, por meio do aumento da capacidade instalada. No caso do Brasil, perante a escassez de divisas, a privatização foi encarada como uma forma de financiar o setor elétrico (BARROSO, 2014).

Para a elaboração de um ambiente concorrencial apropriado, o modelo pensado para o Brasil foi espelhado por países desenvolvidos, especialmente, o modelo inglês (BARROSO, 2014). No entanto, com necessidade para captar divisas, o modelo de privatização do setor elétrico no país não respeitou a ordem das propostas dos modelos em que se baseava, como por exemplo, destaca-se a desverticalização da indústria nas mãos do poder público, a elaboração de marco regulatório, de órgão regulador, e por último, a privatização do setor segmentos de geração, transmissão e distribuição (PINTO, 2009).

Nesse cenário discursivo, o Brasil a desverticalização e a privatização se deram ao mesmo tempo, enquanto a estrutura regulatória não tinha sido completamente definida. No entanto para regular o setor foi concebida a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que iniciou suas ações somente na década de 1997, quando as privatizações já haviam ocorrido.

Pinto (2009), diz que os formuladores da reforma Brasil, tiveram a adoção de ferramentas do mercado que exigia menor esforço por parte do governo federal no sentido de organização do sistema elétrico no país. As tarifas de energia seriam semelhantes ao custo marginal longo prazo da energia e, dessa forma, iriam viabilizar os investimentos essenciais no setor elétrico. No entanto, esta interpretação não garantia a estabilidade essencial para os preços, de forma que, os agentes pudessem organizar de forma adequada os investimentos para o crescimento da capacidade produtiva.

Dessa forma, as distribuidoras brasileiras eram obrigadas a contratar somente 85% da energia a ser entregue aos seus consumidores cativos, os outros 15% eram contratados no mercado livre, onde os preços variavam de forma constante. Dessa forma, quando os reservatórios se encontraram em níveis bem baixo devido à escassez de chuvas, o preço da energia no mercado de curto prazo aumentava de forma significativa (ALVES, 2016).

O Brasil conquistou uma importante experiência com a regulação das atividades das concessionárias para realização na área de eficiência energética. Além disto, a crise de energia teve uma espécie de aprendizagem pedagógica que disseminou informações e modificando alguns hábitos e práticas dos consumidores.

Nesse contexto, foi viável desenvolver instrumentos para garantir recursos públicos estáveis a promoção da eficiência energética de interesse da população e uma legislação para aprimorar a atuação dos equipamentos que consomem energia. Sendo esses os ingredientes necessários para um futuro próspero no que concerne a possibilidades reais de melhoramento na utilização de energia.

Contudo, não são segurança necessária para tal fim. Ainda requer de estudos mais aperfeiçoados no que se refere ao Planejamento Energético que viabilize a avaliação mais concreta do potencial de recursos de eficiência energética e os custos para explorá-lo.



Esses modelos de avaliações são ações comuns de processos de planejamento fundamentado em estratégias como o planejamento integrado de recursos (PEREIRA, 2000).

De acordo com Campos (2013), é importante organizar normas na direção de uma política para a Eficiência Energética. Com as reformas setoriais é ainda mais relevante a esclarecimento de políticas públicas que estruturam as atividades dos mais variados setores responsáveis pela eficiência energética, em especial a MME, MCT, ANEEL, empresas de energia, fabricantes de equipamentos e consumidores.

Portanto, este aumento nos preços ocorreu na iminência da crise de abastecimento, quando não existia mais tempo de proporcionar investimentos essenciais para a geração de energia. Desta forma, o negligenciamento da necessidade de uma organização maior para planejamento de investimentos no setor por parte do executivo, combinado com uma estruturação regulatória incipiente e as dificuldades do modelo em preservar a segurança do abastecimento.

3. METODOLOGIA

Este estudo resulta numa estrutura de pesquisa indireta, de particularidade bibliográfica, que se fundamenta na aplicação de referências teóricas já divulgadas para investigação e questão do problema. Quanto aos propósitos, discorre-se de uma pesquisa descritiva, em razão da preocupação principal a de discutir a seguinte temática: A Importância da Eficiência Energética no Setor Elétrico Brasileiro.

