

GILBERTO JOÃO PAVANI
(ORGANIZADOR)

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING

Atena
Editora
Ano 2022

GILBERTO JOÃO PAVANI
(ORGANIZADOR)

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING

Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Collection: applied mechanical engineering

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Bruno Oliveira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Gilberto João Pavani

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C697 Collection: applied mechanical engineering / Organizador
Gilberto João Pavani. – Ponta Grossa - PR: Atena,
2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-860-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.608220102>

1. Mechanical engineering. I. Pavani, Gilberto João
(Organizador). II. Título.

CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica aplica os princípios da engenharia, física e ciência dos materiais para a análise, projeto, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos como veículos, máquinas e ferramentas, requerendo a compreensão dos conceitos como automação, ciência dos materiais, cinemática, dinâmica, energia, mecânica dos fluidos, mecanismos, processos de fabricação, termodinâmica e vibrações com o auxílio de ferramentas computacionais para desenho e simulação.

A presente obra “Collection: Applied mechanical engineering” tem como objetivo a apresentação e a discussão de temas relevantes sobre a aplicação da engenharia mecânica na mensuração da criticidade na manutenção de equipamentos, análise de desempenho de indicadores de manutenção, análise de modo e efeito de falha para o desenvolvimento de um plano de manutenção, estudo cinemático das velocidades de um mecanismo genérico, avaliação da eficiência e utilização de ventiladores com motores eletrônicos em sistemas de ar condicionado industrial, desenho de mecanismo e estrutura para animatrônicos, estudo da posição de um mecanismo de quatro barras por meio de uma interface gráfica, modelo matemático para obter a componente axial da velocidade absoluta nos impulsores de turbocompressores centrífugos, mensuração do aumento de eficiência de produção e energia elétrica usando o pré-resfriamento para o ultracongelamento de pães, requisitos metrológicos, ondas de Lamb e métodos estatísticos para detecção do limiar de dano aplicado à estruturas de aeronaves e uso da visão por computador para identificação de circuitos integrados em placas eletrônicas.

Portanto, esta obra apresenta grande potencial para contribuir com o entendimento dos temas apresentados, podendo servir como referência valiosa para novas pesquisas e estudos sobre as questões aqui discutidas.

Agradeço aos autores dos capítulos por suas valiosas contribuições e desejo aos leitores sucesso em seus futuros trabalhos de pesquisa sobre os temas apresentados nesta obra.

Gilberto João Pavani

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

ANÁLISE DE CRITICADA DE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE CALHAS PLUVIAIS

Pierre Breno Nunes de Assis
Beatriz da Costa Lima
Claudecir Fernandes de Freitas Moura Júnior
Matheus Gomes Lima
Patric de Holanda Nogueira
Ramon Rudá Brito Medeiros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201021>

CAPÍTULO 2..... 16

ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS INDICADORES DE MANUTENÇÃO DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL DO VALE DO JAGUARIBE

José Guilherme Queiroz Sousa
Patric de Holanda Nogueira
James Rodrigo da Silva Lima
Luan Victor Diniz Campos
Ramon Rudá Brito Medeiros
George Luiz Gomes de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201022>

CAPÍTULO 3..... 28

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA PARA DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO PARA UM SISTEMA DE LIMPEZA E PINTURA EM EMPRESA DO SETOR AUTOMOTIVO

Vinícius Gomes Silva
Daniel Levi Maia Matos
João Víctor Nogueira Gonçalves
Gilvan Antônio Cappi
Ramon Rudá Brito Medeiros
George Luiz Gomes de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201023>

CAPÍTULO 4..... 42

APLICAÇÃO DIDÁTICA NO ESTUDO CINEMÁTICO DAS VELOCIDADES DE UM MECANISMO GENÉRICO DE QUATRO BARRAS

Vergara Hernández Erasto
Pérez Millán Brenda Carolina
Cea Montufar César Eduardo
Torres Torres Yael Valdemar

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201024>

CAPÍTULO 5..... 52

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E UTILIZAÇÃO DOS VENTILADORES COM MOTORES

ELETRÔNICOS (EC) - APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO INDUSTRIAL

Abimael J. Urcino Junior

Samuel Mariano do Nascimento

Eliandro Barbosa de Aguiar

Alexandre Fernandes Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201025>

CAPÍTULO 6..... 68

DISEÑO DE MECANISMOS Y ESTRUCTURA PARA EL ANIMATRÓNICO DEL DINOSAURIO TRICERATOPS

Roberto Carlos García Gómez

Hernán Valencia Sánchez

Juan Carlos Niños Torres

Mario Alberto Cruz Padilla

Fernando Alfonso May Arrioja

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201026>

CAPÍTULO 7..... 80

ESTUDO DA POSIÇÃO DE UM MECANISMO DE QUATRO BARRAS POR MEIO DE UMA INTERFACE GRÁFICA DE USUARIO

Vergara Hernández Erasto

Pérez Millán Brenda Carolina

Cea Montufar César Eduardo

Yael Valdemar Torres Torres

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201027>

CAPÍTULO 8..... 90

LA ECUACIÓN DE SEGUNDO GRADO COMO MODELO MATEMÁTICO PARA OBTENER LA COMPONENTE AXIAL (C_{2U}) DE LA VELOCIDAD ABSOLUTA EN LOS IMPULSORES DE LOS TURBOCOMPRESORES CENTRÍFUGOS

Tena Verdejo Juan

Santiago Gabino Francisco

Tena Galván Sandra Zulema

Oropeza Ramírez Salvador

Gutierrez Pola Marlenne

Ordoñez Tapia Mayanin

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201028>

CAPÍTULO 9..... 98

MENSURAÇÃO DO AUMENTO DE EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO E ENERGIA ELÉTRICA USANDO O PRÉ RESFRIAMENTO PARA O ULTRACONGELAMENTO DE PÃES

Leandro Fluvio Torno

Alexandre Fernandes Santos

Heraldo José Lopes de Souza

Sariah Torno

Darlo Torno

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6082201029>

CAPÍTULO 10.....	110
REQUISITOS METROLÓGICOS LEGAIS PARA MEDIÇÃO FISCAL APLICADOS A UNIDADES FLUTUANTES DE PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE PETRÓLEO (FPSO): CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	
Hélio Damásio de Lima Filho	
Jardel Dantas da Cunha	
Andréa Francisca Fernandes Barbosa	
Antônio Robson Gurgel	
Antonio Rodolfo Paulino Fernando Pessoa	
André Luís Novaes Motta	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010210	
CAPÍTULO 11	124
SHM BASEADO EM ONDAS DE LAMB E MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O LIMAR DE DETECÇÃO DE DANO APLICADO A ESTRUTURAS DE AERONAVES	
Lucas Altamirando de Andrade da Rocha	
Roberto Mendes Finzi Neto	
Valder Steffen Jr	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010211	
CAPÍTULO 12.....	138
VISIÓN POR COMPUTADORA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS	
Samuel Sotelo Martínez	
Raúl García García	
Rafael Ocampo Martínez	
Marco Antonio Olivo Flores	
Pablo Saúl Espinoza Aguirre	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010212	
CAPÍTULO 13.....	148
AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM CAVIDADES DIRIGIDAS COM USO DO DESIGN CONSTRUTAL	
Priscila Martta Rodrigues	
Cícero Coelho de Escobar	
Flávia Schwarz Franceschini Zinani	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.60822010213	
SOBRE O ORGANIZADOR.....	159
ÍNDICE REMISSIVO.....	160

ANÁLISE DE CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE CALHAS PLUVIAIS

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 12/11/2021

Pierre Breno Nunes de Assis

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE

<http://lattes.cnpq.br/3691882221162357>

Beatriz da Costa Lima

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE

<http://lattes.cnpq.br/2473935088143706>

Claudecir Fernandes de Freitas Moura Júnior

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE

<http://lattes.cnpq.br/9668230016482513>

Matheus Gomes Lima

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE

<http://lattes.cnpq.br/4294927555470926>

Patric de Holanda Nogueira

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE

<http://lattes.cnpq.br/6662228411932161>

Ramon Rudá Brito Medeiros

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE

<http://lattes.cnpq.br/2280452807088183>

RESUMO: É sabido que a mensuração da criticidade de um componente ou sistema permite que os gestores da manutenção possam executar

ações de eficácia mais elevada. As escolhas de técnicas e estratégias de manutenção são facilitadas quando o entendimento do nível de criticidade está bem estabelecido. Contudo, estabelecer parâmetros para determinar a criticidade de um equipamento não é simples. Alguns fatores como segurança, qualidade, impactos ambientais e econômicos, além de funções operacionais, são comumente aplicados como parâmetros de mensuração da criticidade. O objetivo do estudo consiste em realizar o levantamento de dados e avaliar a criticidade, por meio de uma metodologia sugerida pelo *Japan Institute of Plant Maintenance* modificada, dos equipamentos dentro do processo produtivo de calhas para canalização de chuva em uma metalúrgica de pequeno porte, localizada em uma cidade no Vale do Jaguaribe, Ceará. A linha de processo é composta por três equipamentos, sendo uma estiradeira, uma guilhotina e uma dobradeira. A criticidade mensurada deve ser aplicada a fim de indicar a técnica de manutenção mais adequada. Atualmente a empresa apenas aplicava manutenção corretiva. Contudo, o método proposto indica uma mudança para a técnica preventiva tanto na estiradeira como na dobradeira.

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção; Criticidade; Calhas.

CRITICAL ANALYSIS OF THE EQUIPMENT OF A RAIN GUTTER PRODUCTION LINE

ABSTRACT: It is known that measuring the criticality of a component or system allows

maintenance managers to perform actions with higher effectiveness. The choices of maintenance techniques and strategies are facilitated when the understanding of the criticality level is well established. However, establishing parameters to determine the criticality of equipment is not simple. Some factors such as safety, quality, environmental and economic impacts, in addition to operational functions, are commonly applied as criticality measurement parameters. The objective of the study is to carry out data collection and assess the criticality, through a modified methodology suggested by the Japan Institute of Plant Maintenance, of equipment within the production process of rain gutters in a small metallurgical plant, located in a city in Vale do Jaguaribe, Ceará. The process line consists of three pieces of equipment: a stretcher, a guillotine and a bending machine. The measured criticality must be applied in order to indicate the most adequate maintenance technique. Currently, the company only applied corrective maintenance. However, the proposed method indicates a change to the preventive technique in both the stretcher and the bending machine.

KEYWORDS: Maintenance; Criticality; Gutters.

1 | INTRODUÇÃO

Com a evolução dos meios produtivos e com as revoluções industriais, a manutenção surge como componente importante a ser analisado nas cadeias produtivas. Kardec e Nascif (2012) segregam a evolução histórica da manutenção, observando os objetivos e técnicas empregadas, em quatro gerações. A partir da análise evolutiva, pode-se afirmar que a manutenção subverteu seu caráter operacional e passou a representar um caráter estratégico nos meios produtivos, ou seja, compondo um papel essencial no funcionamento das linhas produtivas e nos resultados organizacionais (LIMA, 2021).

Portanto, pode-se afirmar, em outras palavras, que a manutenção atua como uma função estratégica quando aplicada a um sistema ou processo, agregando valor ao produto final. Isso se dá quando as empresas buscam, em seus departamentos de manutenção, resultados positivos de desempenho do sistema produtivo, garantindo, assim, ganhos de produtividade, qualidade e, conseqüentemente, redução de custos ligados à manutenção propriamente dita.

Segundo Figueiredo (2019), a quarta geração da manutenção pode ser caracterizada pelo aprofundamento e surgimento de novas técnicas de análise e gestão que visam aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos componentes e equipamentos. Nesse contexto surgem as técnicas de manutenção centrada em confiabilidade (MCC). Lima Júnior (2019) afirma que o principal objetivo da MCC consiste em garantir a perfeita funcionalidade dos componentes ou equipamentos tendo em vista a redução dos custos associados à manutenção, aumentando assim a confiabilidade e disponibilidade.

Também conhecida por RCM - *Reliability Centered Maintenance* - essa técnica visa determinar o que deve ser feito em um processo para assegurar que qualquer ativo que o constitui continue em pleno funcionamento, realizando corretamente as operações que lhe foram previamente designadas. Para tanto, analisa-se as funções e padrões de

desempenho do sistema, ou seja: de que forma ocorre a falha, o que causa cada falha, o que acontece quando ocorre a falha e o que deve ser feito para preveni-la.

Para Marques et al. (2006) o nível de criticidade de um equipamento pode ser definido pelo grau de complexidade na manutenção das avarias ou pela dificuldade de acesso para eventual ação corretiva. Helmann (2008) denota a importância de mensurar os níveis de criticidade, que expressam a relevância de cada equipamento dentro do processo produtivo, levando em consideração fatores como segurança, qualidade, impactos ambientais e econômicos, além de funções operacionais.

A correta classificação da criticidade de um componente ou sistema permite que os gestores da manutenção possam executar ações de eficácia mais elevada. Dentre essas ações está a escolha das técnicas de manutenção mais adequadas para cada equipamento visando a otimização da distribuição dos recursos e a conseqüente diminuição dos custos envolvidos no processo de manutenção (MICHELON, 2019).

A problemática deste trabalho trata da produção de calhas para canalização de chuva em uma metalúrgica de pequeno porte, localizada em uma cidade no Vale do Jaguaribe, Ceará. Tal processo produtivo é dividido, basicamente, em três etapas, sendo elas as operações de estiramento, corte e dobramento, respectivamente.

Haja vista que se trata de uma empresa de pequeno porte e de recente inserção no mercado, é perceptível a presença de alguns problemas relacionados, principalmente, ao setor de manutenção. Destacam-se, em especial, questões relacionadas à falta de aplicação de metodologias de manutenção de qualidade, a julgar pelas falhas potenciais e funcionais decorrentes do desalinhamento, afiação do corte e material utilizado na matriz do dobramento, acarretando, assim, em perdas consideráveis de produtividade ao longo do processo de fabricação das calhas.

Levando-se em consideração a atual situação da empresa, é de imprescindível importância que seja estabelecido o nível de manutenção de todo o processo. Além de avaliar o grau de criticidade que cada equipamento possui dentro do processo produtivo, é necessário a implementação de políticas de manutenção adequadas e eficientes (MELLO NETO, PERES E CARDOSO, 2011). Uma vez que o empreendimento faz uso somente de manutenção corretiva, a implementação dessas políticas surge como um caminho a se seguir, objetivando-se a implementação da manutenção preventiva. De acordo com Mello Neto, Peres e Cardoso (2011, p. 2):

O método de manutenção a ser empregado, para que a integração com o negócio seja efetiva, deverá ser formado por um conjunto de passos bem definidos, os quais precisam ser seguidos de forma rigorosa para responder às solicitações dos diversos processos e garantir os objetivos desejados, bem como mostrar resultados ao corpo diretor da empresa.

Diante disso, o presente trabalho objetiva fazer um levantamento dos dados da metalúrgica em questão, com a finalidade de determinar a criticidade dos equipamentos

e definir estratégias de manutenção adequadas. Além disso, visa criar um plano de ação para otimizar o processo, a fim de aumentar a produtividade e reduzir os custos inerentes à fabricação das calhas, pois verificou-se que, paradas na produção resultaram na não fabricação de, em média, 25 calhas. Isso evidencia, portanto, a importância da implementação de uma metodologia de manutenção de qualidade.

A divisão dos conteúdos desse trabalho se dá da seguinte forma: o tópico 2 apresenta definições e explicações sobre os principais termos utilizados ao longo do trabalho, o tópico 3 aborda a metodologia aplicada para resolução do problema em questão, o tópico 4 apresenta os resultados obtidos e suas discussões, o tópico 5 expõe algumas conclusões e considerações finais e, por fim, o tópico 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas para produção do trabalho.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Engenharia e gestão de manutenção

Atualmente, com o aumento da produtividade, a forma como é vista a manutenção tem mudado e isto se deve ao fato da crescente demanda na produção e pelo aumento da competitividade no mercado. Portanto, é desejável que os equipamentos possuam a maior disponibilidade possível, ou seja, o maior tempo operante (MARQUES et al., 2006). Para tanto, um plano de manutenção deve ser pensado e executado de forma ótima, a fim de ter as menores perdas possíveis, reduzindo as paradas para manutenção e, conseqüentemente, aumentando a produtividade.

Segundo Marques et al. (2006), a engenharia de manutenção trata de evitar apenas a ação de conserto de forma contínua de equipamentos quando ocorrida a falha. No lugar disso, deve-se buscar os problemas básicos que causam a falha, de forma que minimize a convivência com problemas habituais de baixo desempenho para desenvolver manutenibilidade.

Várias são as maneiras de classificar os métodos de manutenção existentes e Lima (2000) faz essa classificação dividindo a manutenção em planejada e não-planejada. A manutenção planejada pode ser definida por atividades que têm o objetivo de detectar, prevenir ou mesmo reduzir erros e falhas em equipamentos. Portanto, a ideia é tentar eliminar, ao máximo, ações de manutenção não programadas, ou seja, imprevistos ou mesmo problemas maiores. Já a manutenção não-planejada consiste na correção de uma falha após esta ter ocorrido. Devido a esse fato, perdas de produção, de qualidade do produto e maiores custos com manutenção, por exemplo, podem ser acarretados. Dentre os vários tipos de manutenção existentes, pode-se dividir em três tipos principais: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

De acordo com a norma ABNT NBR 5462 (1994), manutenção corretiva é a "Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em

condições de executar uma função requerida”. Ou seja, é o tipo de manutenção executada após a falha do equipamento ou quando se nota que seu desempenho está menor que o esperado, objetivando fazer a substituição do mesmo ou reparar danos para que volte às condições normais de trabalho.

Já a manutenção preventiva, segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), é definida como “Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”. Portanto, consiste, basicamente, em um controle sobre falhas baseado em tempo e volume de uso, de maneira que seja definido um período de tempo para substituição. Em outras palavras, a manutenção preventiva visa obedecer a um plano de manutenção previamente elaborado, o qual é baseado no monitoramento de equipamentos e processos, estabelecendo intervalos definidos de tempo para troca de componentes para que o equipamento continue funcionando plenamente.

Por fim, a manutenção preditiva é definida como “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” (ABNT NBR 1562, 1994). De forma simples, essa manutenção trata da realização de ensaios, a fim de determinar se o maquinário está próximo ou não da falha, de maneira que seja reduzida a possibilidade de manutenção corretiva, quando necessário. Através da coleta de dados e análise dos mesmos, torna-se possível prever a deterioração dos equipamentos, antecipando possíveis falhas funcionais ou consequências delas. Dentre as variáveis que podem ser utilizadas para coleta dos dados, pode-se citar: temperatura, vibração, análises físicas e químicas. Além da nomenclatura mais usual, a manutenção preditiva também é conhecida como Manutenção sob Condição ou Manutenção com Base no Estado do Equipamento (Kardec, 2009).

2.2 MCC E FMECA

A manutenção centrada em confiabilidade (MCC), também conhecida como *Reliability Centered Maintenance* (RCM), surgiu em meados de 1970 e uma de suas primeiras aplicações foi para suprir a necessidade de certificar a nova linha de aeronaves Boeing 747. À medida que se disseminava no setor industrial, passou a assumir novas características e, atualmente, a MCC pode ser definida como uma política de manutenção estruturada para selecionar as atividades de manutenção necessárias para manter a disponibilidade e confiabilidade de qualquer processo produtivo, de modo que se reduza ao máximo o LCC (*Life Cycle Cost* ou Custo do Ciclo de Vida do Ativo).

Fogliatto e Ribeiro (2009), trazem outra definição para esse conceito. Para eles, a MCC pode ser definida como um programa que reúne várias técnicas de engenharia para assegurar que os equipamentos de uma planta fabril continuarão realizando as funções

especificadas. À vista disso, a aplicação da MCC permitiu a várias empresas alcançar a excelência nas atividades de manutenção, haja vista que a disponibilidade dos equipamentos aumentou e os custos associados a fatores como acidentes, defeitos e reparos em equipamentos e substituições de peças, por exemplo, reduziram consideravelmente.

Portanto, essa técnica é utilizada para determinar os requisitos de manutenção de qualquer item físico no seu contexto operacional. Através da análise de funções e padrões de desempenho, determina-se o que é esperado de cada equipamento, as funções que ele deve cumprir e o padrão de desempenho que deve ser mantido durante toda sua vida útil. Além dessa análise, outras questões básicas devem ser contempladas quando se deseja aplicar a MCC: identificação dos modos de falha do equipamento (como ele pode falhar cumprindo sua função), identificação das causas de falha funcional, as consequências da ocorrência de uma falha, de que forma a falha interessa (quando ocorre, o quanto afetará a organização) e, baseado nas possíveis consequências das falhas, o que deve ser feito para preveni-las. Realizando um apanhado geral de todas essas análises, com a aplicação da MCC é possível definir a melhor forma de realizar a manutenção com o intuito de prevenir a falha ou, pelo menos, minimizar as perdas decorrentes dela.

Entretanto, para implementar a estratégia de MCC é fundamental aplicar a técnica de FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* ou Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos). Essa é uma técnica de confiabilidade e, segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), possui 3 objetivos principais: (i) reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo, (ii) identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas, e (iii) documentar o estudo, criando um referencial técnico que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo.

A FMEA é uma técnica mais ligada ao aspecto qualitativo, fornecendo informações que servem, basicamente, para chamar a atenção relativa aos modos de falha com efeitos importantes ao nível da severidade, capacidade de detecção, manutenibilidade e segurança (PEDROSA, 2014). Diante disso, algumas variantes desse método que apresentam aspectos mais abrangentes surgiram. Entre eles, pode-se citar a FMECA.

A FMECA (*Failure Modes effects and criticality analysis*), trata da análise dos modos, efeitos e criticidades das falhas. Diferentemente da FMEA, a FMECA inclui o que se denomina como análise crítica (CA - *Critically Analysis*), que é um método quantitativo utilizado para classificar os modos de falha, considerando, também, suas probabilidades de ocorrência. Ou seja, a FMECA pode ser tratada como uma extensão da FMEA, pois, além de fornecer as mesmas informações obtidas pela metodologia FMEA, proporciona ainda informações quantitativas ou dados capazes de serem mensuráveis.

A análise de criticidade proporcionada pela FMECA permite atribuir um grau de importância a cada um dos modos de falha identificados pelo FMEA, classificando-os em: (i) crítico, (ii) potencialmente crítico ou (iii) não crítico (PEDROSA, 2014). Portanto, pode-se estimar quantas vezes cada componente do sistema irá falhar, usando o histórico de

falhas reais, para, em seguida, calcular quantas vezes todo o sistema irá falhar. Ademais, com esses dados é possível identificar quais componentes ou equipamentos tendem a ser menos confiáveis, necessitando de monitoramento mais frequente e da elaboração de um plano de manutenção adequado, permitindo a plena aplicação da MCC, e, por consequência, aumentando a confiabilidade dos equipamentos ou sistemas analisados.

2.3 Calhas de drenagem pluvial

De acordo com a norma ABNT NBR 10844 (1989), a calha pode ser definida como “canal que recolhe a água de coberturas, terraços e similares e a conduz a um ponto de destino”. Em relação às suas características geométricas, as calhas podem ser classificadas em: calha de beiral, calha de platibanda, calha chalés ou calha água-furtada. De acordo com Silva (2016), as características das calhas irão variar de acordo com alguns critérios, dentre os quais pode-se citar o tipo da telha, a queda d’água, o comprimento e a estrutura do local. Entre suas principais aplicações estão a proteção contra alguns agentes como umidade excessiva, mofo, apodrecimento e alagamentos, haja vista que as calhas, como já mencionado, recolhem a água de um local e conduzem para outro destino, evitando danos severos.

Além das várias características descritas anteriormente, os materiais mais utilizados na fabricação de calhas são aço galvanizado, folhas-de-flandres, chapas de cobre, aço inoxidável, alumínio, PVC rígido, fibra de vidro e concreto ou alvenaria. Já os aspectos relacionados ao dimensionamento podem ser consultados com maior detalhe na norma NBR 10844 de 1989.

Quanto à fabricação, três etapas básicas são seguidas: estiramento, corte e dobramento. Para a primeira operação, a matéria prima que será utilizada é fornecida no formato de bobinas, as quais podem ser comercializadas com uma massa de 200 kg ou até superior. Em seguida, as chapas que constituem as bobinas são posicionadas em uma estiradeira. Esse equipamento pode ser automático ou semiautomático e, após posicionar as chapas sobre ele, deve-se definir as especificações das calhas para que o processo seja iniciado.

O estiramento conduz as chapas até uma guilhotina e o processo de corte em diferentes tamanhos é realizado, estando essa etapa relacionada às dimensões da máquina utilizada. A depender do equipamento, as estiradeiras podem apresentar diferentes dimensões, como é o caso de alguns modelos automáticos, que podem produzir calhas com até 15 metros de comprimento. Por fim, na etapa de dobramento, uma máquina de sistema hidráulico, conhecida como dobradeira, inicia o trabalho de dar forma ao material, de modo que após definidos os parâmetros para o modelo que se deseja fabricar, vários dobramentos são realizados e a calha é formada.

3 I METODOLOGIA

A avaliação da criticidade dos equipamentos envolvidos na linha de produção do presente estudo terá como base a metodologia proposta pelo *Japan Institute of Plant Maintenance* - JIPM (1995). Essa metodologia leva em consideração parâmetros de mensuração da criticidade (Tabela 1) e um algoritmo de decisão (Figura 1). Os parâmetros de mensuração da criticidade foram modificados para melhor se adequar ao processo produtivo em foco.

CRITICIDADE				
SIGLAS	PARÂMETROS	ALTA (A)	MÉDIA (B)	BAIXA (C)
SA	Segurança e Meio Ambiente	Acidentes pessoais, agressões ao meio ambiente e danos materiais	Exposição a riscos de acidente ao meio ambiente ou do patrimônio	Nenhum Risco
QP	Qualidade e Produtividade	Produtos com defeito, redução da velocidade e da produção	Variação da Qualidade ou da Produtividade	Não afeta
OP	Oportunidade de Produção	Cessa todo o processo	Cessa parte do processo	Não afeta
TO	Taxa de Ocupação	24 horas por dia	Dois turnos ou horário administrativo	Ocasionalmente ou não faz parte da linha de produção
FF	Frequência de Falha (falha / mês)	$FF > 10$	$10 \geq FF > 3$	$FF \geq 3$
MT	Mantenabilidade (MTTR)	$MTTR \geq 1 \text{ h}$	$1 \text{ h} > MTTR \geq 30 \text{ min}$	$MTTR < 30 \text{ min}$

Tabela 1: Parâmetros de Mensuração da Criticidade

Siqueira (2009) define cada uma das classes de criticidade apresentadas pelo JIPM da seguinte forma:

- Classe A: Equipamento altamente crítico, sendo fundamental uma política de manutenção preventiva com o uso de técnicas preditivas e preventivas, focadas na redução de falhas e custos utilizando metodologias de manutenção centrada na confiabilidade (MCC) ou análise do modo, efeito e criticidade das falhas (FMECA);
- Classe B: Equipamento importante ao processo, sendo aceitável a utilização de técnicas de manutenção preventivas. Deve ser incorporado ao processo equi- pes para melhoria e análise das falhas;
- Classe C: Equipamento com baixa relevância ou impacto ao processo, seguindo o uso das técnicas de manutenção corretiva planejada. Realiza-se o monitoramento das falhas focando na redução das recorrências.

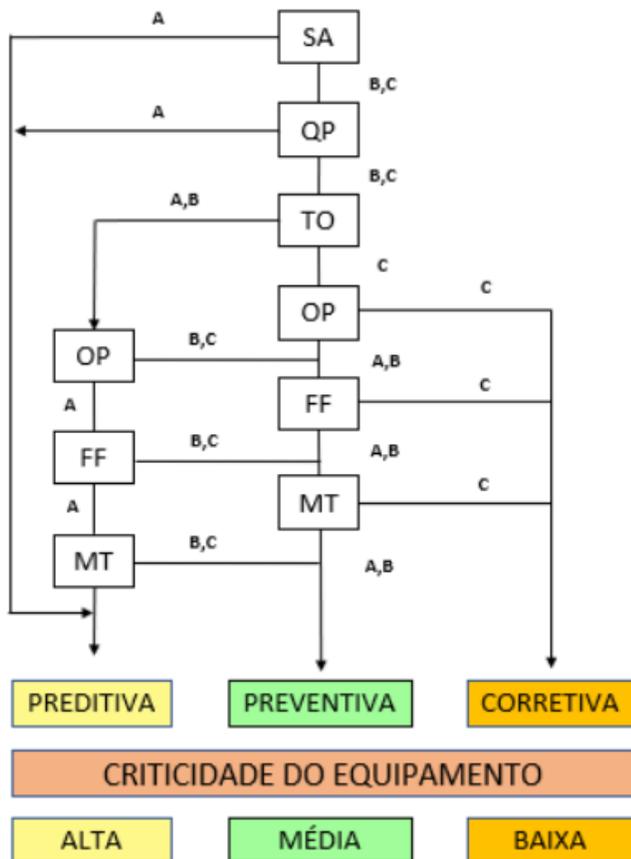


Figura 1: Fluxograma de Decisão para a Criticidade

Portanto, após a análise dos parâmetros e da decisão do nível de criticidade de cada equipamento, um plano de ação será traçado a fim de definir o tipo de manutenção mais adequada. Ademais, o plano deve contemplar também sugestões de mudança operacional e/ou de maquinário visando a redução do custo de refugo e retrabalho. As medidas serão selecionadas tendo em vista uma relação melhoria/esforço maximizada, dado que a pequena empresa detém um poder financeiro bastante limitado.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo a versão modificada da metodologia proposta pelo JIPM (Tab. 1) o nível de criticidade foi avaliado em cada equipamento da linha de produção. A Tabela 2 apresenta a classificação em cada quesito da análise de criticidade e o tipo de manutenção sugerido para a estiradeira, com base no fluxograma de decisão (Fig. 1). Os principais problemas observados neste equipamento estão relacionados à falta de alinhamento

durante o processo de estiramento das bobinas, que contém a matéria prima de fabricação das calhas. Este problema acarreta a dificuldade de obtenção de perpendicularidade na seção de corte, gerando cortes fora do padrão e, conseqüentemente, refugo de calhas. Portanto, o mecanismo de alinhamento demonstra-se ineficiente. Além disso, o sistema de alinhamento provoca também deformações laterais nas chapas podendo deteriorar o acabamento final da peça. Tendo em vista a forma de operação e os principais problemas, a análise dos critérios de criticidade é realizada.

Com base nos problemas, pode-se concluir que a estiradeira apresenta baixos riscos ambientais e de acidente. Portanto, o critério de segurança e meio ambiente foi classificado como de baixa criticidade. Posteriormente, partindo para a análise de qualidade e produtividade, denotamos que a falta de esquadro juntamente com a deformação lateral das chapas, podem prejudicar a produtividade e a qualidade do produto final. Portanto, concluiu-se que a estiradeira, no quesito produtividade e qualidade, apresenta uma criticidade média.

A criticidade do quesito de oportunidade de produção foi definida como alta tendo como perspectiva que o ciclo produtivo é curto e fortemente interligado, ou seja, o tempo de processamento em cada equipamento é pequeno e, portanto, são altamente interdependentes. Já a criticidade relacionada à taxa de operação está diretamente ligada ao período de tempo em que os equipamentos estão em funcionamento. Haja vista que a empresa pratica um regime de trabalho de oito horas diárias, a criticidade desse quesito foi definida como média.

Com base nas observações, notou-se que a frequência média de falha da estiradeira era inferior à uma falha mensal. Portanto, no quesito frequência de falha, a estiradeira apresenta uma criticidade baixa. Além disso, com vistas ao histórico, percebeu-se que o tempo médio para reparar as falhas era de 45 minutos. Assim, pode-se concluir que, no quesito manutenibilidade, a estiradeira apresenta uma criticidade média.

Tomando a definição da criticidade de cada quesito justificada anteriormente, o diagrama de decisão para a estiradeira é aplicado (Fig. 1). É possível concluir que, de maneira geral, a estiradeira apresenta uma criticidade média nesse processo produtivo, logo, a modalidade de manutenção sugerida é a manutenção preventiva.

Estiradeira				
Parâmetros de Criticidade	Qualitativo	SA	C	Preventiva
		QP	B	
		OP	A	
		TO	B	
	Quantitativo	FF	C	
		MT	B	

Tabela 2: Análise de Decisão de Criticidade da Estiradeira

De forma similar, a Tabela 3 apresenta a classificação para cada quesito sugerido e a escolha do tipo de manutenção para a guilhotina, que pode ser obtido por meio do caminho proposto pelo fluxograma na Figura 1. O principal problema encontrado neste equipamento está relacionado à sua afiação, pois durante o processo de fabricação de calhas a guilhotina tem a função de realizar a separação das peças que estão sendo produzidas. Portanto, mediante seu objetivo no processo, a falta de afiação fará com que o material apresente pequenas deformações nas bordas onde acontece o corte, saindo de forma imperfeita e, então, necessitando ser substituído posteriormente.

Mediante o exposto, pode-se concluir que este equipamento apresenta baixos riscos quanto ao ambiente e a segurança e, portanto, neste quesito foi definido como de baixa criticidade. Seguidamente, partindo para a análise de qualidade e produtividade, observou-se que o problema devido à falta de afiação acarretaria na variação de qualidade e produção, devido ao desgaste da ferramenta. Desta forma, foi concluído que a guilhotina, quanto ao parâmetro de produtividade e qualidade, apresenta criticidade média.

De forma análoga à operação de estiramento, a criticidade do quesito de oportunidade de produção foi definida como alta tendo como perspectiva que o ciclo produtivo é curto e fortemente interligado, ou seja, o tempo de processamento em cada equipamento é pequeno e, portanto, são altamente interdependentes. De forma similar, as mesmas considerações em relação à taxa de operação podem ser feitas, por estar diretamente ligada ao período de tempo em que os equipamentos estão em funcionamento. Tendo em vista que a empresa pratica um regime de trabalho de oito horas diárias, a criticidade desse quesito foi definida como média.

Com base nas observações, notou-se que a frequência de falha média da guilhotina era, aproximadamente, igual à duas falhas mensais. Então, no quesito frequência de falha, a estiradeira apresenta uma criticidade baixa. Além disso, com vistas ao histórico observou-se que o tempo médio para sanar as falhas era de 15 minutos. Diante disso, pode-se concluir que, no quesito manutenibilidade, a estiradeira apresenta uma criticidade baixa.

Tomando a definição da criticidade de cada quesito justificada anteriormente, o diagrama de decisão para a guilhotina é aplicado (Fig. 1) e conclui-se que, de modo geral, este equipamento apresenta uma criticidade baixa nesse processo produtivo e, assim, a modalidade de manutenção sugerida é a manutenção corretiva.

Guilhotina				
Parâmetros de Criticidade	Qualitativo	SA	C	Corretiva
		QP	B	
		OP	A	
		TO	B	
	Quantitativo	FF	C	
		MT	C	

Tabela 3: Análise de Decisão da Criticidade da Guilhotina

De forma análoga, a Tabela 4 apresenta a classificação para cada quesito de criticidade sugerido e a escolha do tipo de manutenção para a dobradeira, obtido por meio do fluxograma de decisão (Fig. 1). A falha principal nesse equipamento está relacionada ao desarranjo do gabarito de dobra. Essa falha se caracteriza pela não uniformidade dimensional no processo de dobramento, em decorrência de deslocamento ou má posicionamento, e/ou também pela fratura do gabarito que é fabricado em madeira. Baseando-se na forma de operação e nos principais problemas, a análise dos critérios de criticidade é realizada.

Tendo em vista a potencial fratura do gabarito, pode-se concluir que a dobradeira expõe o operador a riscos de acidente. Portanto, o critério de segurança e meio ambiente foi classificado como de média criticidade. Além disso, dado que o eventual deslocamento do gabarito pode acarretar conformação incorreta e não uniformidade dimensional, define-se a criticidade para o quesito produtividade e qualidade como sendo média.

Ademais, a criticidade do quesito de oportunidade de produção foi definida como alta tomando como base as mesmas considerações descritas anteriormente. De forma análoga, as mesmas considerações em relação à taxa de operação podem ser feitas e, com isso, a criticidade no quesito taxa de operação é definida como média.

Com base nas observações, notou-se que a frequência média de falha da dobradeira era de 19 falhas mensais. Portanto, no quesito frequência de falha, a dobradeira apresenta uma criticidade alta. Além disso, com vistas ao histórico, avaliou-se que o tempo médio para sanar as falhas era de 15 minutos. Assim, pode-se concluir que, no quesito manutenibilidade, a dobradeira apresenta uma criticidade baixa.

Tomando a definição da criticidade de cada quesito justificada anteriormente, o diagrama de decisão para a dobradeira é aplicado (Fig. 1) e conclui-se que, de maneira geral, a dobradeira apresenta uma criticidade média nesse processo produtivo e, portanto, a modalidade de manutenção sugerida é a manutenção preventiva.

Dobradeira				
Parâmetros de Criticidade	Qualitativo	SA	B	Preventiva
		QP	B	
		OP	A	
		TO	B	
	Quantitativo	FF	A	
		MT	C	

Tabela 4: Análise de Decisão da Criticidade da Dobradeira

5 I CONCLUSÃO

Conforme a estratificação dos dados adquiridos, a análise proposta da criticidade indica técnicas de manutenção distintas daquelas adotadas atualmente na empresa. Apesar de realizadas ações de manutenção do tipo corretiva, faz-se necessário uma reformulação no plano de manutenção vigente de dois dos equipamentos presentes na planta fabril da

empresa analisada, a estiradeira e a dobradeira.

De acordo com o fluxograma e a tabela de criticidade, nota-se que esperar que a falha ocorra para só então realizar a substituição de componentes nas máquinas de trabalho, como é realizado atualmente na empresa, não se caracteriza como o método mais eficaz de manutenção. Essa conclusão foi obtida levando em consideração fatores como segurança, produção, horas de trabalho e taxa de falha e, portanto, um plano de ação adequado às necessidades do sistema produtivo deve ser elaborado e efetivado para aumentar a disponibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, contribuir para o aumento de produtividade.

Dentre as características de um plano de manutenção preventiva, pode-se destacar o monitoramento dos equipamentos ainda em pleno funcionamento para avaliar suas condições e, assim, detectar sinais de desgastes e outras avarias, realizando a intervenção e aplicando técnicas de manutenção condizentes antes da ocorrência de falhas. Apesar dos custos associados à elaboração de um plano de manutenção, a empresa terá muitos benefícios. Para a metalúrgica analisada, realizando, por exemplo, a substituição do material dos gabaritos por um mais resistente e adotando técnicas de fixação apropriadas, provavelmente haverá redução de falhas durante o dobramento, produzindo calhas mais uniformes. Isso aumentaria a produtividade da empresa e reduziria os desperdícios com matéria prima, devido à conseqüente redução na quantidade de refugo ou retrabalho nas calhas defeituosas.

É importante destacar que o banco de dados apresentado pela empresa, contendo as principais falhas e suas causas, era bastante limitado e não seguia uma formatação padronizada, resultando em grande dificuldade para a produção do presente trabalho. Logo, é aconselhável uma melhoria no banco de dados responsável pelo armazenamento das informações relativas às operações de manutenção, a fim de facilitar análises futuras.

Como explicado em momentos anteriores, metodologias como FMEA e FMECA são exemplos simples de serem aplicados e que podem acarretar em conseqüências positivas e importantes para a empresa. Ou seja, um plano de manutenção bem elaborado e implementado pode impactar fortemente uma empresa de pequeno porte e recém inserida no mercado, contribuindo para a melhoria da excelência de serviços e qualidade dos produtos fabricados, bem como reduzindo os custos com manutenção e garantindo maior disponibilidade dos equipamentos constituintes do processo de produção de calhas. Diante disso, pode-se concluir que o presente estudo foi capaz de alcançar os objetivos previamente definidos, contribuindo para o engrandecimento dos autores em relação aos conhecimentos relativos à manutenção de equipamentos industriais e apresentando a empresas de pequeno porte alternativas de crescimento associadas às operações de manutenção.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, p. 7. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10844: Instalações prediais de águas pluviais**. Rio de Janeiro, p. 2. 1989.

Calhas e rufos: entenda as diferenças entre os dois materiais. Construct. Disponível em: <https://constructapp.io/pt/tudo-sobre-calhas-e-rufos/#:~:text=Normalmente%2C%20as%20calhas%20s%C3%A3o%20produzidas,aspectos%20do%20local%20de%20instala%C3%A7%C3%A3o> Acesso em: 29 mar. 2021, às 21:40

FIGUEIREDO, Ellan Pessoa. **Desenvolvimento de um sistema de gestão de equipamentos médico-hospitalares e leitos para estabelecimentos de assistência à saúde**. 2019. 70 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Biomédica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 1. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2009. 288 p. ISBN 8535233537.

HELMANN, Kurtt Schamne. **Uma sistemática para determinação da criticidade de equipamentos em processos industriais baseada na abordagem multicritério**. 2008. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2008.

Japan Institute for Plant Maintenance (JIPM). **600 Forms Manual**. Japão, 1995.

KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção: função estratégica**. 5. ed. [S. l.]: Qualitymark, 2012. 584 p. ISBN 8541403629.

LIMA, Rayane Araújo. **Aplicação do método FMEA para revisão das estratégias de manutenção de equipamentos médicos adotadas em um hospital**. 2021. 121 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

LIMA, R.S. **TPM: Total Productive Maintenance**. Curso de Formação de Multiplicadores. Belo Horizonte: Advanced Consulting & Training, 2000.

LIMA JÚNIOR, Djalma Rodrigues. **Manutenção centrada na confiabilidade**. 2019. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

Linhas de Produtos do Grupo Pizzinatto. Grupo Pizzinatto. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/emp/p/grupo-pizzinato> 14001 1 Acesso em: 29 mar. 2021, às 21:32

MARQUES, Armando; MARÇAL, Rui Francisco Martins; BARRETO NETO, Aurélio Azevedo; PILATTI, Luiz Alberto. Os principais equipamentos utilizados nas empresas de beneficiamento de mármore e granito, suas funções e importância no processo. **Anais do XIII SIMPEP**, Bauru, 2. sem. 2006. Supl. 1. Trabalho apresentado no XIII SIMPEP, 2006, [Bauru, SP].

MELLO NETO, Francisco de Castro; PERES, Mayara Lima; CARDOSO, Idelcio Alexandre Palheta. Os principais equipamentos utilizados nas empresas de beneficiamento de mármore e granito, suas funções e importância no processo. **Anais eletrônicos do encontro nacional de engenharia de produção**, Belo Horizonte, 16. ed. 2. sem. 2011. Supl. 1. Trabalho apresentado no XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2011, [Belo Horizonte, MG].

MICHELON, Éden Carlos. **Gestão da Manutenção: Análise da criticidade em equipamentos de uma indústria no sudoeste do Paraná**. 2019. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019.

PEDROSA, Bruno Miguel Martins. **Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) aplicada a um Secador Industrial**. 2014. 98 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.

SILVA, Milena do Vale. **Plano de Negócio de uma Empresa de Fabricação de Calha– Estudo de Caso**. 2016. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gerenciamentos de Obras) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SIQUEIRA, Iony Patriota. **Manutenção centrada na confiabilidade**: Manual de implantação. [S. l.]: Qualitymark, 2005. 408 p. ISBN 8573038802.

ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS INDICADORES DE MANUTENÇÃO DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL DO VALE DO JAGUARIBE

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 22/11/2021

José Guilherme Queiroz Sousa

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/5219521574001756>

Patric de Holanda Nogueira

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/6662228411932161>

James Rodrigo da Silva Lima

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/0700503794613591>

Luan Victor Diniz Campos

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/4695686704607228>

Ramon Rudá Brito Medeiros

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/2280452807088183>

George Luiz Gomes de Oliveira

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/5850293899287238>

isso, não basta ter apenas instrumentos de produção, é de suma importância que eles sejam utilizados de forma racional e produtiva, assim a manutenção surge com o intuito de contribuir para o melhor aproveitamento dos equipamentos e por conseguinte alavancar os resultados da empresa. Nesse sentido, os indicadores surgem como métricas para tomada de decisões, uma vez que por meio deles obtêm-se dados que instruem no melhor rendimento do sistema de produção. Com base nesta temática, foi realizado um estudo numa indústria têxtil situada no Vale do Jaguaribe, com o objetivo de analisar os indicadores de desempenho e verificar se estão sendo eficazes no modelo atual da empresa, coletando dados que comprovem a aplicação deles, para que posteriormente fossem adotados métodos para a melhoria desses processos. Foi aplicado um questionário para obter informações acerca do processo de manutenção, e assim identificar os pontos positivos e os que são passíveis de melhoria. Verificou-se os métodos de manutenção adotados pela empresa, seus indicadores de criticidade, como é empregado o histórico da manutenção e as ferramentas da qualidade. Diante disso, averiguou-se que o MTBF agregaria valores ao processo como um todo, uma vez que representaria um indicativo a mais a ser consultado no banco de dados, ademais sugeriu-se o uso de ferramentas de qualidade, com intuito de se otimizar os resultados atuais, além de auxiliar na decisão de tomadas de novas medidas.

PALAVRAS-CHAVE: Indicadores, Manutenção, Ferramentas da qualidade.

RESUMO: Todas as atividades industriais visam maximizar seus investimentos através da alta rentabilidade de seus processos. Para

PERFORMANCE ANALYSIS OF MAINTENANCE INDICATORS AT A TEXTILE INDUSTRY IN VALE DO JAGUARIBE - CEARÁ/BRAZIL

ABSTRACT: All industrial activities aim to maximize their investments through the high profitability of their processes. For this, it is not enough to have only production instruments, it is of paramount importance that they are used rationally and productively, so maintenance arises with the aim of contributing to the best use of equipment and consequently leveraging the company's results. In this sense, the indicators appear the metrics for decision making, since through them data are obtained that instruct in the best performance of the production system. Based on this theme, this study was carried out in a textile industry located at Vale do Jaguaribe - Ceará/Br, with the aim of analyzing the performance indicators and verifying whether they are being effective in the current model of the company, collecting data that proves their application, so that later methods have been adopted to improve these processes. A questionnaire was applied to obtain information about the maintenance process, and thus identify the positive points and those that could be improved. It was verified the maintenance methods adopted by the company, its criticality indicators, how the maintenance history and quality tools are used. Therefore, it was found that the "Mean time between failures" MTBF would add values to the process, as it would represent an additional indicator to be consulted in the database, in addition, the use of quality tools was suggested to optimize the current results, in addition to assisting in the decision to take new measures.

KEYWORDS: Indicators; Maintenance; Quality tools.

1 | INTRODUÇÃO

Toda atividade industrial tem como objetivo principal converter o investimento em uma máxima rentabilidade. Para isso, é de suma importância que haja uma integração entre todas as áreas envolvidas no processo de produção (TAVARES, 1986).

A presença de equipamentos cada vez mais sofisticados e de alta produtividade fez a exigência de disponibilidade ir às alturas, os custos de inatividade ou de subatividade se tornaram altos. Então não basta se ter instrumentos de produção, é preciso saber usá-los de forma racional e produtiva. Baseadas nessa ideia, as técnicas de organização, planejamento e controle nas empresas sofreram uma tremenda evolução (VIANA, 2002).