Foram realizadas pesquisas em sites e revistas eletrônicas que discorrem a temática de estudo. Dentro dessa demanda de conhecimentos, os artigos, periódicos e revistas na visão mais recente de debates sobre a Importância da Eficiência Energética no Setor Elétrico Brasileiro. Posteriormente as buscas efetuadas nos apropriados site e revistas foram discutidas, baseado em contestações para que assim se realize o desfecho da temática.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta parte do trabalho será evidenciado resultados acerca das literaturas investigadas assim como discussões, concepções e perspectivas sobre a eficiência energética no setor elétrico brasileiro. Diante dos levantamentos realizados evidenciou-se que o setor elétrico brasileiro vem passando por diversas transformações que buscam promover mais qualidade aos consumidores de maneira geral.

Nesta perspectiva, Alves (2016), aponta em seus estudos que em razão da de as empresas estatais sustentarem os aplicações necessárias, o setor elétrico brasileiro vem sendo objeto de um processo de transformações, desde a década de 90, ainda não concluído pelo fato de uma série de impasses políticos e organizacionais, com destaque na entrada da iniciativa privada e privatização dos ativos vigentes.



Tal condição é corroborada nos estudos de Barros (2012), o autor preconiza que essas transformações vêm sendo estimuladas na experiência internacional, sinalizada por políticas regulatórias objetivando difundir um ambiente competitivo na geração e comercialização de energia elétrica e adotar novas maneiras de regulação dos segmentos que encontram-se como monopólio natural, no que diz respeito a transmissão e distribuição.

Nesse contexto, compreende-se que a singularidade do caso brasileiro e dos países que estão desenvolvendo é que, além de visarem diminuir os custos de produção, expandir a eficiência energética e obter caminhos para a mitigação dos riscos ambientais, ou seja, as reformas do setor elétrico têm que alcançar imediatos resultados para as necessidades de crescimento dos sistemas elétricos.

Na literatura abordada por Sousa (2011), o setor elétrico brasileiro exterioriza peculiaridades que o distinguem de qualquer outro no contexto internacional. Pelo fato das inferências para o funcionamento do modelo. Dessa forma, o autor descreve as insuficiências e adversidades para a introdução de um ambiente competitivo no setor elétrico brasileiro desenvolvidos pela base geradora majoritariamente hidráulica, pela carência de sistema único de transmissão e pela forte centralização dos mercados regionais devido ao poder de mercado de empresas verticalmente incorporadas.

De acordo com Campos (2013), o modelo institucional estatal, elaborado na década de 60, conservou-se praticamente inalterável durante 30 anos. No decorrer desse período, o setor elétrico brasileiro apresentou notáveis taxas de expansão da oferta, fundamentada nas disponibilidades de autofinanciamento através de tarifas alinhadas com a inflação, recursos da União e financiamento externo. Contudo, foi a partir da década de 80, que despontou uma série de aspectos que causou a exaustão desse modelo, provocando a procura de alternativas.

Nos estudos de Pereira (2000), o curso das reformas do setor elétrico, cujo origem datano final da década de 90, baseia-se em um processo gradativo que só atingiu um caráter mais extensivo, consolidado e sistematizado a partir de 1997, quando foi elaborada uma série de políticas regulatórias, muitas dessas orientações eram oriundas da consultoria Coopers & Lybrand, através de vários parâmetros provisórios que iriam dar origem à Lei 9.648/98.

Segundo Alves (2016), o novo modelo organizacional foi estabelecido pela lei 9.427/96, que instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), e a lei 9.648/98, que estabeleceu, dentre outras coisas, as diretrizes de entrada, tarifas e organização de mercado. As transformações setoriais vêm acontecendo de forma concomitante à privatização de ativos federais e estaduais e, além da constituição da agência independente, que se baseiam-se em experiências internacionais.

Ainda de acordo com o autor acima, dois outros pontos relevantes na legislação da criação da Aneel que são a deliberação das atribuições dos órgãos que realiza o cumprimento da defesa da concorrência, instituindo regras para reprimir a concentração de mercado de maneira conectada com a Secretaria de Direito Econômico, e a previsão de convênios com agências estaduais, considerando o caráter descentralizado do setor elétrico brasileiro, para o gerenciamento e supervisão dos serviços e instalações de energia elétrica (LOPES, 2017).