A manutenção é uma das áreas que em muito contribui para o sucesso e produtividade da organização. Por ser fator determinante no custo e no ciclo de vida dos equipamentos, tem um impacto profundo em todas as ações produtivas. A gestão da manutenção hoje pode ser entendida como o ato de gestão dos ativos, executando um papel importante na gestão de tais processos (TAVARES,2005).

É imprescindível que se tenha indicadores alinhados com os ideais da empresa. Por meio deles haverá um desenvolvimento correto para os demais níveis (FALCONI, 2011). Tratando-se da manutenção, tais indicadores avaliam a criticidade dos equipamentos, a efetividade dos modelos adotados, Tempo Médio entre Falhas (MTBF), Tempo Médio de Reparo (MTTR), histórico, dentre outros parâmetros.

O presente estudo foi realizado em uma indústria do setor têxtil localizada no Vale do Jaguaribe, e tem como objetivo analisar os seus indicadores de manutenção, verificar a efetividade através dos resultados e sugerir melhorias para otimizar o processo, a fim de evitar possíveis falhas em sua execução.

Diante de um cenário competitivo entre as empresas, os indicadores de manutenção apresentam-se como um diferencial para que elas obtenham destaque. Na análise deste artigo, foi identificado que a indústria em questão utiliza alguns parâmetros que auxiliam no processo de manutenção, porém, existem quesitos que devem ser aperfeiçoados e implementados, visando um processo cada vez mais efetivo e com menores probabilidades de falhas no cronograma de manutenção.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão da Manutenção e Tipos de Manutenção

Segundo a ABNT (NBR 5462, 1994a), entende-se por manutenção um conjunto de ações e técnicas que abrange todo o ramo industrial. Tais ações objetivam manter o funcionamento em ordem ou recolocar um equipamento, instalação ou maquinário de um determinado setor em perfeita operação. Porém, esse conceito foi desenvolvido e aperfeiçoado ao longo do tempo, visto que antes da segunda guerra mundial as atividades relacionadas à manutenção estavam atreladas ao caráter emergencial, ou seja, os reparos só aconteciam quando o maquinário estava danificado. No entanto, as empresas necessitavam de um diferencial competitivo para se manterem firmes no mercado, logo, tais conceitos de manutenção se aprimoraram com o decorrer do tempo, fornecendo ações e métodos, a fim de assegurar seu perfeito funcionamento (KARDEC; NASSIF, 2015).

Os principais tipos de manutenção estarão em destaque abaixo, apontando seus objetivos e maneiras de funcionamento para melhorar o desempenho dos maquinários, e consequentemente, reduzir o desperdício de tempo com paradas indesejadas.

- **Manutenção Corretiva:**

“É a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida” (ABNT NBR 5462/1994b). Ou seja, é uma atividade de manutenção realizada com o propósito de corrigir algo no equipamento, para que ele possa cumprir o seu papel dentro do processo de produção. Ela pode ser programada ou emergencial, que é feita diante de uma emergência a ser imediatamente resolvida.

- **Manutenção Preventiva:**

“É a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (ABNT NBR 5462/1994c). Em outros termos, é a manutenção responsável por

amenizar problemas frequentes nos equipamentos e conseqüentemente não perder tempo na linha de produção.

- **Manutenção Preditiva:**

“É a 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” (ABNT NBR 5462/1994d). Ou seja, é a manutenção que tem o objetivo de prever a situação do equipamento e encontrar falhas em estágio inicial por meio de monitoramento, quando estas ainda não são prejudiciais ao equipamento ou processo de produção, além de estimar o tempo para a atividade de manutenção, evitando paradas desnecessárias.

- **Manutenção Detectiva:**

O termo manutenção detectiva surgiu a partir da década de 90, com objetivo de elevar a confiabilidade dos equipamentos, haja vista, que é caracterizada pela intervenção em sistemas de proteção para detectar falhas ocultas e não perceptíveis ao pessoal da operação (SOUZA, 2008). Corroborando com esta ideia, Kardec e Nascif (2009), definem a manutenção detectiva como a técnica que busca detectar falhas ocultas ou que não são notadas pelo pessoal de operação e manutenção. Desse modo, tarefas executadas para verificar se um sistema de produção ainda está funcionando corretamente representam a manutenção detectiva.

2.2 Indicadores de Desempenho

Verificar indicadores de desempenho tem sido uma ação corriqueira entre as mais diversas empresas, visto que estes são parâmetros norteadores para medir a performance das organizações em meio à sociedade. Essa avaliação é executada de acordo com as condições pré-estabelecidas, com o intuito de assegurar que os resultados obtidos atendam todos os requisitos de desempenho. Segundo Slack et al. (2006), alguns parâmetros de performance são destacados, como a disponibilidade, confiabilidade dos equipamentos, custo, criticidade e a efetividade dos métodos utilizados.

Os indicadores de desempenho quantificam e mensuram os processos com números, caracterizando a realidade de uma organização. Ademais, eles expõem os impactos gerados na empresa, que podem ser quantitativos, qualitativos e comportamentais (FERNANDES, 2004; ANDERSEN, 1999). Compreende-se que todas as operações produtivas necessitam de parâmetros que sejam capazes de medir o desempenho e identificar as prioridades de melhoria dentro das instituições.

No caso da manutenção, os indicadores de desempenho são identificados com base nos objetivos definidos e efetivamente são utilizados para garantir que os resultados estejam em conformidade com os requisitos de desempenho da produção, ou seja, eles

são elementos-chaves na gestão da função da manutenção. Ademais, conforme escreveu Pinto (2013), estes ajudam na tomada de decisão, além de identificar eventuais problemas e até mesmo oportunidades para a melhoria contínua do sistema.

2.3 Ferramentas da Qualidade

• PDCA

O ciclo PDCA (Plan – Planejar; Do - Fazer, Check - Checar, Action - Agir) é uma ferramenta utilizada nas instituições em busca de resultados, ou seja, consiste em um sistema sequencial sem fim em busca da melhoria contínua, através de questionamentos sobre um determinado processo para identificar se está conforme o planejado. Devido ser um ciclo, todas as vezes que as ações previstas nele chegar ao fim, haverá a repetição de todos os processos novamente (AGOSTINETTO, 2006).

As quatro fases do ciclo são compostas pelo planejamento, fazer, checar e agir, que buscam entender como surgiu o problema, além de chegar a uma solução adequada, essa busca na solução do problema é focada na causa e não nas consequências. Cada fase desse processo é apresentada na Figura 1 e descrita no Quadro 1.



Figura 1. Ciclo PDCA

Planejamento (plan)	Responsável por designar metas e objetivos a serem atingidos, bem como todos os procedimentos que devem ser realizados para cumprir seus objetivos. Essa fase pode ainda ser dividida em subgrupos que são: Identificação, Observação, Análise e Plano de Ação.
Fazer (do)	Fase que haverá de fato a execução do plano de ação adotado no planejamento.
Checar (Check)	Consiste em analisar se a execução está de acordo com o planejamento pré estabelecido. Se os resultados checados não forem os esperados é recomendado que seja realizado um novo planejamento e o ciclo se inicie mais uma vez.
Agir (act)	Converter o plano adotado em uma nova maneira de agir, portanto, nessa fase é realizado o treinamento dos colaboradores para que estejam aptos a executarem o planejamento adotado.

Quadro 1. Fases do PDCA

- **FMEA**

É a sigla para Failure Mode and Effect Analysis, podendo ser traduzido como: Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos. Viana (2002) define FMEA como um método para análise de falhas capaz de pressupor problemas futuros, priorizando ações que impeçam a ocorrência das falhas previstas, bem como de seus efeitos, e assim criar metodologias para resolvê-los. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a FMEA tem como objetivos: reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo, identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas e documentar o estudo, criando um referencial técnico que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo.

- **Princípio de Pareto**

Com as pesquisas realizadas por Vilfredo Pareto no início de 1900, deu origem a um estudo onde foi constatado que a riqueza estava concentrada nas mãos dos poucos e a pobreza nas mãos de muitos, em números isso representa que 80% da riqueza estava concentrada em 20% da população (PARETO, 1896 apud SCOTON, 2011).

O princípio desse diagrama consiste na identificação, detalhamento e solução de problemas, que podem ser oriundos do operador, máquina ou matéria-prima. O foco principal dessa metodologia é combater os problemas que apresentam maior criticidade e importância para o processo, tendo em vista que esses correspondem a maior parcela dos problemas existentes (SELEME; STADLER, 2012).

É interessante que cada organização possua um banco de dados com informações relacionadas às paradas, suas causas e o tempo dessas paradas. Para que dessa forma, seja feita uma análise em cima dos dados fornecidos e então expressá-los em forma de quadro (Quadro 2) ou gráfico (Gráfico 1).

Causa da Parada	Frequência	% Acumulada
Causa 1	100	39,21
Causa 2	60	23,52
Causa 3	30	11,76
Causa 4	40	15,68
Causa 5	20	7,83
Outros	5	2
Total	255	100

Quadro 2. Tabela de Pareto

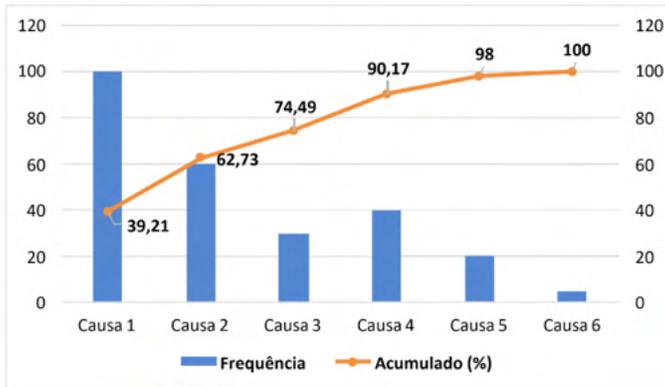


Gráfico 1. Gráfico de Pareto

3 | METODOLOGIA

A técnica adotada para desenvolver a pesquisa em questão pode ser classificada como uma pesquisa exploratória, por estar atrelada à busca de dados para formulação de problemas mais precisos, utilizando fontes de pesquisas primárias. Ademais, a análise é de ordem qualitativa, uma vez que foi desenvolvida através de uma revisão bibliográfica sobre gestão da manutenção, além de estudos de caso que foram realizados sobre a temática.

Com a finalidade de entender a metodologia empregada no setor de manutenção da indústria, foi realizado um questionário com indicadores pré-definidos. Esse questionário foi aplicado a um colaborador responsável pelo setor da manutenção. Nesse contexto, buscou-se entender quais metodologias são utilizadas dentro dessa indústria, se há disponibilidade de capacitação para os funcionários encarregados pelo serviço de manutenção, quais tipos de manutenção são executadas, quais os critérios de criticidade são adotados, bem como o histórico de manutenção tem auxiliado na execução do plano de manutenção, qual maquinário mais sofre com problemas mecânicos, qual o tempo médio entre falhas, tempo médio entre reparos e se é utilizada alguma ferramenta da qualidade para dar suporte nesse processo melhoria.

O questionário norteou para que a equipe pudesse entender o funcionamento do processo de manutenção da indústria em questão e assim verificar a existência de eventuais falhas ou inconsistências em seus métodos utilizados, para que posteriormente fossem sugeridas metodologias a serem empregadas e otimizar aquelas já utilizadas.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ap princípio buscou-se entender em que nível organizacional a empresa se encontrava. Dessa maneira, foi coletado informações sobre quais tipos de manutenção eram realizados. Conforme exposto pelo colaborador, as manutenções preventivas, preditivas, detectivas e

corretivas são executadas mediante às necessidades da instituição. Para executar tais ações, conta-se com a contribuição de 15 colaboradores, que dispõem de ferramentas adequadas para executarem seus serviços de forma satisfatória.

Referindo-se aos tipos de manutenção executadas, tem-se uma estrutura bem organizada que se baseia principalmente em um calendário existente na empresa, minimizando ao máximo os processos de falhas ou de grandes paradas, e maximizando os processos de reposições instantâneas. Já nos processos relacionados aos colaboradores, cabe destacar que até a data de estruturação desse presente trabalho, os mesmos não recebem treinamentos específicos por parte da empresa, fato esse de caráter negativo, visto que o cenário competitivo entre as empresas exige cada vez mais uma mão de obra qualificada, capaz de melhorar e agilizar os processos de produção a cada dia, metodologia conhecida como indústria 4.0.

De acordo com Gomes (2017), o aperfeiçoamento da mão de obra traz benefícios à empresa, capaz de alavancar em 5% a produtividade dos colaboradores; aumentar a qualidade final dos seus produtos em 5% ao ano e melhorar o clima organizacional. Pode-se destacar que existe na empresa um programa de incentivo aos seus funcionários para realizarem cursos de graduações e especializações, porém, não ficou claro se os funcionários de chão de fábrica estão usufruindo desse direito, uma vez que dependendo da realidade do operário, tal fato é considerado impossível, fortalecendo assim a prerrogativa de haver formações, capacitações e afins de forma interna.

Como meio de otimizar os processos de manutenção dos maquinários, o registro do histórico da manutenção apresenta-se como uma ferramenta eficaz, pois tal documento funciona como um banco de dados englobando todas as informações da manutenção de determinada máquina, onde estão contidas as datas que foram realizados os reparos, bem como quais as causas, sintomas e quais serviços deveriam ser prestados para solução do problema. Através dos resultados obtidos da empresa, foi comprovado que há a utilização desse histórico, apresentando-se como um fato positivo. No entanto, carece de alguns indicadores considerados fundamentais para a execução efetiva dessa ferramenta, como o MTBF, porque possui informações que auxiliam nas tomadas de decisões, evitando imprevistos e desperdícios no chão de fábrica, uma vez que a máquina parada representa um decréscimo nas receitas. Vale ressaltar que não há registros em planilhas ou softwares para o MTTR, apenas uma estimativa aproximada com base na experiência dos responsáveis pela manutenção. A fim de otimizar os processos de reparo, recomenda-se que haja o armazenamento dos MTBF, MTTR e os principais tipos de falhas, criando assim uma padronização ou estimativa de padronização para essa problemática.

Conforme Helmann (2008) a criticidade é definida como um parâmetro que expressa a importância da função de um equipamento ou sistema dentro da linha de produção. Diante dessa determinação, é possível estabelecer o nível de prioridades na realização da manutenção, a fim de garantir que o processo de manufatura funcione com o mínimo

de interrupções possíveis. O responsável pela manutenção da empresa que foi aplicado o questionário, determinou o grau de criticidade a partir do tempo médio de reparo, ou seja, quanto menor o tempo de reparo, menor a criticidade. O Quadro 3 representa esse grau de criticidade definido pela empresa.

Tempo médio de reparo	Grau de criticidade
Menor ou igual a 30 min	Baixa criticidade
Entre 30 min a 2 horas	Média criticidade
Maior que 2 horas	Alta criticidade

Quadro 3 - Grau de criticidade (Autoria própria, 2021)

Existem alguns critérios para definir os parâmetros de criticidade, cada sistema dentro da indústria classifica-os de maneira diferente, porém, o mais usual no setor da manutenção é correspondente ao equipamento cuja manutenção é mais longa ou com maior grau de dificuldade de haver os reparos. O funcionário também relatou que uma máquina em especial (Open-end), vem sofrendo mais falhas que as demais, apresentando-se assim como o grande empecilho no setor produtivo da empresa.

De acordo com o questionário, o funcionário identificou algumas ferramentas da qualidade que colaboram para o desenvolvimento das atividades de maneira mais eficiente, sendo elas o FMEA, PDCA e Pareto.

Segundo Pongeluppe (2002), as ferramentas da qualidade aliada às informações contidas no sistema da empresa, geram agilidade no processo de resolução de problemas através da solução rápida, sendo possível comparar os resultados, e conseqüentemente fazer ajustes ou não no decorrer do procedimento. Nesse sentido, Ishikawa (1982) também afirma que “as ferramentas da qualidade podem solucionar 95% dos problemas presentes nas organizações”.

5 | CONCLUSÃO

Os indicadores de desempenho apresentam importante papel nos avanços e otimização dos processos dentro da empresa, visto que eles evidenciam medidas importantes de atividades e resultados cruciais para a organização. Baseado na pesquisa, foi constatado que a empresa faz o uso de metodologias para melhorar o processo produtivo, dentre elas, manutenções preventivas, corretivas, detectivas e preditivas que amenizam possíveis falhas nos maquinários. Ademais, é aplicado o indicador MTTR, responsável por definir a criticidade dos equipamentos.

Quanto mais dados contidos sobre o processo operacional, mais completo será o registro de banco de dados, garantindo maior segurança para o processo e evitando que imprevistos ocorram no decorrer da fabricação. Logo, com a implementação do controle do MTBF, torna-se possível a identificação dos períodos necessários para intervenção antes de ocorrer a falha no equipamento, possibilitando um procedimento de análise mais confiável. Tomando como referência o maquinário open-end, sendo ele de alta criticidade no setor produtivo, seria viável a implementação desse conceito, a fim de evitar paradas repentinas e perdas de produção.

Mediante às ferramentas já utilizadas pela empresa, seria interessante a implementação de outras que contribuíssem para a melhoria dos processos, dentre elas sugere-se a Kaizen, pois é uma ferramenta de melhorias consideradas simples, porém de forma contínua. Salienta-se ainda o método de Gemba Walks, que efetivamente é realizada com a ida dos supervisores ou gerentes até à área de produção, onde após uma caminhada pelo chão de fábrica, haverá uma reflexão em busca de soluções e potencializar ações já executadas. Pode-se citar também a filosofia Lean que é inspirada no modelo e resultados do Toyota, essa ferramenta pode gerar lucros tanto a curto quanto a longo prazo, além de produzir mais resultados com os recursos disponíveis.

Importante ressaltar que este trabalho teve caráter exploratório, utilizando uma análise de dados para o estudo de caso de tal indústria. Logo, ele deve ser aperfeiçoado em pesquisas acadêmicas posteriores, além de ressaltar que a empresa deve continuar com os procedimentos que auxiliam no planejamento da manutenção e otimize o uso dos indicadores de desempenho.

REFERÊNCIAS

AGOSTINETTO, J. **Sistematização do processo de desenvolvimento de produtos, melhoria contínua e desempenho: o caso de uma empresa de autopeças**. Tese de Mestrado, USP. São Carlos, 2006.

ANDERSEN, Arthur. **Remuneração estratégica: uma vantagem competitiva**. São Paulo: Atlas, 1999. 224p

ASSIS, D. S. **Análise o desempenho dos indicadores de manutenção a luz do planejamento estratégico da empresa**. XII congresso nacional de excelência em gestão, 2016.

FERNANDES, D.R. **Uma contribuição sobre a construção de indicadores e sua importância para a gestão empresarial**. Revista da FAE, 7(1), p.1-18, 2004.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luiz Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 7. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2009.

GOMES, Vilisa Rudenco. **Gestão e desenvolvimento de pessoas**. UNIASSELVI, 2017.

HELMANN K. Uma sistemática para determinação da criticidade de equipamentos em processos industriais baseada na abordagem multicritério, Ponta Grossa 2008.

ISHIKAWA, K. **Guide to quality control**. Nova York, Kraus International Publications, 1982.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

LEAN é uma filosofia de gestão inspirada em práticas e resultados do Sistema Toyota. **Lean institute Brasil**. Disponível em: <<https://www.lean.org.br/o-que-e-lean.aspx#:~:text=Lean%20%C3%A9%20uma%20filosofia%20de,e%20resultados%20do%20Sistema%20Toyota%3E>> Acesso em: 10 mar. 2021, às 14h:27min.

LOUZADA, Paula. **Conheça 10 ferramentas e técnicas de melhoria contínua!**. Fm2s, 2019. Disponível em: <<https://www.fm2s.com.br/10-ferramentas-de-melhoria-continua/>> Acesso em: 10 mar. 2021, às 13h:58min.

MOURA, Alexandro Avila de. Análise de Pareto na manutenção – 5 erros que “matam”. **Gestão da produção com Alexandro**, 2017. Disponível em: <<http://www.gestaoproducaocomalexandro.com/analise-de-pareto-na-manutencao/>> Acesso em: 09 mar./2021, às 14h:45min.

MURÇA, V. A. A.; **Aplicação da filosofia Lean na área da Manutenção**. 101f. Dissertação (Mestrado) - Curso PINTO, J. P. **Manutenção Lean**. 1. ed. Portugal: Lidel Editora, 2013.

PONGELUPPE, P.C. **Modelo de indicadores de desempenho para micro e pequena agroindústria: multi-caso de laticínios**. São Carlos, 2002. 169p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos.

SCHOLLES, Clara Rejane. Criticidade de equipamentos na indústria: Como definir prioridades na manutenção. **Indústria4.0**, 2018. Disponível em: <<https://www.industria40.ind.br/artigo/16924-criticidade-de-equipamentos-na-industria-como-definir-prioridades-na-manutencao>> Acesso em: 10 mar. 2021, às 09h:23min.

SCOTON, Filipe Montefusco. **Power Laws na modelagem de caches de microprocessadores**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2011.

SELEME, Robson; STADLER, Humberto. **Controle da Qualidade: As Ferramentas Essenciais**. Curitiba: Ibpex, 2012. SILVA, D. C. S. **Estudo de indicadores chave de desempenho em manutenção e construção de um dashboard em uma indústria do ramo petrolífero**. In: XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2015, Fortaleza - CE. Anais ENEGEP, 2015.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**: Edição Compacta. São Paulo: Atlas, 2006.

SOUZA, J. B. **Alinhamento das estratégias do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) com as finalidades e função do Planejamento e Controle da Produção (PCP): Uma abordagem Analítica**. 2008. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

TELES, J. Diagrama de Pareto na Manutenção: Uma ferramenta poderosa!. **Engeteles**. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/diagrama-de-pareto-na-manutencao/>>. Acesso em: 09 mar. 2021, às 14h:30min.

TELES, J. Tipos de Manutenção de acordo com a NBR 5462. **Engeteles**. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/tipos-de-manutencao/>>. Acesso em: 08 mar. 2021, às 21h:04min.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM - Planejamento e Controle de Manutenção**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

XAVIER, M. E. **Aderência de Indicadores de Desempenho baseados no balanced scorecards, lean thinking e theory of constraints: estudo multicase em empresas Caxias do Sul**. Caxias do Sul, 2013. 135p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Administração.

ANÁLISE DE MODO E EFEITO DE FALHA PARA DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO PARA UM SISTEMA DE LIMPEZA E PINTURA EM EMPRESA DO SETOR AUTOMOTIVO

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 03/12/2021

Vinicius Gomes Silva

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/9032555493434983>

Daniel Levi Maia Matos

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/8395037070552581>

João Víctor Nogueira Gonçalves

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/9150520708534029>

Gilvan Antônio Cappi

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/6628284588143386>

Ramon Rudá Brito Medeiros

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/2280452807088183>

George Luiz Gomes de Oliveira

Universidade Federal do Ceará
Russas – CE
<http://lattes.cnpq.br/5850293899287238>

RESUMO: Atualmente, as empresas pretendem otimizar sua produção, reduzindo gastos desnecessários, tempo perdido e aumentando

a produção e confiabilidade dos produtos, sendo essa perda de produtividade decorrente, principalmente, de falhas no projeto e processo de produção. Diante disso, urge a realização da manutenção, e este artigo irá desenvolver um estudo de caso com aplicação do FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) para desenvolvimento de um plano de manutenção sobre um sistema de pintura em uma empresa do setor automotivo, com o objetivo de reduzir a ocorrência de falhas e aumentar a confiabilidade do processo. Para isso foi realizada uma revisão da literatura, conceituando a evolução da manutenção e do FMEA, uma identificação e caracterização da empresa e do processo com análise do histórico de falhas e por fim, a construção do formulário FMEA.

PALAVRAS-CHAVE: Plano de Manutenção, Análise de Modo e Efeito de Falha, FMEA, Confiabilidade.

FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS FOR THE DEVELOPMENT OF A MAINTENANCE PLAN FOR A CLEANING AND PAINTING SYSTEM IN A COMPANY IN THE AUTOMOTIVE SECTOR

ABSTRACT: Currently, companies intend to optimize their production, reducing unnecessary expenses, wasted time and increasing the production and reliability of products, with this loss of productivity mainly due to failures in the design and production process. Therefore, maintenance is urgently needed, and this article will develop a case study with the application of FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) to develop a maintenance plan for a painting

system in a company in the automotive sector, with the objective to reduce the occurrence of failures and increase the reliability of the process. For this, a literature review was carried out, conceptualizing the evolution of maintenance and the FMEA, an identification and characterization of the company and the process with an analysis of the history of failures and, finally, the construction of the FMEA form.

KEYWORDS: Maintenance Plan, Failure Mode and Effect Analysis, FMEA, Reliability.

1 | INTRODUÇÃO

Em escala mundial, várias empresas no mundo contemporâneo investem na procura de métodos que facilitem e melhorem suas linhas de produção, tanto empresas de grande porte como de pequeno porte. Vários são os métodos possíveis para aumentar sua produtividade, como reduzir o consumo de energia, reduzir a produção de lixo e até desenvolver máquinas mais eficientes, assim ganhando tempo e produzindo em maior quantidade. Entretanto, o principal motivo pela perda de produtividade são as falhas que podem gerar na utilização de um maquinário de forma errônea ou pela falta de uma manutenção correta no seu tempo correto. Porém, a exigência pela maximização da produtividade não abre espaço para perdas decorrentes de falhas em equipamentos. Portanto, a manutenção passa a ser uma função estratégica das empresas.

Segundo Simonetti (2010), o desenvolvimento e a evolução da confiabilidade dos produtos, processos, equipamentos e meios de manufatura fez-se indispensável para uma empresa que visa se destacar no mercado e impressionar os seus clientes, visto que esse fator tem uma influência cada vez maior na percepção e avaliação da qualidade de seus produtos ou serviços. A FMEA, Failure Mode and Effects Analysis ou Análise dos Modos e Efeitos de Falha, surge, então, como uma técnica de análise de confiabilidade muito eficaz que pretende aumentar a excelência em projeto e processo (FOGLIATTO, 2009).

A FMEA pode ser definida, segundo Viana (2002), como um método para análise de falhas em processos e produtos que permite a análise do sistema com o objetivo de antecipar o surgimento de falhas e propiciar as melhores ações a serem tomadas para evitar a concretização da falha. A FMEA, quando bem adequada e implementada na empresa, possibilita a redução de custos em manutenção como reparos, substituições, acidentes, tempo perdido, bem como aumento da vida útil dos equipamentos e do envolvimento da equipe.

Os maiores beneficiados de um projeto sob a Análise de Modo e Efeito de Falha é o usuário final, já que ele poderá usufruir de um produto final mais confiável, livre de falhas previsíveis, sendo, portanto, o principal cliente do FMEA. Também são clientes os projetistas e engenheiros responsáveis pelos subsistemas e processos de manufatura ou assistência técnica do produto (FOGLIATTO, 2009).

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é analisar o histórico de falhas dos componentes de um sistema de limpeza e pintura eletrostática a pó, bem como sugerir a

implementação de um plano de manutenção, após a análise de modo e efeito de falha em uma empresa do setor automotivo.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manutenção

No início do processo de manufatura, a manutenção não era considerada um item de importância, sendo na maioria das vezes realizada pelo próprio operador do processo. Era desconsiderando a sua interferência na produtividade. Com a criação de fábricas e a divisão das tarefas no processo produtivo, a manutenção industrial passou a ser considerada um item de relevante importância no procedimento, tornando-se um diferencial em relação à concorrência.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5462 (1994), a manutenção é definida como “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

Manutenção industrial pode ser conceituada como um conjunto de ações necessárias para manter ou restaurar uma peça, equipamento, máquina ou sistema de forma a estabelecer uma condição operável e objetivando a máxima vida útil. Em busca de competitividade e excelência operacional, a manutenção assume cada vez mais uma função estratégica nas organizações, onde ela é a responsável direta pela disponibilidade dos ativos e acaba tendo uma importância capital nos resultados da empresa, sendo eles tão melhores quanto mais eficaz for a gestão da manutenção industrial (SILVEIRA, 2015).

2.2 Análise de Modos e Efeitos de Falha - FMEA

A análise dos modos de falhas e seus efeitos - FMEA surgiu por volta de 1949 e destinava-se às análises de falhas em sistemas e equipamentos do exército americano, onde era avaliada a sua eficiência baseando-se no impacto sobre uma missão ou no sucesso de defesa pessoal de cada soldado. Foi inicialmente desenvolvida nos anos 60 pela NASA e mais tarde, na década de 70, foi muito utilizada nas indústrias aeronáutica e nuclear. A partir dos anos 80, passou a ser utilizada na indústria automobilística, estendendo-se posteriormente para seus fornecedores na indústria de autopeças. Conforme Miguel (1999), atualmente, esta técnica é considerada uma das ferramentas mais utilizadas na indústria automobilística para detecção de falhas. Como exemplo temos a norma americana QS 9000 que especifica a FMEA como técnica de análise e prevenção de falhas. Foi desenvolvida pelas grandes montadoras nos EUA, Ford, Chrysler e GM, conhecidas como as três grandes montadoras americanas (the big three).

Uma das principais funções do FMEA é auxiliar os operadores a identificarem possíveis falhas no processo, e assim, aumentar a confiabilidade e segurança de sistemas

complexos de produção, fornecendo informações que serão de grande ajuda nas tomadas de decisões a respeito da gestão de riscos. É uma ferramenta que avalia os riscos e pode mitigar potenciais falhas, seja em sistemas, processos, projetos ou serviços.

O FMEA objetiva a prioridade dos modos de falha com o intuito de atribuir recursos aos itens de risco grave, essa priorização é denominada Número de Prioridade de Risco (RPN), sendo esse o produto entre a gravidade/severidade (SEV); ocorrência (OCO) e Detectabilidade de uma falha (DET).

O processo FMEA é composto por cinco passos, os quais são: escolher um processo a ser estudado, montar uma equipe multidisciplinar, coletar e organizar as informações sobre o processo estudado, realizar a análise de falhas, e por fim, desenvolver medidas corretivas (CHIOZZA, PONZETTI, 2009; CICEK, CELIK, 2013).

Decorrente ao exposto acima, pode-se afirmar que a metodologia FMEA é de suma importância pois fornece à empresa uma maneira sistemática de catalogar dados sobre as falhas dos processos/produtos, além de aprimorar o conhecimento dos problemas nos mesmos, gerar ações que podem melhorar o projeto do processo/produto com base em informações recolhidas que foram devidamente monitoradas.

É pertinente se afirmar também que tal metodologia causa uma considerável diminuição dos custos de produção por meio da prevenção de se ocorrer eventuais falhas e também instaura dentro da empresa a noção de prevenção de falhas, da importância do trabalho em equipe e da preocupação com a satisfação dos clientes.

3 | ELABORAÇÃO DO FMEA

Ookalkarm, Joshi e Ookalkar (2009) traz como sugestão que na elaboração do FMEA seja conduzida uma conversa detalhada com todos os que se envolvem no processo, tanto na fabricação, como na geração de serviço, para que seja feito um levantamento das possíveis causas de uma falha. Já McCain (2007) diz ainda que a técnica de brainstorming é bastante eficaz e deveria ser usada, pois essa técnica nada mais é que uma técnica de discussão em grupo que se vale da contribuição espontânea de ideias por parte de todos os participantes, no intuito de resolver algum problema ou de conceber um trabalho criativo.

3.1 Determinação do Item/Função do Equipamento

O primeiro passo para dar início ao FMEA é a escolha do que será estudado, qual subsistema necessita de uma atenção mais a fundo, ou seja, qual componente está sujeito a algum tipo de erro em seu funcionamento. Qualquer tipo de situação seja simples ou complexo, se encaixa nesse quadro, como por exemplo, um consumo muito exagerado de água, onde vão ser estudadas e analisadas medidas que diminuem esse exagero no consumo de água, e entre outros vários tipos que podem ser candidatos a falha.

3.2 Desenvolvimento do Formulário FMEA

Nesta etapa, será feita a elaboração do FMEA em si, onde será realizada a identificação e documentação das funções e seus respectivos modos de falha do sistema o qual está sendo analisado, bem como os efeitos causados por elas, além de sua criticidade e severidade. O preenchimento das colunas “S”, “O” e “D” deve estabelecer a pontuação para cada efeito dos modos de falha, já na coluna “RPN” é calculado o risco, antes detalhado pela equação.

3.3 Identificação dos Modos de Falha

Neste grupo são listados de forma detalhada as possíveis maneiras que o processo, produto ou serviços, dependendo da situação estudada, podem falhar ao cumprir sua função determinada. Existem 5 modos de falhas: a falha completa, falha parcial, falha intermitente, falha devido ao excesso da função e a função indesejada. Um exemplo de modo de falha é quando um sistema de refrigeração demora mais que o esperado para resfriar um ambiente ou produto. Segundo Palady (1997), nesse grupo deve-se responder a seguinte pergunta: “como esse processo, produto ou serviço deixa de desempenhar todas as funções que se espera dele?”

3.4 Efeitos de Falha

São descritas as consequências das falhas nos processos ou produtos, e geralmente, é composto pela opinião do cliente, pois ele é o que mais vai sentir esses efeitos. Portanto, esses efeitos devem incluir a segurança e o corpo regulador; o cliente final; os clientes internos e manufatura; e as montagens e serviços. Nesse grupo, deve ser descrito desde o ponto em que o defeito pode ocorrer até quais seriam seus possíveis efeitos.

3.5 Grau de Severidade

Esse está relacionado ao nível de gravidade da severidade, onde ele pode variar de 1 a 10, conforme descrito no Quadro 01. Nesse grupo é feita uma análise de quão grave é a falha em questão, o quanto ela pode impactar no produto final em uma linha de produção. Através de uma tabela que quantifica a severidade, é feito um estudo para saber se essa falha pode trazer insegurança para o cliente ou pode fazer com que o produto perca sua funcionalidade total, ou se essa falha traz apenas pequenos inconvenientes ou pequenos efeitos.

Escala de Avaliação de Ocorrência das Causas e Modos de Falha	Índice de Ocorrência
Efeito não percebido pelo cliente	1
Efeito bastante insignificante, percebido por 25% dos clientes	2
Efeito insignificante, mas percebido por 50% dos clientes	3
Efeito moderado e percebido por 75% dos clientes	4
Efeito consideravelmente crítico, percebido pelo cliente	5
Efeito consideravelmente crítico, que perturba o cliente	6
Efeito crítico, que deixa o cliente um pouco insatisfeito	7
Efeito crítico, que deixa o cliente consideravelmente insatisfeito	8
Efeito crítico, que deixa o cliente totalmente insatisfeito	9
Efeito perigosa, que ameaça a vida do cliente	10

Quadro 01. Índice de severidade dos efeitos dos modos de falha.

Fonte: Adaptado de ROOS *et al.* (2007).

3.6 Causa das Falhas

Neste grupo, são dispostas todas as causas que podem ter gerado a falha do produto final. Nessa parte, é importante dar uma ênfase maior, pois a partir dela, vão avaliar as ações corretivas mais apropriadas para solucionar o problema, pois caso o cliente faça alguma reclamação sobre algumas falha, a empresa já tem a solução para tal, e seus próximos produtos, já virão com essa falha extinta, reduzindo assim custos e gerando produtos com mais qualidade.

3.7 Ocorrências das Causas das Falhas

Nele se faz o preenchimento das frequências que um tipo de falha vem a acontecer. Os índices de ocorrência têm como base a probabilidade que uma causa de falha pode ocorrer, seja de acordo com falhas passadas ou performances de sistemas em aplicações similares. Elas são quantificadas também de 1 a 10, conforme detalhamento do Quando 02.

Escala de Avaliação de Ocorrência das Causas e Modos de Falha	Índice de Ocorrência
Extremamente remoto, altamente improvável	1
Remoto, improvável	2
Pequena chance de ocorrência	3
Pequeno número de ocorrência	4
Espera-se um número ocasional de falhas	5
Ocorrência moderada	6
Ocorrência frequente	7
Ocorrência elevada	8
Ocorrência muito elevada	9
Ocorrência certa	10

Quadro 2. Índice de ocorrência das causas e modos de falha.

Fonte: Adaptado de Roos et al. (2007).

3.8 Detecção das Falhas

Nessa etapa são analisadas a detecção das falhas, onde essa detecção é quantificada quanto ao seu grau de detecção. Alguns autores fazem essa quantificação apenas fazendo uma análise muito subjetiva, no qual esses graus vão variar de 1 a 10 (Quadro 03), já outros fazem essa detecção de forma probabilísticas, onde eles pontuam quanto a probabilidade de não detectar e a falha chegar ao cliente (Quadro 04).

Detecção	Critério	Pontuação
Absolutamente incerto	Quase certo de que não será detectado	10
Muito remota	Os controles provavelmente não vão detectar	9
Remota	Os controles provavelmente muito pequena de detectar	8
Muito baixa	Os controles têm uma chance pequena de detectar	7
Baixa	Os controles devem detectar	6
Moderada	Os controles devem detectar	5
Moderadamente alta	Os controles têm boa chance de detectar	4
Alta	Os controles têm chance muito boa de detectar	3
Muito alta	Os controles quase certamente vão detectar	2
Quase certeza	Os controles vão detectar	1

Quadro 03. Índice de detecção das falhas - escala quantitativa por uma análise subjetiva.

Fonte: Adaptado de Ookalkar, Joshi e Ookalkar (2009).

Pontuação	Probabilidade de não detectar e a falha chegar no cliente (%)
1	0-5
2	6-15
3	16-25
4	26-35
5	36-45
6	46-55
7	56-65
8	66-75
9	75-85
10	86-100

Quadro 04. Índice de detecção das falhas - Escala quantitativa por uma análise probabilística. Fonte: Adaptado de Ben-Daya e Raouf (1996).

3.9 Índice de Risco (NPR)

O índice de risco é proveniente dos valores de severidade, ocorrência e detecção, porque ela é o resultado do produto desses três fatores. Esse índice varia de 0 a 1000, onde quanto menor for esse índice, melhor. Após calculado esse NPR, são definidas novas medidas para tentar diminuir esse NPR, e depois é analisado e gerado outro índice de risco após adotarem essas novas medidas, e se esse novo NPR não for menor, essas ações não foram suficientes e a tabela do FMEA deve ser refeita.

3.10 Seleção das Tarefas de Manutenção e Elaboração do Plano de Manutenção

Nessa etapa, para cada modo de falha serão estabelecidos os tipos e identificadas as atividades de manutenção específicas para um determinado modo de falha, que seguem um processo estruturado de acordo com a adequação e a efetividade de cada tarefa. Esse processo será feito para cada tipo de efeito de falha determinado na FMEA, utilizando o Diagrama de Decisão para Seleção das Tarefas de Manutenção, ilustrado na Figura1 (ROSA, 2016).



Figura 01. Diagrama de seleção dos tipos de manutenção a serem aplicados.

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2010).

4 | APLICAÇÃO DO FMEA

4.1 Identificação da empresa e do processo

A empresa em que esse estudo foi realizado atua no setor automotivo, produzindo peças e acessórios para motocicletas, já estando a mais de 18 anos no mercado nacional brasileiro. Ela foi fundada no vale do Jaguaribe no estado do Ceará e possui âmbito nacional, possuindo representantes e fornecendo produtos para todas as regiões do Brasil, com exceção da região centro-oeste. Atualmente, esta empresa trabalha apenas com distribuidoras ou pessoas jurídicas, possuindo um volume de produção de aproximadamente 10 mil peças semanais.

O sistema foi selecionado a partir da sugestão do próprio dono da empresa que forneceu os dados e informações para realizar o estudo, através de uma entrevista com ele e uma visita de avaliação in loco.

O estudo do trabalho ficou concentrado no processo de limpeza e pintura eletrostática a pó das peças, que já passaram por processos de usinagem como furação e corte, conformação plástica e solda. O processo de limpeza e pintura ocorre em duas estufas, que funcionam como um forno contínuo são compostas por: a) quatro queimadores; b) uma corrente que circula continuamente carregando as peças que ficam suspensas nela para dentro e para fora da estufa; c) quatro motores que ficam recirculando o ar quente para manter a temperatura elevada em toda a estufa.

A escolha desse sistema foi devido à criticidade dele, visto que no caso de falha

mais de um motor, ou na corrente o sistema de produção completo irá parar, além do elevado custo de tempo e reparo, aliados a complexidade técnica devido ao difícil acesso ao motor além de potenciais riscos à segurança e à produção.

4.2 Manutenção dos componentes dos componentes no processo limpeza e pintura

A empresa, cujo estudo foi realizado, possui um departamento de manutenção que é responsável por realizar a manutenção dos equipamentos responsáveis pelo funcionamento da estufa, para evitar o desgaste e a falha prematura destes.

Esse departamento realiza manutenções preventivas off-line, ou seja, realizada apenas com a parada total da linha de produção, sendo realizadas geralmente em horários fora do expediente de trabalho. O intervalo entre manutenções foi determinado a partir de um primeiro período de observação dos componentes até a sua falha, e então consolidados e padronizados a partir da experiência dos trabalhadores e da equipe de manutenção.

4.3 Escolha e capacitação da equipe de manutenção

A empresa em questão possui, na presente concepção deste trabalho, um setor de manutenção com uma equipe composta por: a) Engenheiro; b) Eletricista; c) Mecânico; d) Torneiro e fresador; e) Auxiliar.

Para uma eficaz implementação das técnicas de manutenção e FMEA, é sugerido à empresa uma ampliação dessa equipe com a integração de mais 3 participantes, podendo ser 1 técnico de planejamento, 1 superintendente, e 1 facilitador. Aliado a isso é recomendado que haja um treinamento da equipe sobre os conceitos, além de reuniões com frequência a ser definida pela própria equipe, recomendado 1 por semana, para discutir as dificuldades e certificar o progresso da implantação.

4.4 Análise de modos e efeitos de falha

Para realizar uma análise mais aprofundada sobre os modos e efeitos de falha na empresa, foi escolhido um subsistema para realizar esse trabalho, onde foram selecionados os rolamentos do motor, o motor, os queimadores a gás e a corrente, pois esses foram os componentes em que foi detectado as falhas mais críticas durante o processo de produção, logo após foram mostrado o modo de falha de cada um deles, além da causa dessas falhas.

A elaboração do FMEA foi feita através de revisão bibliográfica que, com a orientação do dono da empresa que se disponibilizou a fornecer os dados necessários, possibilitou o estudo e a criação do formulário e do plano de manutenção.

5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção será apresentado o formulário FMEA, Quadro 05, onde nele estará listado todas as ações recomendadas para solução e prevenção de cada modo de falha para todos os componentes no sistema especificado. Adiante será mostrado a classificação dos

tipos de atividades de manutenção seguido da frequência que elas devem ser realizadas.

As falhas identificadas se darão em grande parte devido à relação idade do equipamento x confiabilidade, significando que grande parte das ações recomendadas se enquadrem como manutenção preventiva e, no caso de possibilidade de monitoramento, manutenções preditivas.

Item	Função	Modo de Falha	Efeito de falha	S	Causa da falha	O	Controles atuais do processo de prevenção	Controles atuais do processo de detecção	D	Ações recomendadas	NPR
Rolamentos do motor	Facilitar e apoiar a ação rotativa do eixo	Travamento dos rolamentos	Vibrações e parada total do motor	9	Lubrificação insuficiente	8	Nenhum	Inspeção visual	2	Realizar aplicação da graxa lubrificante	144
		Respingos do óleo sobre as peças	Contaminação das peças	2	Perda de propriedades do óleo lubrificante	3	Nenhum	Inspeção visual	5	Trocar a graxa lubrificante	30
Motor	Recircular o ar quente na estufa	Perda de potência	Redução da temperatura na estufa	8	Entupimento dos pistões	4	Utilização de filtros	Verificação da temperatura no painel de controle	5	Limpeza dos filtros de ar	160
Queimador a gás	Fornecimento de calor à estufa	Obstrução dos dutos de gás LP	Redução de eficiência do queimador	4	Impureza nos dutos	8	Utilização de filtros	Verificação da temperatura no painel de controle	3	Limpeza dos filtros de ar	96
		Vazamentos de gás na tubulação	Redução de eficiência do queimador	4	Furos e frouxidão nas tubulações e juntas	9	Vedação dos furos	Verificação da temperatura no painel de controle	3	Vedação dos furos, troca de tubulação apertado das juntas	108
Corrente	Suspensão e transporte das peças	Deslizamento ou desvio da corrente	Desalinhamento da pista	5	Excesso de contrapeso, baixo nível de tração, falha humana	4	Treinamento	Inspeção visual	3	Ajuste apropriado da tensão na corrente	60
		Travamento e fratura da corrente	Parada total do processo	9	Excesso de tração, baixa lubrificação	2	Treinamento	Inspeção visual	1	Ajuste apropriado da tensão na corrente, aplicação do óleo lubrificante	18

Quadro 05: Formulário de Análise dos Modos e Efeitos de Falhas.

Fazendo uma análise geral, podemos constatar através do formulário que para um mesmo item, pode haver mais de um modo de falha, cada um tendo seus modos de falhas próprios. Fazendo uma análise nas NPR de cada componente na tabela, vimos que poucos passam de 100, apenas em três situações, já que quanto maior o NPR, pior será, pois um NPR com valor 1000, representa a pior das hipóteses, e NPR com o valor 0, significa a melhor situação.

As falhas identificadas se darão em grande parte devido à relação idade do equipamento x confiabilidade, significando que grande parte das ações recomendadas se enquadrem como manutenção preventiva e, no caso de possibilidade de monitoramento,

manutenções preditivas.

As frequências indicadas no Quadro 06 foram estabelecidas após análise do histórico de falhas, observando o intervalo entre uma falha e outra, como para a lubrificação com graxa dos rolamentos, foi observado que com 3 meses os rolamentos travavam. A troca da graxa lubrificante deve ser realizada imediatamente para uma com melhor proteção contra corrosão e alta estabilidade a evaporação para aplicações de altas temperaturas, acima de 220°C.

Item	Modo de Falha	Tipo de manutenção	Ações Recomendadas	Frequência
Rolamentos do motor	Travamento dos rolamentos	Restauração preventiva	Realizar aplicação da graxa lubrificante	2 meses
	Respingos do óleo sobre as peças	Substituição preventiva	Trocar a graxa lubrificante	-
Motor	Perda de potência	Inspeção preditiva - Restauração preventiva	Limpeza dos filtros de ar	30 dias
Queimador a gás	Obstrução dos dutos de gás LP	Inspeção preditiva - Restauração preventiva	Limpeza dos filtros de ar	30 dias
	Vazamentos de gás na tubulação	Inspeção preditiva - Restauração preventiva	Vedação dos furos, troca da tubulação, aperto das juntas	30 dias
Corrente	Deslizamento ou desvio da corrente	Inspeção funcional - Restauração preventiva	Ajuste apropriado da tensão na corrente	30 dias
	Travamento e fratura da corrente	Inspeção funcional - Manutenção corretiva	Ajuste apropriado da tensão na corrente, aplicação do óleo lubrificante	45 dias

Quadro 06: Classificação e frequência das atividades de manutenção.

Os rolamentos do motor também devem ser substituídos preventivamente devido ao desgaste natural que estão submetidos, no entanto melhores avaliações devem ser feitas como identificação dos rolamentos e caracterização das condições de operação para determinação da vida dos rolamentos e, conseqüentemente, da frequência de substituição.

Há quatro sensores de temperatura distribuídos em quatro pontos dentro da estufa, sendo eles a entrada, dois pontos internos e a saída da estufa. Os sensores enviam o sinal para um mostrador em um painel externo. Esse mostrador é utilizado para verificar a temperatura continuamente e qualquer redução da temperatura indica que pode haver um modo de falha nos queimadores ou no motor.

6 | CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou como objetivo, a aplicação do método de análise de modos e efeitos de falhas (FMEA) combinado ao método do Número de Prioridade de Risco (RPN) como uma alternativa de plano de manutenção da empresa do setor automotivo localizada no município de Russas (CE).

É pertinente afirmar que a pesquisa atingiu seu propósito de sistematizar, com ajuda do FMEA, a gestão dos riscos técnicos, a fim de colaborar com o processo de tomada de decisões, apesar das limitações geradas pela necessidade de informações para uma maior validação no âmbito proposto pela indústria automobilística.

Com a FMEA foi possível identificar os modos de falha que ocorrem e que poderão vir a ocorrer, determinando-se qual dos modos de falha deve ser prioritário para as ações de manutenção. Além disso, possibilitou a classificação dos tipos de atividades de manutenção que devem ser seguidas e frequência que elas devem ser realizadas.

Através dos resultados obtidos do formulário de análise dos modos e efeitos de falhas (FMEA), foi possível determinar ações recomendadas para solucionar e prevenir cada modo de falha para todos os componentes no sistema especificado, e aumentar a sua confiabilidade. Deve-se destacar que segundo o método aplicado, as falhas identificadas se darão em grande parte devido à relação idade do equipamento x confiabilidade.

Mesmo com as limitações é possível concluir que a utilização do FMEA representa um avanço ao sistematizar e disponibilizar dados antes não disponíveis para o processo decisório junto da análise comparativa entre os valores encontrados para o NPR.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. RIO DE JANEIRO. **NBR 5462, Confiabilidade e Manutenibilidade – terminologia**. Rio de Janeiro, Nov/1994.

BEN-DAYA, M., RAOUF, A. **A revised failure mode and effects analysis model**. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Glendale (USA).

CHIOZZA, M.L., PONZETTI, C. **FMEA: A model for reducing medical errors**. *Clinica Chimica Acta*, v. 404, n. 1, p. 75-78, 2009.

FOGLIATTO, F.S., RIBEIRO, J.L.D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 7. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2009.

KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2010.

MCCAIN, C. **Usando o FMEA no ambiente de serviços**. *Revista Banas Qualidade*. São Paulo, 2007.

MIGUEL, P.A.C. **Qualidade: Princípios, Técnicas e Gestão**. Editora Unimep: Piracicaba, 1999.

OOKALKAR, A.D., JOSHI, A.G.; OOKALKAR, D, S. **Quality Improvement in haemodialysis process using FMEA**. Internacional Journal of Quality & Reliability Management. Nagpur (India), 2009.

PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos**. 5ª edição. São Paulo, IMAM. 1997.

ROOS, C., Diesel, L., Moraes, J.A.R., Rosa, L.C. **Ferramenta FMEA: uma abordagem voltada para a melhoria da qualidade nos serviços de transporte**. XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2007, Foz do Iguaçu (Brasil).

ROSA, R. N. **Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em um processo da indústria automobilística**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS. Porto Alegre, 2016.

SILVEIRA, C. B. **Confiabilidade e disponibilidade de máquinas: um exemplo prático**. Citisystems, 2015.

SIMONETTI, M.J., De SOUZA, A.L., LEANDRO, C.R., TRABACHINI, A., ELL, S.M., **A Manutenção Centrada na Confiabilidade uma Prática Contemporânea**; 2010.

VIANA, H.R.C. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2002.

APLICAÇÃO DIDÁCTICA NO ESTUDO CINEMÁTICO DAS VELOCIDADES DE UM MECANISMO GENÉRICO DE QUATRO BARRAS

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 08/10/2021

Vergara Hernández Erasto

Instituto Politécnico Nacional, UPIIH
San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

Pérez Millán Brenda Carolina

Instituto Politécnico Nacional, CECyT 19
Tecámac, Estado de México, México

Cea Montufar César Eduardo

Instituto Politécnico Nacional, UPIIH
San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

Torres Torres Yael Valdemar

Instituto Politécnico Nacional, UPIIH.
San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

RESUMEN: En el presente trabajo se desarrolló un programa didáctico para realizar el análisis de la posición de un mecanismo genérico de cuatro barras. El programa se realizó mediante el análisis matemático de la ecuación de lazo cerrado del mecanismo y se implementó en la plataforma GUIDE de MATLAB a través de funciones programadas en el ambiente de MATLAB. El resultado permite al usuario encontrar de manera precisa las posiciones angulares y la configuración final del mecanismo de cuatro barras. El programa se validó aplicándolo a un grupo de alumnos de la materia de “Análisis y síntesis de mecanismos”, los resultados muestran una disminución para el tipo de solución requerida, convirtiendo al programa

en una herramienta poderosa de enseñanza y aprendizaje.

PALABRAS CLAVE: Mecanismo de cuatro, análisis de velocidad, aprendizaje significativo.

DIDACTIC APPLICATION IN THE KINEMATIC STUDY OF VELOCITIES OF A GENERIC FOUR-BAR MECHANISM

ABSTRACT: This work shows the results of developing and implementing a didactic program for the analysis of angular velocities of a four-bar mechanism for a group of engineering students. The application was based on the analytical method of the loop equation to find the angular velocities of each of the four members that compose the mechanism. A graphical interface was implemented in MATLAB for the student to visually connect with the configuration of the final mechanism. The program was applied to a group of 30 students, resulting in significant learning due to the active involvement of the student, which was reflected in a reduction in the time required to solve problems of this type.

KEYWORDS: Four-bar linkage, velocity analysis, meaningful learning.

1 | INTRODUCCIÓN

El mecanismo de cuatro barras es la cadena cerrada cinemática más sencilla. Consiste de cuatro cuerpos conectados mediante cuatro articulaciones. El mecanismo de cuatro barras se ha implementado en distintas máquinas dentro de los procesos de

manufactura, considerando aplicaciones desde los limpiaparabrisas de los automóviles hasta las perforadoras de pozos de petróleo.

Una etapa dentro del estudio cinemático de los mecanismos, incluyendo el de cuatro barras, es el estudio de las velocidades angulares de cada uno de los miembros que lo componen. Principalmente existen dos métodos para su estudio: i) método gráfico a través de centros instantáneos, y ii) método analítico, donde se puede abordar de forma vectorial, o bien, con la representación en el plano complejo de un eslabón.

Hoy en día, el uso de las tecnologías de la información en el campo de la educación, en los últimos meses se ha visto impulsado por el rápido desarrollo de las computadoras las cuales han transformado la manera en como los alumnos adquieren el conocimiento de manera significativa. Una de las herramientas en la enseñanza de la ingeniería es el desarrollo de programas y aplicaciones para su uso en las clases. En el área de la ingeniería mecánica el software MATLAB es una poderosa herramienta que puede utilizarse en el proceso de enseñanza aprendizaje, en el presente artículo se crea una aplicación en el entorno de MATLAB para mejorar el aprendizaje de los alumnos.

En este trabajo se desarrolló un programa didáctico con el propósito de apoyar a los estudiantes que cursen alguna materia de análisis de mecanismos o de dinámica de cuerpo rígido con el propósito de fortalecer los conocimientos de un de la cinemática de mecanismo de cuatro barras

2 | DESARROLLO

2.1 Análisis matemático

El trabajo se implementó en el ambiente grafico APP DESIGNER de Matlab, el cual permite al estudiante conocer las velocidades angulares de cada elemento de un mecanismo genérico de cuatro barras. Se inicia el análisis a partir de la configuración que se muestra en la Figura 1.

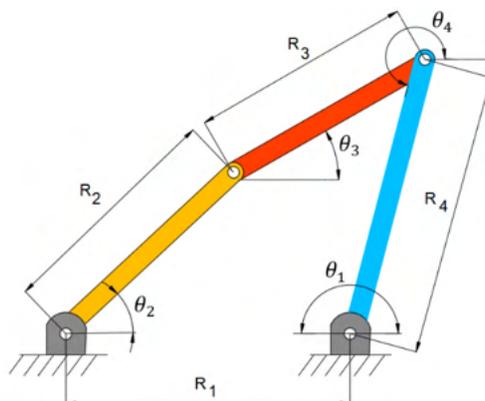


Figura 1.- Configuración de mecanismo de cuatro barras a estudiar

El análisis toma en cuenta la representación de Euler de los números complejos:

$$z_n = R_n e^{i\theta_n} \quad (1)$$

Al aplicar la ecuación de lazo cerrado, ecuación 1, al diagrama de variable compleja que se muestra en la Figura 2. se obtiene la ec. (2)

$$\vec{z}_1 + \vec{z}_2 + \vec{z}_3 + \vec{z}_4 = 0 \quad (2)$$

dónde z_n es la representación compleja de cada eslabón.

En el análisis matemático se considera que la velocidad angular del eslabón, w_2 es conocida, mientras que las velocidades w_3 y w_4 son calculadas, la velocidad del eslabón 1 al ser fijo, es $w_1=0 \text{ rad/s}$.

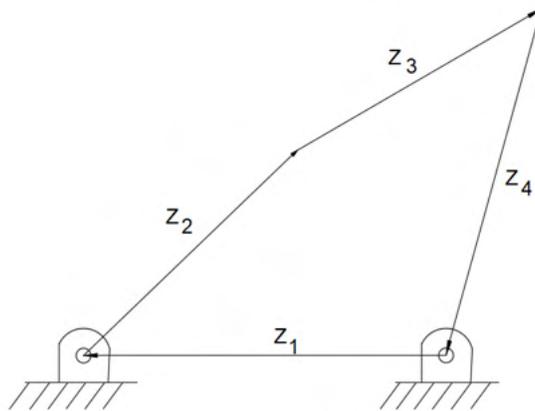


Figura 2.- Diagrama vectorial del mecanismo de cuatro barras genérico

Derivando la ecuación 2 para obtener las velocidades angulares se obtiene:

$$\frac{\vec{z}_1}{dt} + \frac{\vec{z}_2}{dt} + \frac{\vec{z}_3}{dt} + \frac{\vec{z}_4}{dt} = \mathbf{0} \quad (3)$$

Al considerar $w_1=0$, y sabiendo $\vec{v}_n = \vec{w}_n \times \vec{z}_n$ se tiene que:

$$(\vec{w}_2 \times \vec{z}_2) + (\vec{w}_3 \times \vec{z}_3) + (\vec{w}_4 \times \vec{z}_4) = \mathbf{0} \quad (4)$$

El vector \vec{z}_n de la ecuación 4 se representa en términos de sus componentes:

$$\vec{z}_n = R_n \cos\theta_n \mathbf{i} + R_n \sin\theta_n \mathbf{j} \quad (5)$$

representando la ecuación (5) como:

$$\vec{z}_n = z_{nx} \mathbf{i} + z_{ny} \mathbf{j} \quad (6)$$

y el vector de la velocidad angular de cada cuerpo queda definido como:

$$\vec{w}_n = w_n k \quad (7)$$

Al sustituir la ecuación (6), la ecuación (7) en la ecuación (4) y realizar el producto cruz de cada velocidad se obtiene el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} z_{3y} & z_{4y} \\ z_{3x} & z_{4x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w_2 z_{2y} \\ -w_2 z_{2x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

La ecuación (8) es de la forma $\mathbf{Ax}=\mathbf{b}$, y su solución está expresada en la ecuación (9) para w_3 y en la ecuación (10) para w_4 .

$$w_3 = -w_2 \left(\frac{z_{2y}z_{4x} - z_{2x}z_{4y}}{z_{3y}z_{4x} - z_{3x}z_{4y}} \right) \quad (9)$$

$$w_4 = -w_2 \left(\frac{z_{3y}z_{2x} - z_{3x}z_{2y}}{z_{3y}z_{4x} - z_{3x}z_{4y}} \right) \quad (10)$$

2.2 Programación

En la etapa de la programación se realizó e implemento el diagrama de flujo con las operaciones que se muestran en la Figura 5. El inicio del programa es con la adquisición de los datos: i) longitud y posición angular de cada eslabón, haciendo notar que las medidas angulares deben estar en el sistema sexagesimal, y ii) la velocidad angular del eslabón 2. El siguiente paso en la estructura del programa es programar las soluciones de las velocidades angulares w_3 y w_4 , luego entonces se despliega la magnitud y dirección de las velocidades angulares buscadas y se gráfica la configuración final del mecanismo en estudio para una comprensión de parte del alumno.

El gráfico final muestra en colores diferentes cada eslabón también se colocó un sistema de escala para comparar las medidas, los eslabones son graficados por un conjunto de líneas que parten de un punto inicial P_i a un punto final P_f .

La interfaz gráfica se muestra en la Figura 3, emplea cuadros de dialogo para la adquisición de datos (parte inferior) para el despliegue de los resultados, en la parte superior de la ventana se muestra el gráfico en dos dimensiones del mecanismo en estudio, resumiendo, mediante una ventana se despliega: i) la solución matemática del mecanismo, ω_3, ω_4 y ii) la representación gráfica del mecanismo solucionado.

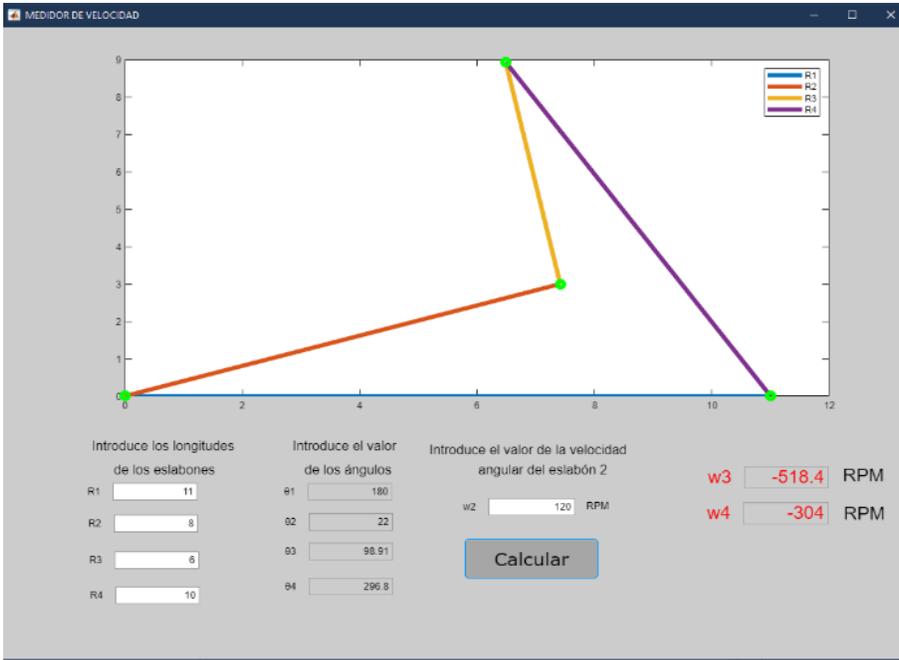


Figura 3.- Ventana de inicio del programa implementado

```

App Designer - C:\Users\Studio\Documents\2do Parcial 21-22do examen parcial mecanismos 21-2 IMM1\medidordevelocidad.mtapp
DESIGNER EDITOR
Save Compare Callback Function Property App Input Arguments Go To Find Comment % % Indent
None Left/ Right Top/ Bottom SPLIT DOCUMENT VIEW Enable app coding alerts Zoom In Zoom Out Show Tips Run
FILE INSERT NAVIGATE EDIT VIEW ZOOM RESOURCES RUN
medidordevelocidad.mtapp x
CODE BROWSER
94 - k=90-u1;
95 - theta3=90-k;
96 - app.angulo3.Value=theta3;
97 -
98 -
99 - p2=180-a1p;
100 -
101 - z4=d*cos(p2*pi/180);
102 - z4L=d*sin(p2*pi/180);
103 - x4=[z4 z1x+z4];
104 - y4=[z1y z4L];
105 -
106 - x3=[z2x z1x+z4];
107 - y3=[z2y z4L];
108 - %Sacamos los valores de z3 y z4
109 -
110 - z3x=c*cos(theta3*pi/180);
111 - z3y=c*sin(theta3*pi/180);
112 -
113 - z4x=d*cos(theta4*pi/180);
114 - z4y=d*sin(theta4*pi/180);
115 -
116 - %VELOCIDAD ANGULAR EN RPM
117 - w2=app.vangular2.Value;
118 - w3=-w2*((z2*y24-z2x*z4y)/(z3*y24-z3x*z4y));
119 - w4=-w2*((z2*x23y-z2y*z3x)/(z3*y24-z3x*z4y));
120 - app.vangular3.Value=w3;
121 - app.vangular4.Value=w4;
122 - plot(app.graficador,x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x1,y1,'go',x2,y2,'go',x3,y3,'go',x4,y4,'go','linewidth',4);
123 - legend(app.graficador,'R1','R2','R3','R4')
124 -
125 - if w2=0
126 -     app.velocidad2.Value=w2;

```

Figura 4.- Código realizado para la programación de la ecuación 9 y de la ecuación 10



Figura 5.- Diagrama de flujo del programa desarrollado para análisis de posición de mecanismo de cuatro barras

3 | RESULTADOS

Una vez terminado el programa se realizó la prueba y depuración del mismo, para lo cual se utilizaron los datos que se muestran en la Tabla 1, las unidades de las longitudes de los eslabones son establecidas en unidades arbitrarias, mientras que las posiciones angulares están definidas en ángulos sexagesimales, los resultados de las velocidades angulares se dan en revoluciones por minuto (rpm). Valores negativos en las velocidades angulares implican un movimiento del eslabón en sentido horario.

Eslabón	Longitud (un. arb.)	Posición angular (°)	Velocidad angular (rpm)
1	10	180	0
2	5.5	40	120
3	6	108.2	-306
4	12	309.7	-139.6

Tabla 1.- Datos de prueba

El gráfico que se obtiene al introducir los datos de la Tabla 1 se muestra en la Figura 6

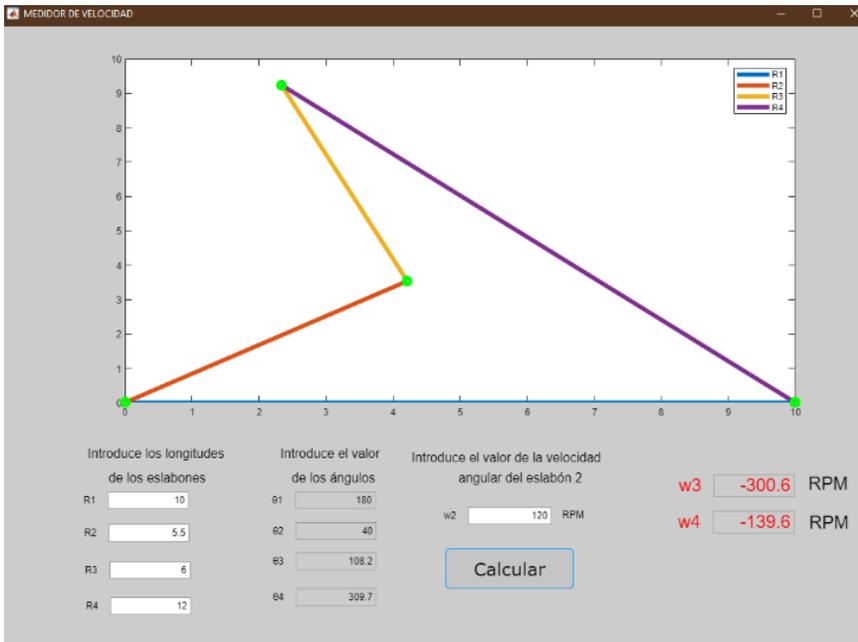


Figura 6 - Resultados obtenidos con los datos de la Tabla 1

De la ventana de resultados se obtienen el valor de la velocidad angular del eslabón 3 y del eslabón 4, que son de -306 rpm y -139.6 rpm. Así mismo en la zona gráfica el alumno puede observar la configuración del mecanismo de acuerdo a la geometría establecida.

Se realizó una segunda prueba donde se intentó que la posición angular del eslabón de manivela estuviera alineada con el eslabón 1 (180°), los datos para cumplir con la geometría se muestran en la Tabla 2.

Eslabón	Longitud (un. arb.)	Posición angular (°)	Velocidad angular (rpm)
1	15	180°	0
2	6	180°	57.3
3	17	26.07	16.37
4	10	306.9	16.37

Tabla 2.- Datos de prueba

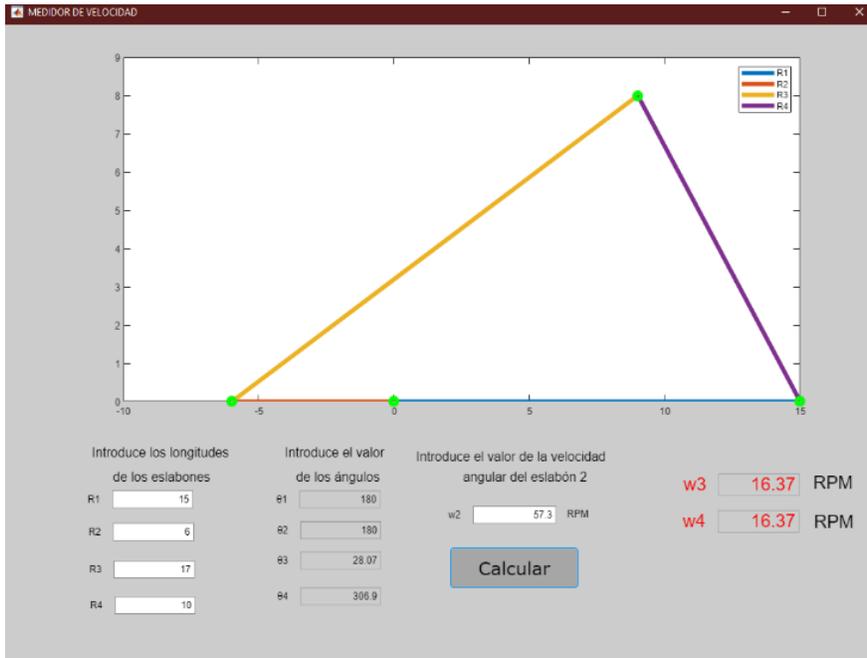


Figura 7.- Resultados de la simulación obtenidos con los datos de la Tabla 2

En la Figura 7 los resultados muestran que las velocidades angulares del eslabón 3 y del eslabón 4 son de la misma magnitud y el mismo sentido con valor de 16.37 rpm.

La aplicación desarrollada se implementó en un grupo de 26 estudiantes de la materia de “Análisis y síntesis de mecanismos” del Instituto Politécnico Nacional, creándose un experimento dónde se comparan el de resolución en los problemas de análisis de velocidad (método analítico) que le toma a los alumnos cuando utilizan la aplicación y cuando no la utilizan, los resultados se muestran en la Figura 8.

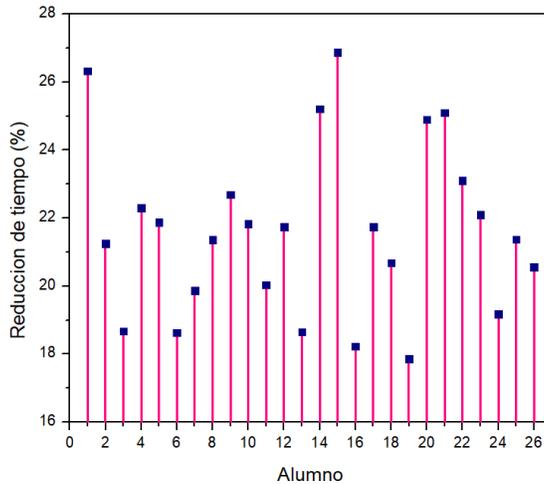


Figura 8.- Resultados de la simulación obtenidos

En la gráfica de la Figura 8 se observa que en promedio el grupo de alumnos presentó una reducción en el tiempo de la resolución correcta de los ejercicios de velocidades angulares del mecanismo de cuatro barras es en promedio del 22%, destacar que los 26 alumnos presentaron algún porcentaje de reducción en la solución de los problemas, resultado que es esperado de acuerdo a los principios del aprendizaje significado.