Nesse contexto, Barroso (2014), enfatiza que a institucionalização da Aneel intentou complementar a ausência de uma organização setorial com autonomia para a efetivação do processo regulatório e para a arbitragem dos desacordos dele resultantes, consequência dos diferentes interesses entre Poder Concedente no caso o Estado, empresas que são os prestadores dos serviços e consumidores.

Em uma abordagem realizada por Mattos (2013), o autor diz que a concepção de modelação de privatização do setor elétrico apoiou-se em um processo gradualista tencionando, de maneira síncrona, diminuir a dívida pública e aprimorar a eficiência produtiva e a capacidade de investimento das empresas. Nesta perspectiva, Passos (2018), relata que o governo favoreceu a venda das empresas do segmento de distribuição por compreender que dificilmente seria capaz de atrair interessados para os ativos de geração.

Pinto (2009), contextualiza a seguinte questão de que pelo fato do forte poder de mercado das atuais incumbentes e da organização centralizada de operação do sistema elétrico brasileiro, a introdução da competição na geração e na comercialização simboliza um desafio bastante evidente. Com esta finalidade, o governo vem utilizando uma série de dispositivos, em especial a livre escolha do fornecimento de energia por parte de grandes consumidores.

Em conformidade com Barroso (2014), no que concerne ao segmento de geração, um dos principais mecanismos empregados tem sido o estímulo à entrada de novos agentes, através de duas mudanças regulatórias no recém-criado regime para reestruturar as relações econômicas no setor, principalmente que abrange os critérios de licitação para a criação de novas plantas e no status dos operadores de plantas de geração a serem privatizadas.

Porém de acordo com Mattos (2017), ao compreender que a simples entrada de novos agentes poderá não suprir, por si só, a ampliação da capacidade instalada na geração, a Aneel cogita reconsiderar a trajetória de flexibilização por ela elaborada. Para isto, deverá utilizar, nos próximos contratos de concessão, a compulsoriedade de acréscimos de capacidade instalada por parte dos novos concessionários privados, a exemplos de Furnas.

Nesse cenário, Alves (2016), destaca que as alterações no setor elétrico brasileiro encontram-se em uma etapa de transformação. Os principais alicerces do novo marco regulatório já foram constituídos, objetivando ao alcance do difícil objetivo de se harmonizar a promoção de um ambiente competitivo com a manutenção da coordenação do sistema elétrico. Nesse cenário, Macedo (2019), afirma que apesar da experiência internacional manifeste que essa possibilidade é viável, no caso do Brasil que lida ainda com o desafio adicional de se tratar de parque hidrelétrico e com necessidade de imediata ampliação, ainda não foram proferidos sinais regulatórios efetivos de como irá ser alcançada essa compatibilização.

Campos (2013), retrata que os custos do sistema, é incontestável e que o setor elétrico se favoreceu das possibilidades de aproveitamento das bases hídricas existentes, alcançando uma das tarifas de suprimento mais baixas do mundo. Entretanto, essas concepções se esgotaram e o novo potencial existente encontra-se longe dos centros de consumo, isto é, a região amazônica, e conseqüentemente, com elevados custos e perdas de transmissão resultantes de sua exploração.



De acordo com Sousa (2011), às adversidades motivadas pelas novas regras regulatórias, trata-se da problemáticas existentes para a entrada de produtores independentes, tanto de novas hidrelétricas quanto de novas térmicas com base no gás natural. Nesse contexto Queiroz (2018), diz que como não existe, na prática, competição entre as plantas hidrelétricas, os instrumentos de realocação de energia e o despacho centralizado terá que se harmonizar ao despacho sistematizado, o que não lhe concede autonomia decisória.

Ainda alicerçado no pensamento do autores acima, aquele que desenvolver térmicas inflexíveis com base no gás natural terá que concorrer com o sistema hídrico coordenado, em condições de mercado desvantajosos. Em síntese, como os geradores térmicos flexíveis atuarão como “apêndices” do sistema hídrico, a propensão é que somente os proprietários das hidráulicas se arrisquem a erguer esse tipo de usinas.