4 | CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló e implementó una aplicación en el entorno APP DESIGNER de MATLAB, para encontrar las velocidades angulares del eslabón acoplador y de salida de un mecanismo de cuatro barras a través del análisis matemático del mismo. El trabajo se aplicó en un grupo de alumnos de ingeniería, dónde los resultados muestran una reducción general en el tiempo de resolución de los problemas típicos de velocidades angulares del mecanismo de cuatro barras, fortaleciendo significativamente el conocimiento adquirido.

REFERENCIAS

Bureerat S. et. al. **Constraint handling technique for four-bar linkage path generation using self-adaptive teaching-learning-based optimization with a diversity archive.** Eng. Optim., vol. 0273, 2020.

Highman D.J, Highman N. **Matlab Guide.** SIAM, 2016

Lin W.Y. **A GA-DE hybrid evolutionary algorithm for path synthesis of four-bar linkage.** Mechanism and Machine Theory. vol. 45, no. 8, pp. 1096–1107, 2010.

Pytel A., Kiusalaas J. **Dinámica**, Cengage Learning, 2012.

Sleesongsom S. et al. **Four-bar linkage path generation through self-adaptive population size teaching-learning based optimization**, Knowledge-Based Syst., vol. 135, pp. 180–191, 2017

Zhou C. et. Al. **Students perceptions of creativity in learning Information Technology (IT) in project groups**. Computers in Human Behavior., vol. 41, pp. 454–463, 2014

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E UTILIZAÇÃO DOS VENTILADORES COM MOTORES ELETRÔNICOS (EC) - APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO INDUSTRIAL

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 10/12/2021

Abimael J. Urcino Junior

FAPRO - Faculdade Profissional
Curitiba – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/6210278816281020>

Samuel Mariano do Nascimento

FAPRO - Faculdade Profissional
Curitiba – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/7171883288003484>

Eliandro Barbosa de Aguiar

FAPRO - Faculdade Profissional
Curitiba – Paraná
<https://orcid.org/0000-0001-9994-7736>

Alexandre Fernandes Santos

FAPRO - Faculdade Profissional
Curitiba – Paraná
<https://orcid.org/0000-0001-5306-6968>

RESUMO: Os ventiladores que utilizam motores do tipo eletrônico têm ganhado bastante mercado e sendo cada vez mais aplicados nos mais diversos equipamentos relacionados ao HVAC industrial, como, por exemplo, unidades de tratamento de ar (UTA), desumidificadores químicos, unidades de fluxo de ar unidirecional, entre outros. Com base nesta tendência, foi realizado um estudo comparativo entre os novos ventiladores EC e os ventiladores tradicionais de polia e correia com motes AC. Para este estudo, foram simuladas diversas seleções de pontos

de operação (vazão x pressão, comparativo da manutenção das duas tecnologias, além de um estudo de custos para aquisição e implantação, a fim de se evidenciar em quais faixas de operação determinada tecnologia é mais eficiente que a outra, qual tem uma manutenção mais pesada em termos de quantidade de horas, e, por fim, qual o custo de implantação das mesmas. Isto foi obtido ao se comparar os resultados de eficiência dos ventiladores, potência instalada e check lists de manutenção. Assim, foi evidenciado que uma determinada tecnologia de ventiladores é realmente mais eficaz e gera uma demanda de carga menor em pontos de operação para baixas pressões e vazões, onde esta mesma tecnologia também apresenta uma necessidade de menor tempo parado para manutenção. Porém, para médias e altas vazões e pressões, ficou constatado que existe uma perda de eficiência e uma necessidade consequente de demanda de carga instalada maior.

PALAVRAS-CHAVE: Ventiladores, Motores EC, Ventiladores de polia e correia.

ABSTRACT: Fans that use electronic motors have gained a lot of market and are increasingly being applied in the most diverse equipment related to industrial HVAC, such as, for example, air treatment units (UTA), chemical dehumidifiers, flow units. unidirectional air, among others. Based on this trend, a comparative study was carried out between the new EC fans and the traditional pulley and belt fans with AC motes. For this study, several selections of operating points were simulated (flow x pressure, comparison of maintenance of the two technologies, in addition

to a cost study for acquisition and implementation, in order to show in which operating ranges a given technology is more efficient than the other, which has a heavier maintenance in terms of hours, and, finally, what is the cost of implementing them. This was obtained by comparing the results of fan efficiency, installed power and check lists. Thus, it was shown that a given fan technology is actually more efficient and generates a lower load demand at operating points for low pressures and flows, where this same technology also has a need for less time for maintenance, however, for medium and high flows and pressures, it was found that there is a loss of efficiency and a consequent need for a higher installed load demand.

KEYWORDS: Fans, EC Motors, Pulley and Belt Fans.

1 | INTRODUÇÃO

Os conjuntos de moto-ventiladores são componentes essenciais em sistemas de climatização e refrigeração. Sem eles não seria possível promover a recirculação de ar, conduzir o ar tratado (refrigerado e/ou filtrado) ao ambiente, através de redes de dutos, tão pouco seria possível fazer a exaustão de gases poluidores nos sistemas de exaustão. Sendo assim, ao longo dos anos, foram realizados diversos avanços na engenharia de construção destes componentes, visando sempre uma maior capacidade de vazão de ar e pressão, a fim de se vencer as perdas de cargas, impostas por dutos, filtros, grelhas e demais componentes de um sistema de climatização.

Os ventiladores podem ter diversas formas construtivas, variando conforme sentido de fluxo, tipo de rotores, acoplamentos e sistemas de transmissão e, mais recentemente, podem variar o tipo de motor. Podem ser eles: centrífugos com pás voltadas para frente ou para trás de simples ou dupla aspiração, e ventiladores axiais. Quanto ao acoplamento, podem variar entre polia e correia, acoplamento direto, *plenum fan*, entre outros.

A ênfase deste artigo será a comparação entre os ventiladores centrífugos tradicionais de polia e correia com motores de corrente alternada (AC) e os novos ventiladores tipo *plenum fan* com motores eletrônicos. Será uma comparação de potência instalada e eficiência de cada tipo de ventilador em diversos pontos de operação (vazão x pressão), a fim de identificarmos faixas e limites ideais para aplicação de cada tecnologia, manutenções e custo de implantação. Visto que atualmente a utilização dos ventiladores centrífugos é altamente difundida nas mais variadas aplicações comerciais e sobretudo industriais, a intenção é identificar pontos de oportunidade onde estes ventiladores poderiam ser substituídos por novos ventiladores eletrônicos, trazendo ganho de eficiência energética para as instalações e reduzindo a carga demandada para acionamento dos ventiladores e tempo de manutenção. Para novas instalações, também será possível reduzir o custo de instalação elétrica entre os ventilares tradicionais e os eletrônicos, já que os mesmos dispensam o uso de inversores de frequência para modulação, pois já possuem chips eletrônicos embarcados que permitem tal variação.

Da mesma maneira, será possível identificar se existem e quais são as faixas

onde os ventiladores eletrônicos não são tão eficientes ou mesmo são menos eficientes em comparação com os ventiladores centrífugos de polia e correia, a fim de evitar emprego de tecnologia inadequada para cada aplicação.

Para esta comparação, será feita uma breve apresentação das características técnicas de cada tecnologia com o objetivo de destacar onde as mesmas se divergem. Após isto, será feito um estudo comparativo entre diversas seleções de ventiladores, *check lists* de manutenção e estudo de custos para implantação. Para isto, utilizaremos *softwares* de seleção de dois fabricantes que são referências no mercado brasileiro, informações de um plano de manutenção real de uma indústria farmacêutica, além de dados de orçamentos reais para implantação da tecnologia.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme CREDER (2004), todos os sistemas de ar condicionado promovem a circulação de ar através de ventiladores. Podendo estes serem considerados bombas de ar, que têm por função vencer as pressões de resistências impostas pelo sistema. De modo geral, existem algumas definições que podem ser identificadas observando o funcionamento dos ventiladores.

Conforme CREDER (2004):

- A capacidade do ventilador é proporcional a sua rotação;
- A pressão do ventilador é proporcional ao quadrado de sua rotação;
- A potência do ventilador é proporcional ao cubo de sua rotação.

Se pode considerar algumas importantes características que são inerentes a todo ventilador, sendo elas:

- **Vazão do ventilador:** Volume de ar que passa pelo ventilador;
- **Velocidade de saída do ventilador:** Obtida através da divisão do volume de ar pela sua área;
- **Pressão dinâmica:** É a pressão que corresponde à velocidade do ar na saída do ventilador;
- **Pressão total:** É a diferença entre a pressão total do ar na saída do ventilador e a pressão total do ar na entrada;
- **Pressão estática:** É a diferença entre a pressão total e a pressão devida à velocidade (pressão dinâmica).

Segundo MACINTYRE (1990), existem vários critérios pelos quais se pode classificar os ventiladores, sendo os listados a seguir os mais usuais.

Por pressão:

- **Baixa Pressão:** Ventiladores que possuem uma pressão efetiva de até 200

mmCa;

- Média Pressão: Ventiladores que possuem uma pressão efetiva de 200 a 800 mmCa;
- Alta Pressão: Ventiladores que possuem uma pressão efetiva de 800 a 2500 mmCa;
- Muito Alta Pressão: Ventiladores que possuem uma pressão efetiva acima de 2500 mmCa (Chamados de Turbo compressores).

Pela forma construtiva:

- Centrífugos: Quando a trajetória do ar é aproximadamente um plano normal ao eixo, portanto uma espiral;
- Hélico-centrífugos: Quando a trajetória do ar no interior do rotor descreve uma hélice sobre uma superfície de revolução cônica;
- Axiais: Quando a trajetória do ar no rotor é uma hélice descrita em uma superfície aproximadamente cilíndrica.

Com relação à forma construtiva, se pode ainda classificar conforme a especificação do rotor dos ventiladores.

Para ventiladores centrífugos temos:

- Pás inclinadas para trás (*limit load*);
- Pás retas inclinadas para trás;
- Pás Radiais;
- Pás curvadas para frente (Sirocco).

Segue abaixo característica dos principais ventiladores utilizados em aplicações de ar condicionado e climatização industrial, e que serão alvo deste estudo.

Ventiladores com pás curvadas para trás (*limit load*):



Figura 1. Ventilador *limit load* (Soler Palau, 2021)

- É considerado o mais eficiente entre os centrífugos;
- É menos ruidoso;

- É muito utilizado em sistemas de ar condicionado;
- Apresenta uma maior eficiência;
- Não apresenta problemas de sobrecarga por projeto incorreto ou operação inadequada do sistema (equipamento robusto).

Ventiladores com pás curvadas para frente (Sirocco):



Figura 2. Ventilador Sirocco (Soler Palau, 2021)

- Apresenta certa instabilidade na curva característica para baixas vazões;
- A potência requerida de motor cresce constantemente com o aumento da vazão;
- Requer cuidado na determinação do ponto de operação do sistema e na seleção do motor de acionamento;
- Ocupa pouco espaço;
- Tem eficiência menor que a do centrífugo com pás curvadas para trás.

Para ventiladores axiais temos:

- Ventilador tubo-axial;
- Ventilador axial propulsor.

Ventilador tubo-axial:



Figura 3. Ventilador Tubo Axial (Soler Palau, 2021)

- Em geral, são menos eficientes e mais ruidosos que os ventiladores centrífugos;
- É constituído por uma carcaça tubular e um rotor axial;

- Apresenta baixas pressões;
- O motor pode ser acoplado diretamente ao rotor.

Ventilador axial propulsor:



Figura 4. Ventilador Axial Propulsor (FEG / Unesp 2021)

- Adequado para grandes vazões de ar e pequenas pressões;
- Muito aplicado em unidades de resfriamento e aquecimento, ventilação exaustora e torres de resfriamento.

A gama de ventiladores é muito extensa e pode também ser classificada quanto ao tipo de acoplamento entre rotor e motores, posição de descarga, entre outras formas construtivas. Em geral, além dos modelos já explicitados, se pode citar: Ventiladores *plenum fan* e *air foil*.

Ventiladores eletrônicos

Um modelo de ventilador que vem sendo amplamente utilizado são os chamados ventiladores eletrônicos, que na sua parte construtiva de rotor são idênticos aos ventiladores *plenum fan*, mas que se diferem quanto ao tipo de motor utilizado no acionamento.

Segundo *ZIEHL-ABEGG* (2018), ventiladores eletrônicos são ventiladores *plenum fan*, acionados por motores eletronicamente comutados EC.



Figura 5. Ventilador Tubo Axial (*ZIEHL-ABEGG*, 2018)

Seguem abaixo, conforme *ZIEHL-ABEGG* (2018), as principais características dos ventiladores eletrônicos:

- Possuem motores de corrente contínua e eletronicamente comutados;

- Dispensam o uso de inversores de frequência para acionamento;
- Possibilitam partida em rampa;
- O controle de velocidade é feito através de sinal externo enviado ao chip integrado no motor;
- Requerem espaços menores para instalação;
- Possibilitam maior confiabilidade ao sistema, visto que comumente são empregados mais de um ventilador em paralelo dentro de unidades de tratamento de ar;
- Apresentam menores níveis de ruído e vibração.

No estudo a seguir, será feita uma comparação entre as seleções para unidades de tratamento de ar, comparando aplicações com uso de ventiladores centrífugos *limit load* (com motores convencionais) e ventiladores *plenum fan* (com motores EC), com o objetivo de verificarmos o que seria mais indicado em cada faixa de operação, comparando também sua manutenção e seu custo de implantação.

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo do estudo foi avaliar as principais tecnologias de ventiladores empregadas atualmente em unidades de tratamento de ar (UTA) industriais, verificando em quais pontos de operação se justifica a escolha entre uma ou outra. *Check list* e tempo de manutenção e estudo de custos de implantação também foram avaliados, para tal foram escolhidos os ventiladores centrífugos *limit load* com motores de corrente alternada tradicionais, que já são amplamente empregados nas mais diversas aplicações e os ventiladores do tipo *plenum fan* com motores eletronicamente comutados EC.

3.1 Pontos de operação

Para realização do trabalho, foram analisados os dados obtidos na seleção dos ventiladores em variados pontos de operação (vazão x pressão), através dos softwares *Fan Select* para os ventiladores plenum Fan EC e *Vortex* para ventiladores centrífugos *limit load*.

O foco da análise é aplicação em unidades de tratamento de ar para indústria. Estes equipamentos tipicamente trabalham em baixas e médias pressões, conforme limites abaixo:

- Baixa pressão: Ventiladores que possuem uma pressão efetiva de até 200 mmCa;
- Média pressão: Ventiladores que possuem uma pressão efetiva de 200 a 800 mmCa.

Sendo assim, serão adotados nove pontos de operações dentro das faixas de

pressão especificadas. Após seleção dos equipamentos, serão comparados os resultados, sobretudo potência demandada de motores e eficiência de cada tecnologia empregada. Como premissa, será adotado que a vazão e a pressão devem ser alcançadas por um único equipamento (no caso dos ventiladores centrífugos *limit load*) e possíveis associações de ventiladores em paralelo (no caso dos *plenum fan EC*), conforme selecionado pelo software.

Primeiramente, serão analisados pontos com vazão e pressão crescentes (ou seja, à medida que a vazão for subindo, a pressão adotada também será maior, segue tabela abaixo:

SEQUÊNCIA PONTOS DE OPERAÇÃO - 01		
PONTO	VAZÃO (m ³ /h)	PRESSÃO (mmCA)
1	2500	80
2	5000	120
3	10000	160
4	15000	200
5	20000	240

Tabela 1. Pontos de Operação – 01

Em um segundo momento, foram invertidas as vazões com as pressões (ou seja, a menor vazão corresponde à maior pressão do ponto de seleção) a fim de verificar se há alguma influência nos resultados).

SEQUÊNCIA PONTOS DE OPERAÇÃO - 02		
PONTO	VAZÃO (m ³ /h)	PRESSÃO (mmCA)
6	5000	200
7	10000	160
8	15000	120
9	20000	80

Tabela 2. Pontos de Operação – 02

Como critérios, serão comparados os modelos de ventiladores mais comumente usados em unidades de tratamento de ar, sendo eles: Centrífugo *limit load* de dupla aspiração e Ventiladores *plenum fan* com motores EC. Será considerada uma pressão atmosférica de 760 mmHg e uma temperatura do ar de 16°C. Para efeito de seleção, será escolhido o primeiro modelo determinado pelos softwares como o mais indicado.

Seguem abaixo seleções realizadas:

PONTO	VENTILADOR CENTRÍFUGO LIMIT LOAD				VENTILADOR PLENUM FAN COM MOTOR EC			
	ROTAÇÃO (RPM)	NÍVEL DE RUÍDO (Db)	POTÊNCIA (W)	EFICIÊNCIA (%)	ROTAÇÃO (RPM)	NÍVEL DE RUÍDO (Db)	POTÊNCIA (W)	EFICIÊNCIA (%)
1	3092	84	1051	60%	2673	76	929	62%
2	2637	87	3030	62%	3892	86	2782	65%
3	2300	87	6722	75%	2940	89	7697	59%
4	2053	91	12797	73%	3137	101	18500	60%
5	1998	93	20542	73%	-	-	-	-
6	3536	94	6590	55%	4039	95	5408	52%
7	3598	92	4347	64%	2940	89	7697	60%
8	1617	86	7413	77%	3066	93	8653	62%
9	1043	83	6538	77%	2629	91	8004	60%

Obs.: Para o ponto de seleção 5, a tecnologia de ventiladores *plenum fan*, com motores eletrônicos, não consegue atingir seleção.

Tabela 3. Seleção de Ventiladores

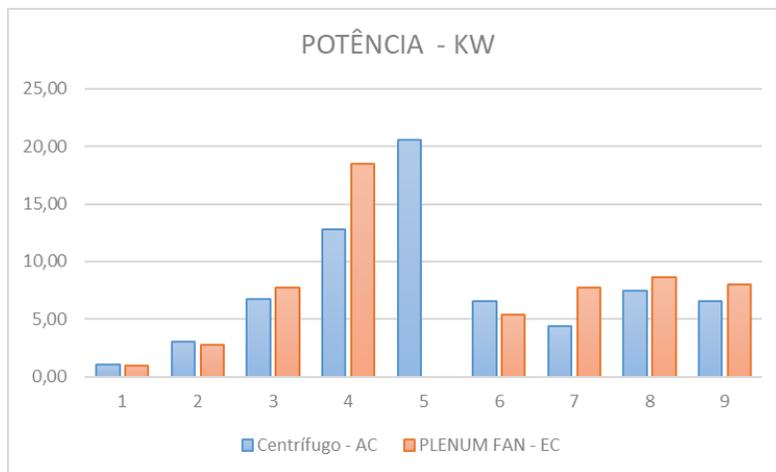


Figura 6. Gráfico de Potência dos Ventiladores Selecionados

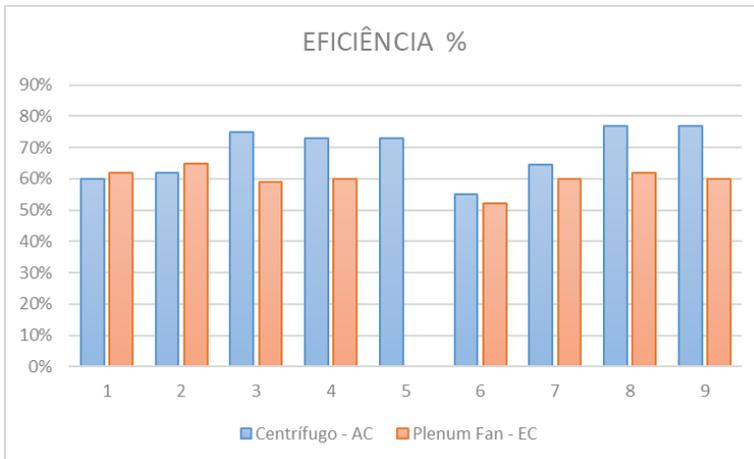


Figura 7. Gráfico de Eficiência dos Ventiladores Selecionados

3.2 Manutenção

De maneira geral, a manutenção de um ventilador *plenum fan* EC é bem distinta quando comparada à de um ventilador centrífugo que utiliza polia e correia e um motor convencional AC para seu funcionamento. Será feita abaixo uma breve descrição dos principais componentes de cada tipo de ventilador e, após, será realizada uma comparação entre a manutenção de um e outro, a fim de identificar qual modelo tem uma manutenção mais simplificada e qual equipamento permite a instalação em um maior tempo de disponibilidade para operar.

Ventiladores *Plenum Fan* EC: Estes ventiladores apresentam baixo número de componentes, tanto componentes diretos (do próprio ventilador) quanto componentes indiretos, que serão instalados para acionamento e proteção dos mesmos. Basicamente, é possível listar que estes equipamentos são compostos por: rotor, motor EC acoplado diretamente ao rotor e sua base de fixação. Todos componentes de acionamento e proteção como inversores, relés de segurança já são integrados à placa eletrônica acoplada ao motor. Sendo assim, a manutenção preventiva deste tipo de equipamento pode ser considerada como dispensável, a não ser por eventuais limpezas que se fizerem necessárias, visto que, quando o motor ou a placa apresentar falha, a solução imediata é a troca do mesmo e não qualquer reparo. Conforme verificado no catálogo dos fabricantes, esta tecnologia tende a apresentar uma vida útil superior a 40 mil horas em condições normais de operação.

Ventiladores Centrífugos Polia e Correia com motor AC: Possuem maior número de componentes quando comparado ao modelo anterior. Os principais componentes desta tecnologia são: rotor, voluta do ventilador, motor AC, polias, correias, mancais e rolamentos e componentes anti-vibração. Sem dúvida alguma, os componentes que mais sofrem desgastes são as polias e correias. Sobretudo no caso das correias não é possível

precisar com exatidão qual o tempo de vida útil das mesmas, porém rotineiramente elas devem ser inspecionadas visualmente a fim de constatar desgastes excessivos e também tensionadas, quando constatado que estão folgadas.

Com o objetivo de compararmos a manutenção dos ventiladores, foram coletados dados reais junto ao departamento de PCM de uma grande indústria farmacêutica, onde há em seu parque fabril tanto ventiladores centrífugos convencionais, quanto ventiladores plenum fan com motores EC. A tabela abaixo tem por objetivo apresentar as manutenções que são feitas nestes equipamentos. Com base nestes dados, será possível mensurar o tempo gasto anualmente em manutenção, com a intenção de se identificar qual dos dois tipos tem o menor HHT (planejado), para manutenções.

CHECK LIST DE MANUTENÇÃO							
DESCRIÇÃO	VENTILADOR CENTRÍFUGO LIMIT LOAD DE POLIA E CORREIA COM MOTOR AC			PLENUM FAN COM MOTOR EC			QTD. HORAS PARA EXECUÇÃO
	MENSAL	TRIMESTRAL	ANUAL	MENSAL	TRIMESTRAL	ANUAL	
Lubrificar mancais		X			X		0,5
Lubrificar rolamentos		X			X		0,5
Verificar acoplamentos	X				X		0,5
Efetuar limpeza do rotor	X						1
Efetuar limpeza do ventilador	X						1
Verificar ruídos de rolamentos e vibrações anormais		X			X		0,5
Medição de vibração do rotor			X			X	0,5
Checar protetor de polias e correias		X					0,5
Verificar polia (observar possíveis folgas entre a chaveta e a polia, verificar se não está desgastada, com trincas, amassada, quebrada e se está bem fixada ao eixo)	X						0,5
Verificar alinhamento, rachaduras e desgaste da correia de tração	X						0,5
Tensionar correias	X						0,5
Checar pintura e integridade do ventilador		X					0,5
Checar coxins antivibratórios		X			X		0,5
Efetuar reaperto nos parafusos de fixação do motor elétrico		X					0,5
Efetuar reaperto nos parafusos de fixação dos mancais do rolamento do ventilador		X					0,5
Megar motor. Acoplar monômetro entre bobinas e entre bobinas e carcaça, registrar menor valor	X						0,5
Verificar integridade e fixação dos cabos de ligação	X			X			0,5
TOTAL DE HORAS ANUAIS GASTAS EM MANUTENÇÃO		76,5			7,0		

Tabela 4. Check List de Manutenção

Fonte: Plano de manutenção unidades de tratamento de ar Reintech. / Indústria Farmacêutica.

Após o levantamento, se pode observar que os ventiladores centrífugos possuem mais itens a serem verificados em comparação com os ventiladores *plenum fan* EC. Da

mesma maneira, a periodicidade das verificações e intervenções são menores, o que resulta em uma quantidade de horas planejadas anualmente para manutenção bem superior. Percentualmente, a economia de HHT, quando se tem um ventilador EC em vez de um centrífugo convencional, pode chegar a 91,5%, tomando como base o plano de manutenção aqui apresentado.

3.3 Custo de implantação

Para o comparativo de custos entre as duas tecnologias, foi realizado junto a fornecedores o levantamento dos custos de aquisição dos ventiladores centrífugos convencionais e dos *plenum fan* EC, a fim de se determinar uma média de diferença de valor entre as duas tecnologias. Após isto, foi realizado um levantamento dos custos (datado em setembro de 2021), inerentes à instalação de cada ventilador, bem como o custo de substituição de ventiladores antigos por novos de tecnologia EC, para o caso de *retrofit* de equipamentos existentes. Para o levantamento de custos, foram usados os mesmos pontos de operação da comparação de eficiência e potência instalada. Seguem abaixo valores encontrados:

VALOR DE AQUISIÇÃO DOS VENTILADORES	
VENTILADOR CENTRÍFUGO <i>LIMIT LOAD</i> - MOTOR AC	VENTILADOR <i>PLENUM FAN</i> - MOTOR EC
R\$ 95.786,87	R\$ 160.000,00

Tabela 5. Valor de Aquisição

Com base nos dados obtidos, foi possível observar uma diferença média de 67% no valor dos ventiladores. Para este cálculo comparativo, será considerado os seguintes valores médios de instalação elétrica e automação para instalação dos ventiladores. Estes valores foram obtidos através de valores médios do mercado e de instalações reais com escopo semelhantes.

ITEM	VENTILADOR CENTRÍFUGO <i>LIMIT LOAD</i> - MOTOR AC	VENTILADOR <i>PLENUM FAN</i> - MOTOR EC
Painel Elétrico	R\$ 25.000,00	R\$ 10.000,00
Inversor de Frequência	R\$ 50.400,00	R\$ -
Dispositivos de Proteção	R\$ 10.800,00	R\$ 4.500,00
TOTAL	R\$ 86.200,00	R\$ 14.500,00

Tabela 6. Valor de Componentes Elétricos

Sendo assim, conforme tabela abaixo, se pode observar o custo total de implantação de cada tecnologia:

ITEM	VENTILADOR CENTRÍFUGO LIMIT LOAD - MOTOR AC	VENTILADOR <i>PLENUM FAN</i> - MOTOR EC
AQUISIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	R\$95.786,87	R\$160.000,00
CUSTOS DE INSTALAÇÃO ELÉTRICA	R\$86.200,00	R\$14.500,00
TOTAL	R\$181.986,87	R\$174.500,00

Tabela 7. Valor Total de Aquisição e Instalação

Para casos de instalações existentes, foi levantado o custo médio para realizar o *retrofit* (substituição de ventiladores antigos por novos de tecnologia EC)

ITEM	VALOR MÉDIO DE EXECUÇÃO
<i>Retrofit</i> Ventiladores Centrífugos AC por <i>Plenum Fan</i> EC	R\$ 60.000,00

Tabela 8. Valor para *Retrofit* de Equipamentos Existentes

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos resultados encontrados, foi possível observar que:

- Ventiladores *plenum fan* com motores EC são mais eficientes e demandam menor carga elétrica quando operam em pressões e vazões mais baixas, como as observadas nos pontos 1 e 2, e que à medida que estes dois fatores vão aumentando, há uma equiparação e até uma inversão da eficiência destes ventiladores quando comparados com ventiladores centrífugos convencionais. Além disso, em alguns casos de alta pressão, a nova tecnologia sequer consegue atender os pontos de seleção, como no caso do ponto 5.
- Ventiladores *plenum fan* com motores EC demandam manutenção muito inferior àquela observada nos ventiladores de polia e correia, chegando a uma diferença de até 91,5% no tempo gasto em manutenção no caso estudado, o que confere a estes equipamentos robustez e confiabilidade muito maiores, o que em indústrias, *data centers*, entre outras, é um fator de extrema importância.
- O custo de aquisição dos ventiladores *plenum fan* é superior ao de ventiladores centrífugos (em média 60% nos casos aqui estudados), porém este custo praticamente se equipara quando consideramos a economia que sem tem na montagem dos painéis elétricos de alimentação, uma vez que estes equipamentos não necessitam de inversores de frequência e dispositivos de proteção, que oneram bastante as instalações. Considerando os custos de instalação, o

ventilador *plenum fan* chegou neste estudo a ser até 4% mais barato para sua implantação, o que em termos práticos significa que as duas tecnologias se equivalem em termos de custos iniciais.

5 | CONCLUSÃO

É possível concluir ao final deste artigo que não é correto dizer que os ventiladores *plenum fan* EC são mais eficientes e sempre são as melhores opções para aplicações de climatização. Isso porque há uma variação muito grande de resultado conforme cada ponto de operação em que cada ventilador vai trabalhar. Mas é possível observar que é uma tecnologia superior e que em processos de alta criticidade conferem ao sistema uma confiabilidade muito maior aos sistemas. Quanto ao custo, mesmo que os ventiladores EC tenham um custo inicial de aquisição maior, este custo é compensado pela economia que se tem na montagem dos painéis elétricos.

A conclusão final é que as duas tecnologias são eficazes e importantes para o mercado de climatização, e que a escolha entre cada uma deve sempre ser feita estudando caso a caso e analisando os prós e contras de cada um para determinada aplicação. Mas é importante ressaltar que a solução de ventiladores com motores EC se mostra como uma tecnologia com potencial de oferecer boa eficiência, robustez e confiabilidade por um custo que não destoa significativamente quando considerado a instalação como um todo e que, portanto, em determinadas aplicações críticas, pode ser a mais indicada.

REFERÊNCIAS

COSTA, ENNIO, CRUZ. Ventilação. 1º Edição. São Paulo: Blucher, 2005.

CREDER, H. Instalações de Ar Condicionado. 6º Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 2004.

FEG.UNESP, 2021. Classificação dos Ventiladores. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/nestorproenzaperez/sfm-2014-aula-23.pdf/>. Acessado em 01/07/2021.

MACINTYRE, A. J. Ventilação Industrial e Controle da Poluição. 2º Edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1990.

MOTOR POLIA E CORREIA X TECNOLOGIA EC MOTOR ACOPLADO. Artigo técnico. Disponível em: https://www.ebmpapst.com.br/media/content/technical_support/technical_data/BT_Ed16_Polia_e_Correia_x_Tecnologia_EC~1.pdf. Acessado em 13/09/2021.

OTAM, 2021. Dados técnicos equipamento Ventiladores Centrífugos Industriais. Disponível em: <https://solerpalau.com.br/>. Acessado em 10/07/2021.

VENTILADORES ELETRÔNICOS E OS PRINCIPAIS BENEFÍCIOS EM SISTEMAS DE AR
CONDICIONADO E REFRIGERAÇÃO. Disponível em: [https://www.abrava.com.br/palestradnpc18/
c5brunoziehlabegg.pdf.pdf](https://www.abrava.com.br/palestradnpc18/c5brunoziehlabegg.pdf.pdf). Acessado em 13/09/2021.

ZIEHL-ABEGG, 2021. Dados técnicos equipamento Ventiladores EC. Disponível em: [https://www.ziehl-
abegg.com/pt-br](https://www.ziehl-abegg.com/pt-br). Acessado em 05/07/2021.

CAPÍTULO 6

DISEÑO DE MECANISMOS Y ESTRUCTURA PARA EL ANIMATRÓNICO DEL DINOSAURIO TRICERATOPS

Data de aceite: 10/01/2022

Roberto Carlos García Gómez

Profesor investigador del departamento de metal-mecánica, del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México

Hernán Valencia Sánchez

Profesor investigador del departamento de metal-mecánica, del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México

Juan Carlos Niños Torres

Profesor investigador del departamento de metal-mecánica, del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México

Mario Alberto Cruz Padilla

Profesor investigador del departamento de metal-mecánica, del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México

Fernando Alfonso May Arriola

Profesor investigador del departamento de metal-mecánica, del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México

RESUMEN: Este trabajo describe el diseño de un sistema músculo-esquelético animatrónico de un dinosaurio de la especie Triceratops en una escala de 1:10. El diseño se realizó a partir de las especificaciones objetivo que presentó

el solicitante. Estos requisitos funcionales incluyeron nueve grados de libertad accionados mediante nueve mecanismos para abrir la boca y los ojos, subir y girar el cuello, subir y bajar el torso para simular respiración, mover una extremidad delantera y tres movimientos de cola. El diseño resultante fue evaluado mediante simulaciones dinámicas y cinemáticas y como resultado, se seleccionaron los actuadores que ejecutan los movimientos y la dimensión de la estructura. Se realizó además, un análisis de esfuerzos a varios elementos mecánicos para lograr una estructura robusta que cumpliera con los requisitos funcionales solicitados.

PALABRAS CLAVE: Animatrónico, diseño, estructura, triceratops.

ABSTRACT: This work describes the design of an animatronic musculoskeletal system of a Triceratops dinosaur on a scale of 1:10. The design was made from the specifications submitted by the applicant. These functional requirements included nine degrees of freedom actuated by nine mechanisms to open the mouth and eyes, raise and turn around the neck, raise and lower the torso to simulate breathing, move a front limb, and three tail movements. The resulting design was evaluated by dynamic and kinematic simulations and as a result, actuators running movements and dimensions of the structure were selected. In addition, a stress analysis was carried out on various mechanical elements to achieve a robust structure that met the functional requirements requested.

KEYWORDS: Animatronic, design, structure, triceratops.

INTRODUCCIÓN

Bajo los desarrollos de la robótica, aparecen una metodologías para recrea el movimiento de seres vivos mediante el uso de mecanismos robóticos o electrónicos [1] [2] [3], denominada animatrónica [4] [3]. El cual, ha tenido un amplio uso en varias industrias, especialmente en aquellas relacionadas con el entretenimiento [5] tales como: producciones cinematográficas [6], teatrales [7] y parques temáticos. El primer animatrónico para fines de entretenimiento fue construido por Disney en 1960 [8]. Hoy en día el uso de estos equipos es tan variado que los localizamos en: terapias médicas [9] [2], juguetes [10] y museos [11]. Buscando que los espectadores se sumerjan en un entorno controlado para que la experiencia que estén desarrollando sea lo más parecidas a la realidad [12].

Bajo este contexto, el Museo Chiapas de Ciencias y Tecnología (MUCH), se planteó la construcción de un animatrónico para ser utilizado en una exposición en un diorama de la era jurásica, el cual contará con diferentes representaciones de dinosaurios de la zona; el cuál se implementará en el MUCH, que se encuentra ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México. Este artículo hablara de un animatrónico que emulará a un triceratops, el cual fue dinosaurios herbívoros, que vivieron desde finales del Jurásico hasta finales del Cretácico, hace desde 165 a 70 millones de años. Derivado del griego tri-kéras-ops, hace alusión a su rasgo más dominante: tres cuernos en la cara. Medía tres metros de altura y al menos nueve metros de largo [13], esta especie de dinosaurio habitaba esta zona geográfica.

En este trabajo, se describe el diseño de los mecanismos y la estructura de este animatrónico, el cual reproduce las características físicas que debió poseer el dinosaurio; este diseño fue realizado utilizando dimensiones reales y cuenta con nueve grados de libertad.

METODOLOGÍA

La metodología que se emplea prevé la capacidad de combinar ideas, principios científicos, recursos y, a menudo, productos existentes en la solución de un problema. Esta capacidad de generar soluciones es el resultado de un enfoque organizado y ordenado para abordar el problema, el cual se conoce como proceso de diseño. El proceso de diseño que conduce a la fabricación, ensamblaje, mercadotecnia, servicio y las diversas actividades necesarias para crear un producto exitoso se compone de varias etapas fáciles de reconocer [14]. Aunque muchos grupos industriales las pueden identificar de un modo distinto, un procedimiento conveniente para el diseño de un producto nuevo o mejorado se divide en las siguientes cinco etapas [15] [16].

1. Identificación del problema, necesidad o “cliente”.
2. Conceptos e ideas.

3. Consenso y análisis de soluciones.
4. Modelos y prototipos.
5. Dibujos de producción o funcionamiento.

Identificación del problema

Siguiendo el proceso metodológico, como primer paso se recopiló una serie de requerimientos y necesidades provenientes del cliente. Los datos iniciales fueron que el dinosaurio cumple con una escala 1:3 del tamaño real. Abarcaría un espacio inmóvil de: largo: 3.30 m, alto: 1.50 m, ancho: 1.0 m y cuando se mueva las dimensiones máximas serían: largo: 3.50 m, alto: 1.80 m, ancho: 1.20 m. De este procedimiento también se definió la cantidad de movimientos que debía tener el animatrónico, siendo estos: apertura de la mandíbula, apertura de ojos, giro de la cabeza, extensión vertical del cuello, movimiento horizontal del cuello, movimiento de dos grados de movilidad de una extremidad frontal, ascenso descenso del torso, ascenso descenso de la cola y dos movimientos independientes de la cola en el plano horizontal del robot, es importante mencionar que estas características fueron similares a otro animatrónico que se diseñaría con la finalidad de integrar el diorama. Posteriormente, todas las necesidades definidas inicialmente fueron interpretadas para tecnificar todos los requerimientos y de esta forma iniciar el diseño del animatrónico. Las especificaciones objetivo conseguidas a partir de las necesidades iniciales se listan en la Tabla 1, la cual muestra principalmente los valores ideales y valores marginales de las métricas que permiten cuantificar estas especificaciones. También se muestra una columna donde se jerarquizan estas métricas de acuerdo a la importancia que posee una especificación respecto al grado de satisfacción global de las necesidades que pretende suplir este diseño [17].

Métrica	Importancia	Unidad	Valor marginal	Valor Ideal
Masa Total	3	Kg	<100	<40
Emisión de sonidos (característico del Dinosaurio)	5	dB	>90	>110
Cantidad de movimientos en el mecanismo	5	Adimensional	7	10
Apariencia semejante a un dinosaurio	4	Subj.	3-4	5
Costo unitario de manufactura	4	\$	<450000	<350000
Tiempo necesario para realizar mantenimiento.	3	Min	<240	<180
No representa riesgo humano	5	Subj.	4	5
Volumen	4	m ³	8	7
Velocidad de movimientos	5	mm/s	5	3
Factor de seguridad	4	Adimensional	1.5	2.5

Nota: La expresión Subj. Hace referencia a un valor subjetivo que se calcula mediante la realización de una encuesta de aceptación por parte del público, en una escala que va entre 1 y 5. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1 Especificaciones objetivo empleadas para la selección del concepto.

Generación de conceptos e ideas

A raíz de la información previa se inició el proceso de generación de conceptos para lo cual se presentaron una serie de alternativas de solución para cada uno de los movimientos solicitados que permitiesen cumplir las especificaciones previamente definidas. Estas opciones se fundamentan en la selección de diferentes elementos estructurales, mecanismos, actuadores y elementos mecánicos para la transmisión de potencia. Todos estos elementos estarán dispuestos estratégicamente dentro de una estructura rígida fabricada con perfiles cilíndricos y estructurales de aluminio idealmente para cumplir con los requerimientos de peso. Por ejemplo, en la Figura 1 y 2, describen 2 mecanismos propuestos para el movimiento de flexión vertical del cuello del animatrónico.

Asimismo, para los demás mecanismos se desarrollaron diferentes alternativas: dos para la apertura de la boca, dos para la flexión y dos para el giro de la cabeza, dos para la flexión horizontal del cuello, dos para ascenso y descenso del torso, dos para el giro de los brazos y dos para el movimiento de la cola. Posteriormente, se realizó una combinación entre las distintas alternativas desarrolladas para cada mecanismo con el propósito de obtener varios conceptos viables del animatrónico completo que pudiese cumplir con las características iniciales. Es importante acotar que la combinación de alternativas fue limitada a aquellas combinaciones posibles que permitieran generar una máquina coherente donde todos los mecanismos individuales puedan trabajar eficientemente en conjunto. Entonces, de todas las posibles combinaciones se obtuvieron tres conceptos denominados “viables”.

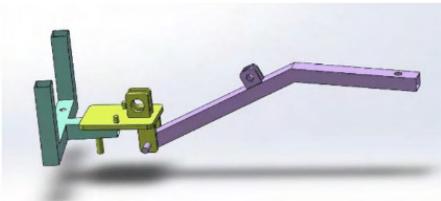


Figura 1 Opción 1 para el cuello del animatrónico.

Fuente propia.

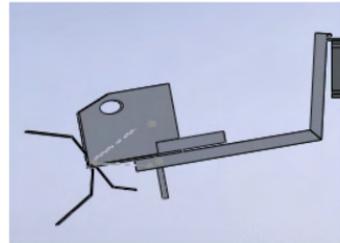


Figura 2 Opción 2 para el cuello del animatrónico.

Fuente propia.

Selección del concepto a desarrolla

En el mismo orden de ideas, el paso posterior de este proyecto fue la selección del concepto a desarrollar mediante el uso de matrices de decisión que sirven para evaluar cada concepto con respecto a los criterios de elección asociados a las especificaciones objetivo. Dicho proceso de selección se realizó en dos fases: la primera fase es denominada “filtrado de conceptos”, permitió aplicar una evaluación relativa donde cada concepto era

comparado respecto a los demás de acuerdo a los criterios de selección. En cada parámetro evaluado, el concepto podría obtener una calificación de: “mejor que” (+1), “igual a” (0), o “peor que” (-1), lo anterior es para cuantificar atributos cualitativos. Finalmente todas las calificaciones obtenidas por cada concepto fueron sumadas en una matriz de decisión que permitió diferenciar tres conceptos del resto cuyas características generales se listan en la Tabla 2.

La segunda fase realizó el proceso de evaluación cuantitativa donde los tres conceptos sobrevivientes fueron calificados para cada criterio de selección con una escala del 1 al 5, pero esas calificaciones fueron ponderadas de acuerdo al peso definido (en la primera sección de este artículo), para cada criterio (grado de importancia). Finalmente se totalizó la calificación obtenida para cada concepto (ver Tabla 3), resultando ser el concepto No. 3 el que satisface en mayor grado los criterios de selección.

En la Figura 3 se presenta esquemáticamente el concepto ganador con los mecanismos seleccionados después del proceso de evaluación, y en la Figura 4 se muestra el modelado CAD del animatrónico obtenido después de todo el proceso de dimensionamiento y selección de actuadores. Tanto el funcionamiento de este concepto como la selección de sus componentes se describirán a continuación.

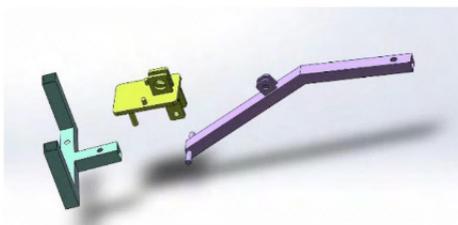


Figura 3 Esquemático del concepto ganador de mecanismos seleccionados en el cuello

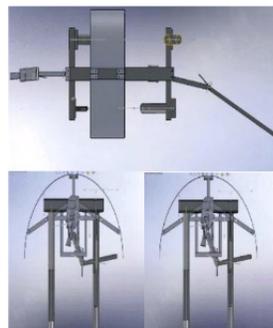


Figura 4 Modelado final del iguanodonte.

	Alternativas de solución		
Movimiento	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 5
Apertura de mandíbula	Cable unido a servomotor	Cable unido a servomotor	Sistema de resortes y cable unido a un pistón neumático
Apertura de ojos	Cable unido a servomotor	Cable unido a servomotor	Sistema de resortes y cable unido a un pistón neumático
Giro de cabeza	Servomotor acoplado a eje del cuello	Servomotor acoplado a eje del cuello	un pistón neumático acoplado a eje superior del cuello
Flexión y extensión de cuello	Cable unido a actuador lineal	Sistema de cables unido a servomotor	un pistón neumático acoplado a eje del cuello
Movimiento horizontal del cuello	Estructura pivotante unida a actuador lineal	Sistema de disco excéntrico	un pistón neumático acoplado a eje del cuello
Movimiento de la base de la cola horizontal cuello	Servomotor acoplado a sistema de engranajes	Servomotor acoplado a sistema de engranajes	un pistón neumático acoplado a un sistema de contrapesos
Movimiento de la base de la cola horizontal cuello	Mecanismo de barras y pasadores	Movimiento de una barra rígida	un pistón neumático acoplado a eje de la cola
Movimiento de la cola segunda sección	Sistema de cables y discos	Sistema de cables y discos	un pistón neumático acoplado a eje de la cola
Ascenso del torso	Actuador lineal acoplado a la estructura	Actuador lineal acoplado a la estructura	Actuador lineal acoplado a la estructura
Movimiento de la extremidad frontal	Mecanismo de barras y pasadores	Movimiento de una barra rígida	Sistema de resortes y cable unido a un pistón neumático

Tabla 2. Descripción de movimientos en los conceptos a ser valorados en evaluación cuantitativa

Criterios de selección	Peso (%)	Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3	
		Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada
Ligero de peso	5.76	3	0,1728	4	0,2304	3	0,1728
Sonidos similares a Iguanodonte	9.61	5	0,4805	5	0,4805	5	0,4805
Ejecución 10 movimientos	9.61	5	0,4805	5	0,4805	5	0,4805
Semejanza a la realidad	7.69	3	0,2307	3	0,2307	4	0,3076
Es económico	7.69	2	0,1538	3	0,2307	2	0,1538
Es duradero	5.76	3	0,1728	3	0,1728	4	0,2304
Fácil traslado	5.76	3	0,1728	3	0,1728	3	0,1728
Fácil mantenimiento y limpieza	5.76	4	0,2304	4	0,2304	4	0,2304
Seguro para el publico	9.61	5	0,4805	5	0,4805	5	0,4805
Se adecua a los recursos	7.69	5	0,3845	5	0,3845	5	0,3845
Realiza movimientos sutiles	9.61	4	0,3844	4	0,3844	5	0,4805
Es de fácil accionamiento	7.69	4	0,3076	4	0,3076	4	0,3076
Resistente	7.69	4	0,3076	4	0,3076	4	0,3076
Total			3,9589		4,0934		4,1895

Tabla 3. Evaluación cuantitativa de tres conceptos preseleccionados.