Nesse cenário discursivo, Pinto (2009), as transformações do setor elétrico brasileiro vêm sendo marcadas pela montagem de um mecanismo regulatório bastante semelhante ao utilizado na experiência internacional. Dessa forma, pode-se salientar a formação de uma agência independente e com autonomia para o exercício da missão regulatória e o estabelecimento de procedimentos de regulação da concorrência e de defesa dos consumidores cativos.

Deste modo, depreende-se que todos esses elementos tem concebido um processo de reformas bastante complexa e evolutiva, muito embora a significado do marco regulatório tenha progredido bastante nos últimos anos, aspirando conciliar a transição para um ambiente com maior competição concebível sem que haja implicação da coordenação operativa do sistema elétrico.

Alves (2016), ratifica que mesmo apesar dos esforços realizados, a eficiência no setor elétrico brasileiro encontra-se incompleta e precisa de desenvolvimento de concepções organizações e regulatórios para que se garanta a ampliação da capacidade geradora do sistema e, simultaneamente, sejam garantidas a exiguidade, a persistência, particularidade e a generalização dos serviços.

Campos (2013), destaca que os resultados da experiência internacional evidenciam a importância de se esquivar a concentração de mercado nas pontas de geração e comercialização do sistema e de se fomentar um sistema de transmissão independente. Nessa perspectiva, a continuação do processo de separação vertical das empresas envolvidas e de um aniquilamento de mercado de geração são tarefas relevantes para proporcionar um ambiente competitivo no longo prazo.

Ao final destas discussões, entende-se que a eficiência energética no setor brasileiro estar passando por diversas transformações, no entanto existe um cenário favorável que está associado a implementação de políticas públicas que busquem precedências, objetivose níveis de ação bem planejados.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que embora o Brasil desfrute de uma série esquemas para a promoção de eficiência energética no setor elétrico, os efeitos obtidos ainda estão longe do potencial que pode ser alcançado. Pesquisadores especificam que a ausência de coordenação é um dos motivos da inconsistência nos resultados conquistados.

O Brasil não detém linhas de financiamento diretas para que o consumidor final tenha bens mais eficazes ou promova as transformações necessárias em edificações de forma a economizar eletricidade. Ainda no intenção de proporcionar a conservação de energia é necessário um maior número de iniciativas para sensibilização da população. Conquanto o PBE e o Selo PROCEL simbolizem grandes progressos quanto a racionalização do consumo no País, os produtos mais eficientes energeticamente ainda tem preços bastante elevados que os com pior rendimento energético. A fim de definir esta questão, o governo poderia, por exemplo, diminuir de forma permanente o IPI dos produtos mais eficientes da linha branca.

No Brasil, a grande parte da demanda por eletricidade é suprida pela geração nacional. No entanto, existem adversidades para expandir a capacidade estabelecida do parque gerador sem prejudicar a modicidade tarifária, um dos alicerces da política energética nacional. Desta maneira, o desenvolvimento e melhoria das políticas para conservação de energia se posiciona como um direção para atender a questão da modicidade tarifária ao mesmo tempo em que não prejudica a capacidade de investimento no setor elétrico brasileiro.

Portanto, torna-se relevante que haja uma articulação entre os instituições de comando do setor com os Poderes Legislativo e Executivo, para pensar além da emergência e determinar o percurso que se deseja seguir quanto à matriz energética, as fontes internas e importadas, a organização e a estruturação do mercado e a responsabilidade pela garantia final de atendimento ao consumidor. Enfim este artigo buscou corroborar com outras temáticas e fomentar estudos mais aprofundados sobre o tema discutido neste trabalho.



REFERÊNCIAS

- ALVES, Ildo. **Um novo modelo para o setor elétrico brasileiro**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.
- BARROS, Ana Peixoto. **Análise dos benefícios da eficiência energética para o setorelétrico brasileiro**. Trabalho de conclusão de curso, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- BARROSO, Raimundo. **Eficiência energética**. *Revista Pretexto*, V. 12, São Paulo, 2014.
- CAMPOS, Flávia Marques. Governança e eficiência em empresas do setor elétrico brasileiro. *Revista Pretexto*, V. 16, N. 1, Rio de Janeiro. 2013.
- COSTA, Maria Lima. **A comercialização de energia no novo setor elétrico brasileiro**. São Paulo, 2016.
- CONFEA-Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia, 2018.
- LOPES, Marcos Santana. Desafios para o setor elétrico brasileiro. *Gestão & Produção*, v.02, Ed. Brasil, 2017.
- MATTOS, Antonio. O setor elétrico. *Revista De Ciências Sociais*, V. 02, São Paulo, 2017.
- MEIRELES, José Pardo. **Tendências tecnológicas do setor elétrico: Inovação tecnológica no setor elétrico brasileiro**, São Paulo, 2018.
- MACEDO, Roberto. Uma revisão histórica do planejamento do setor elétrico brasileiro. *Revista USP*, São Paulo, 2019.
- NETO, Regis Alvorada. **A conservação de energia elétrica no novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro, 2010.
- PEREIRA, Leandra. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. *Estudosavanzados*, V. 31, N. 89, Rio de Janeiro, 2000.
- PINTO, Carlos Fonseca. **A reforma do setor elétrico brasileiro e a questão da modicidade tarifária**. Ed. BRASIL, Vol, 02, São Paulo, 2009.
- PASSOS, Renato Jorge. **Estudo das principais políticas para melhoria da eficiência energética no setor elétrico**. 2018.
- QUEIROZ, Raimundo Pereira. **Setor elétrico brasileiro: uma aventura mercantil**.
- SANTOS, Helena Carvalho. O setor elétrico brasileiro: passado e futuro. *Revista De Ciências Sociais*, V. 12, São Paulo, 2015.
- SOUSA, José Marques Linhares. Desafios da reestruturação do setor elétrico brasileiro. *Revista De Ciências Sociais*, V. 10, São Paulo, 2011.
- VARGAS, George Torres. **A Reforma do setor elétrico brasileiro e a questão da modicidade tarifária**. Rio de Janeiro, 2019.

ORGANIZADORES

André Barros de Oliveira



Acadêmico em Engenharia Mecânica pela Universidade CEUMA, foi um dos fundadores da Liga Academia de Projetos Mecânicos (LAPROM), no qual ocupou o cargo de Vice-presidente (2017-2019). Foi membro do Projeto SAE-UniCeuma pelo curso de Engenharia Mecânica, participando do grupo de pesquisa em engenharia aeronáutica e aeroespacial (GPEAA), onde desempenhou função de Capitão do grupo de Aerodesign em 2018/2019, onde desenvolveu trabalhos na área da aviação, tais como, simulação computacional do desempenho de uma aeronave para competição SAE Brasil de aeromodelismo e Análise aerodinâmica de estruturas desenvolvidas em interface do software XFLR5, usando método de elementos de contorno, análise dinâmica, estabilidade e aeronáutica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5493-5563>

Patrício Moreira de Araújo Filho



Doutor e Mestre em Engenharia Mecânica, na área de Projetos e Materiais, pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Licenciado em Física pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa no Maranhão (FAPEMA), é Professor/pesquisador Adjunto na Universidade do CEUMA (UniCeuma), Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção, coordena o Projeto SAE-UniCeuma, Líder de grupo de pesquisa em engenharia aeronáutica e aeroespacial (GPEAA) e desenvolve atividades nas áreas de Engenharia: Pesquisa, Ensino e Extensão.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-7858>

A obra “Engenharia, produção científica e tecnológica” é uma série especialmente preparada para conter as produções científicas de graduandos de Engenharia da Universidade CEUMA. Neste segundo volume, concentramos estudos na área temática de Engenharia Mecânica, relacionando os temas aprovados em bancas de TCC e de maior relevância, critério este que marcou a harmonização e organização dos capítulos ao longo desta obra. Nestes, os autores enfocam sua sapiência e técnica que estão na vanguarda do desenvolvimento de educandos no ensino médio e universitário brasileiro.

ISBN: 978-65-86707-58-8