Resultados (Modelos y prototipos)

Como resultado de los diferentes puntos previos de la metodología adoptada llegamos a la descripción de los mecanismos que conforman el concepto seleccionado requieren el modelado de piezas, simulaciones cinemáticas y dinámicas, esto se logró mediante el software SolidWORKS 2018; también se seleccionaron los actuadores y

componentes mecánicos. Para cada uno de los mecanismos evaluados se programó, al momento de realizar las simulaciones cinemáticas y dinámicas, un perfil de velocidades el cual tomó en consideración la variación de la velocidad en el arranque y la trayectoria seguida por el mecanismo.

De forma simultánea se realizaron cálculos tradicionales de diseño para tener un valor de referencia a fin de contrastar los datos obtenidos mediante simulaciones computacionales. Con esta información se seleccionaron los actuadores y se realizaron los análisis de esfuerzos sobre las piezas críticas para asegurar su resistencia. A continuación se muestran los mecanismos diseñados y los resultados de la simulación dinámica y análisis de esfuerzos en algunas piezas [18].

Mecanismo de la cola

Está compuesto por dos estructuras que forman la extremidad base de la cola del iguanodonte que tiene dos movimientos independientes y un extremidad final que proporciona una especie de vertebra adicional para un tercer grado de libertad. Los tres actuadores estarán montados en las estructuras y pivotados de en puntos que permitan el movimiento más fluido para fines demostrativos. En las figuras siguientes se muestra el análisis de cada etapa así como los resultados teóricos de los elementos más representativos del mismo.

La cola en sí, es una máquina, por lo tanto fue analizada como tal.



Figura 5 Modelo del mecanismo de la cola

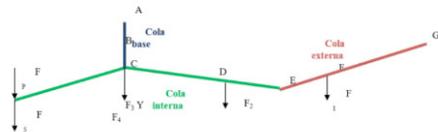


Figura 6 Equilibrio de la estructura de la cola

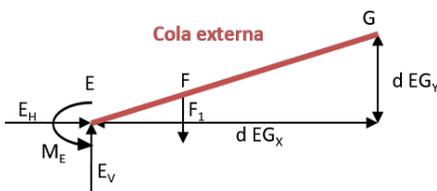


Figura 7 Equilibrio cola externa

F1	=	-115.4 N
d EG _x	=	0.8788 m
d EG _y	=	0.0904 m
RESULTADOS:		
E _v	=	115.4 N
E _H	=	373.9437 N
M _E	=	33.80451 N-m

de la cola, Fuerza del actuador: 267.87 N, Masa a desplazar: 27.4 Kg, Deflexión máxima aproximada: 0.2 mm. El resultado final se puede apreciar en la figura 9.



Figura 9 Desarrollo del diseño desde la estructura, mecanismo e integración final de la cola.

Mecanismo adicional de la estructura

Los mecanismos considerados en este animatrónico adicionales a la cola son: la cabeza con tres grados de libertad (ojos, mandíbula, desplazamiento horizontal), el cuello con dos grados de libertad (desplazamiento horizontal y vertical) y el torso con dos grados de libertad (respiración y el movimiento de la extremidad delantera). El procedimiento que se siguió para estos mecanismos es el mismo que se describió en la metodología. Por lo que solo presentaremos la síntesis de los resultados [19].

Los mecanismos de la cabeza tendrían los siguientes valores.

- Movimiento horizontal de la cabeza: Recorrido del actuador: 90.4 mm extender, Angulo de posición: 40° respecto a la paralela del eje centroidal del cuello, Fuerza del actuador: 120 N, Masa a desplazar: 18.1 Kg, Deflexión máxima aproximada: 8.44 mm. A manera de demostrar el resultado se muestra la figura 10 del desarrollo de esta sección.



Figura 10 Desarrollo del diseño desde la estructura, mecanismo e integración final de la cabeza.

- Movimiento de la mandíbula: Recorrido del actuador: 23.83 mm extender, Angu-

lo de posición: 46.61° respecto a la paralela del eje centroidal del cuello, Fuerza del actuador: 27 N, Masa a desplazar: 2.75 Kg, Deflexión máxima aproximada: 0.676 mm.

- Movimiento de los ojos: Recorrido del actuador: 7.54 mm extender, Angulo de posición: 25° respecto a la paralela del eje centroidal dela cabeza, Fuerza del actuador: 27 N, Masa a desplazar: 2.75 Kg, Deflexión máxima aproximada: 0.1 mm.

Los mecanismos del cuello dan los siguientes valores.

- Movimiento vertical del cuello: Recorrido del actuador: 100.5 mm extender, Angulo de posición: 13° respecto a la horizontal del cuello en la vista lateral, Fuerza del actuador: 845 N, Masa a desplazar: 86.2 Kg, Deflexión máxima aproximada: 9.3 mm
- Movimiento horizontal del cuello: Recorrido del actuador: 70.5 mm extender, Angulo de posición: 13° respecto a la vertical del cuello en la vista lateral, Fuerza del actuador: 845 N, Masa a desplazar: 86.2 Kg, Deflexión máxima aproximada: 9.3 mm

Los mecanismos del torso tienen los siguientes valores.

- Movimiento de simulación de la respiración: Recorrido del actuador: 68.8 mm extender, Angulo de posición: 90° respecto a la horizontal del torso en la vista frontal, Fuerza del actuador: 82.72 N, Masa a desplazar: 8.44 Kg, Deflexión máxima aproximada: 0 mm
- Movimiento de la extremidad frontal: Recorrido del actuador: 96.9 mm extender, Angulo de posición: 31° respecto a la vertical del torso, Fuerza del actuador: 102 N, Masa a desplazar: 10.41 Kg, Deflexión máxima aproximada: 8.55 mm

TRABAJO A FUTURO

Para culminar el animatrónico correspondiente al triceratops se debe desarrollar diversas secuencias de control robusto así como la instalación de los elementos para la comunicación electrónica inalámbrica; además de la construcción e implementación de un recubrimiento flexible, texturizado y realístico. Siguiendo una metodología similar a la reportada podríamos replicar algunas otras especies de dinosaurios para integrar al diorama jurásico del Museo.

CONCLUSIONES

Con la premisa de atender los requerimientos del cliente, se logró diseñar el animatrónico con dimensiones análogas al dinosaurio real en escala 1 a 3, con un peso de 68 kg Kg y un volumen 7.2 m^3 lo cual satisfizo las especificaciones de diseño (Tabla 1) puesto que permite que el equipo sea portable y liviano. El diseño integra un sistema de

audio, encargados de emitir los sonidos que son hoy en día aceptados como del dinosaurio, además se logró incluir la totalidad de los movimientos requeridos.

Adicionalmente, se seleccionaron perfiles, placas y láminas de acero comercial para la construcción del robot, lo que ayudó a aumentar su resistencia puesto que esta estructura deberá soportar todo el sistema de recubrimiento que en siguientes etapas se agregara, todo el sistema controlado por PLC no supera los 10000 USD; a su vez, se garantizó que todas las piezas diseñadas poseen un factor de seguridad superior a 2.0, dándole así la resistencia necesaria para soportar todas las cargas.

Por otro lado, todos los mecanismos fueron diseñados modularmente para facilitar los procesos de ensamblaje, mantenimiento o sustitución de elementos averiados. Para ello, se dispusieron de 3 puntos de acceso al espacio interno del animatrónico: una posterior en el área de la cola y una frontal que brinda acceso a los mecanismos del cuello y uno inferior por el área del torso.

Por tanto, se diseñó un animatrónico plenamente funcional conformado por un conjunto de mecanismos que le otorgan los 9 grados de libertad requeridos inicialmente. Actualmente el sistema se encuentra en las instalaciones del Museo Chiapas de Ciencia y Tecnología.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo del Tecnológico Nacional de México a través del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por las facilidades para desarrollar este proyecto, así como al Museo Chiapas de Ciencia y Tecnología por solicitarnos para atender este proyecto y al COCyTECH por el apoyo financiero para este proyecto.

REFERENCIAS

[1] A. O. Baturone, *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*, Madrid, España: Marcombo, 2005.

[2] R. J.G. y H. J. , «The Anatomical and Mechanical Bases of Human Motion.,» *Englewood Cliffs N.J.: Prentice Hall*, 1988.

[3] Y. D. Kapse, P. Sarangpure y J. Mohurle, «Animatronic.,» *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng*, pp. 266-269, 2016 vol. 5 Num 4.

[4] M. D'Addario, *Manual De Robtica Industrial: Fundamentos, Usos Y Aplicaciones*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.

[5] M. Smith y D. Buckley, «A Lifelike Robotic Policeman with Realistic Motion and Speech,» *Proceedings of the Symposium on Robotics, Mechatronics and Animatronics in the Creative and Entertainment Industries and Arts*, pp. 22-26, 2005.

- [6] G. Balmori Serrani, «Revista de Occidente,» *Rev. Occident.*, pp. 85-96, 2017 vol 436.
- [7] M. Sakashita, T. Minagawa, A. Koike, I. Suzuki, K. Kawahara y Y. Ochiai, «You as a Puppet: Evaluation of Telepresence User Interface for Puppetry,» *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 217-228, 2017.
- [8] A. I. Encinar Sáez, «La inteligencia artificial en el cine,» *CYL Digit*, pp. 28-31, 2015.
- [9] M. Zissu, «EVALUACIÓN BIOMECÁNICA DEL ATLETA DE ALTO RENDIMIENTO,» *Instituto Nacional de Deportes Universidad Pedagógica Experimental Libertador – IPC*, pp. 4-5, 2005- 2012.
- [10] V. M. Zatsiorky y W. J. Kraemer, *Science and Practice of Strength Training*, Human Kinetics.
- [11] P. Cárdenas y R. Parreño, «Diseño e implementación del sistema de control y audio de la maqueta animada del Allosaurio para el Museo de Historia Natural Gustavo Orcés V.,» *Escuela Politécnica Nacional, Venezuela*, 2017.
- [12] E. Jochum, P. Millar y D. Nuñez, «Sequence and chance: Design and control methods for entertainment robots,» *Rob. Auton. Syst.*, pp. 372-380, 2016 vol. 87.
- [13] O. John H., «Functional Morphology and Evolution of the Ceratopsian Dinosaurs,» *Society for the Study of Evolution*, vol. 20, n° 3, pp. 290-308, 1966.
- [14] J. Brall, *Design for manufacturability handbook.*, New York, London: McGraw-Hill., 1999.
- [15] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Mc Graw Hill, 2012.
- [16] J. Liedtka y T. Ogilvie, *Designing for Growth: A Design Thinking Tool Kit for Managers.*, Columbia: Columbia Business School Publishing, 2011.
- [17] R. P.J, *Taguchi Techniques for Quality Engineering. Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design.*, New York, EU.: McGraw-Hill International Editions, 1989.
- [18] B. P. Ferdinand, E. Russell Johnston, Jr, J. T. DeWolf y D. F. Mazurek, «diseño de ejes de transmisión,» de *Mecánica de materiales.*, Mc Graw Hill, 5ta. edición, pp. 165-168, 500-504.
- [19] K. Serowe y R. Steven, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.*, New York, EEUU: Prentice Hall, 2002.

ESTUDO DA POSIÇÃO DE UM MECANISMO DE QUATRO BARRAS POR MEIO DE UMA INTERFACE GRÁFICA DE USUARIO

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 08/10/2021

Vergara Hernández Erasto

Instituto Politécnico Nacional, UPIIH
San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

Pérez Millán Brenda Carolina

Instituto Politécnico Nacional, CECyT 19
Tecámac, Estado de México, México

Cea Montufar César Eduardo

Instituto Politécnico Nacional, UPIIH
San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

Yael Valdemar Torres Torres

Instituto Politécnico Nacional, UPIIH
San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

RESUMEN: En el presente trabajo se desarrolló un programa didáctico para realizar el análisis de la posición de un mecanismo genérico de cuatro barras. El programa se realizó mediante el análisis matemático de la ecuación de lazo cerrado del mecanismo y se implementó en la plataforma GUIDE de MATLAB a través de funciones programadas en el ambiente de MATLAB. El resultado permite al usuario encontrar de manera precisa las posiciones angulares y la configuración final del mecanismo de cuatro barras. El programa se validó aplicándolo a un grupo de alumnos de la materia de “Análisis y síntesis de mecanismos”, los resultados muestran una disminución para el tipo de solución requerida, convirtiendo al programa

en una herramienta poderosa de enseñanza y aprendizaje.

PALABRAS CLAVE: Mecanismo de cuatro barras, análisis de posición, análisis matemático.

STUDY OF THE POSITION OF A FOUR-BAR MECHANISM THROUGH A GRAPHICAL USER INTERFACE

ABSTRACT: In this work, a didactic program was developed to perform the analysis of the position of a generic mechanism of four bars. The program was carried out through the mathematical analysis of the closed loop equation of the mechanism and was implemented in the GUIDE platform of MATLAB through functions programmed in the MATLAB environment. The result allows the user to find precisely the angular positions and the final configuration of the four-bar mechanism. The program was validated by applying it to a group of students in the subject of “Analysis and synthesis of mechanisms”, the results show a decrease for the type of solution required, and the program is a powerful teaching and learning tool.

KEYWORDS: Four linkage, analysis position, mathematical analysis.

1 | INTRODUCCIÓN

Los recientes avances en el desarrollo de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) han sido por muy importantes en los procesos de enseñanza y aprendizaje; actualmente los estudiantes de diferentes niveles se inclinan más hacia las tecnologías

digitales basadas en los sistemas computacionales. En el área de la enseñanza las TIC han permitido implementar distintas teorías y modelos de aprendizaje tanto en cursos teóricos como en prácticos. El uso de las TIC en la educación promueve de manera dinámica el aprendizaje autónomo, el aprendizaje centrado en el estudiante, la resolución de problemas, el aprendizaje cooperativo, colaborativo y social permitiendo finalmente llegar a obtener en los alumnos un aprendizaje integrado.

El uso de las TIC en el área de la ingeniería mecánica se presenta como una herramienta muy poderosa en el proceso de enseñanza y de formación de los alumnos, atendiendo a lo anterior, el uso de las TIC para facilitar la asimilación del conocimiento y de las técnicas utilizadas en el aprendizaje del análisis de mecanismos se presenta como un área de oportunidad dentro del proceso formativo de profesionistas y técnicos, que al tener que realizar cálculos repetitivos y complejos, el alumno pueda llegar a cometer errores al visualizar e interpretar datos de manuales, libros o figuras.

En el estudio de los mecanismos es importante realizar un análisis de posición de cada uno de sus miembros. Para definir la posición de un cuerpo rígido, es necesario especificar no solo sus coordenadas de origen (x,y) , sino también su longitud y su orientación en el espacio. Existen diferentes métodos para realizar el análisis de posición de un mecanismo, el método más básico es el gráfico, donde a través de un dibujo a mano o con algún software de diseño asistido por computadora (CAD) se caracteriza completamente la posición de los eslabones de un mecanismo, sin embargo, el método gráfico es un método que conlleva mucho tiempo de procesamiento y no es factible para la medición de posiciones en múltiples ubicaciones.

Aunque el método gráfico para analizar la posición de un mecanismo es simple y directo, los resultados más precisos se obtienen a través del método analítico. En el método analítico se requiere el desarrollo de las ecuaciones para obtener las posiciones angulares de salida en función de las longitudes de los eslabones y del valor de la posición angular de entrada.

Un mecanismo de cuatro barras es el mecanismo móvil más simple utilizado en el diseño de máquinas. El mecanismo de cuatro barras consiste de cuatro cuerpos rígidos llamados barras o eslabones con un eslabón fijo. Los cuatro eslabones están unidos mediante pivotes o revolutas para formar un lazo cerrado.

En este trabajo se crea una herramienta computacional didáctica para ayudar a los estudiantes que cursen alguna materia de “análisis y síntesis de mecanismos” a fortalecer los conocimientos necesarios para el análisis de posición de un mecanismo de cuatro barras.

2 | DESARROLLO

2.1 Análisis matemático

En el presente trabajo se realizó un programa en el ambiente gráfico GUIDE de Matlab tal que permita al estudiante conocer las posiciones del mecanismo genérico de cuatro barras que se muestra en la Figura 1, como punto de partida, se tiene el análisis de la ecuación de lazo cerrado del mecanismo a través del diagrama de variable compleja representado en la Figura 2.

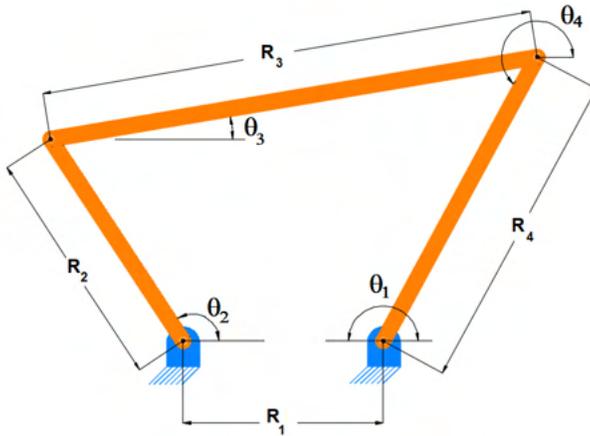


Figura 1.- Configuración de mecanismo de cuatro barras a estudiar

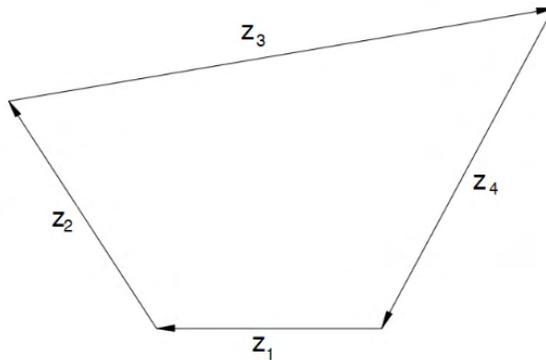


Figura 2.- Representación en variable compleja del mecanismo a estudiar.

$$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = 0 \quad (1)$$

dónde la representación en forma exponencial para los números complejos de cada eslabón es:

$$z_n = R_n e^{i\theta_n}$$

Las variables en la ecuación de lazo cerrado son las longitudes de los cuatro eslabones: R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , así como también las posiciones angulares de los cuatro eslabones representadas por $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ y θ_4 . El sistema de referencia se toma tal que $\theta_1 = \pi$. Para resolver la ecuación (1) se deben de presentar por máximo dos incógnitas y así poder resolverse algebraicamente (parte real y parte imaginaria) la ecuación 1. El análisis de posición para esta configuración de cuatro barras presenta 4 diferentes casos, en donde z_1 y z_2 son variables conocidas.

Caso 1. Dos longitudes (R_3 y R_4) desconocidas

La solución la ec.1 en este caso queda determinado por la ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} R_3 \\ R_4 \end{bmatrix} = -\frac{1}{\text{sen}(\theta_4 - \theta_3)} \begin{bmatrix} \text{sen}\theta_4 & -\text{cos}\theta_4 \\ -\text{sen}\theta_3 & \text{cos}\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \text{cos}\theta_1 + R_2 \text{cos}\theta_2 \\ R_1 \text{sen}\theta_1 + R_2 \text{sen}\theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Caso 2. Una longitud y un ángulo desconocido

Caso 2a. Longitud y ángulo desconocidos del mismo eslabón.

Suponiendo que son desconocidos R_3 y θ_3 . Matemáticamente la solución de este caso es trivial y queda representada por la ecuación 3

$$z_3 = -(z_1 + z_2 + z_4) \quad (3)$$

Caso 2b. Longitud y ángulo desconocidos de eslabones diferentes.

Suponiendo que R_4 y θ_3 sean las variables buscadas, entonces la solución de la ecuación de lazo cerrado queda expresada por la ecuación 4

$$R_4 = -R_1 \text{cos}(\theta_1 - \theta_4) - R_2 \text{cos}(\theta_2 - \theta_4) \pm \frac{\sqrt{1-q^2}}{q} [R_1 \text{sen}(\theta_1 - \theta_4) - R_2 \text{sen}(\theta_2 - \theta_4)] \quad (4)$$

dónde:

$$q = \text{sen}(\theta_3 - \theta_4) \quad (5)$$

$$\text{sen}(\theta_3 - \theta_4) = \frac{-R_1 \text{sen}(\theta_1 - \theta_4) - R_2 \text{sen}(\theta_2 - \theta_4)}{R_3} \quad (6)$$

Y la solución quedará en dependencia de las ecuaciones (4)-(6)

Caso 3. Dos posiciones angulares desconocidas.

Suponiendo que las posiciones θ_3 y θ_4 son las variables a encontrar, la solución de la ecuación (1) será dos grupos de ecuaciones válidas, el primer grupo son las ecuaciones. (7) – (8):

$$\theta_3 = \theta_T + \text{cos}^{-1} \left(\frac{R_4^2 - R_T^2 - R_3^2}{2R_T R_3} \right) \quad (7)$$

$$\theta_4 = \theta_T + 2\pi - \text{cos}^{-1} \left(\frac{R_3^2 - R_T^2 - R_4^2}{2R_T R_4} \right) \quad (8)$$

Y el segundo par de soluciones son las ecuaciones (9) – (10): es:

$$\theta_3 = \theta_T + 2\pi - \cos^{-1} \left(\frac{R_4^2 - R_T^2 - R_3^2}{2R_T R_3} \right) \quad (9)$$

$$\theta_4 = \theta_T + \cos^{-1} \left(\frac{R_3^2 - R_T^2 - R_4^2}{2R_T R_4} \right) \quad (10)$$

dónde:

$$Z_T = R_T e^{i\theta_T} = R_1 e^{i\theta_1} + R_2 e^{i\theta_2} \quad (11)$$

2.2 Diagrama de flujo y algoritmo

Para la programación de la aplicación se realizó y discutió el diagrama de flujo de las operaciones necesarias, el cual se muestra en la Figura 3. El inicio del programa es mediante la selección del sistema de medición de las posiciones angulares del mecanismo a estudiar (grados sexagesimales o radianes). El siguiente paso en la estructura del programa es seleccionar alguno de los 3 casos de estudio (4 con el caso 2b), luego entonces se procede a pedir las variables de entradas necesarias para realizar el cálculo de las dos posibles incógnitas en dependencia del caso de estudio, en este paso es necesario convertir las variables tipo *string* a variables *numéricas* para su tratamiento matemático. Con el caso establecido se recurre a programar las ecuaciones (2), (4), (6), (9) y (10) para encontrar las incógnitas particulares, como se muestra en la Figura 4.

Para mostrar el gráfico final del mecanismo de cuatro barras que se estudia, se utilizaron funciones de trazado de líneas a través de dos puntos, estableciendo para cada línea un origen relativo al eslabón anterior, y dibujando los eslabones de colores diferentes: rojo, amarillo, azul y verde para una mejor identificación, tal como se muestra en la Figura 5

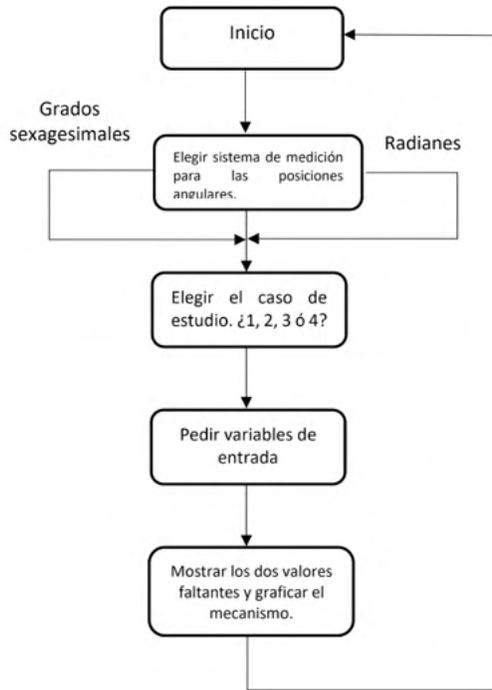


Figura 3.- Diagrama de flujo del programa desarrollado para análisis de posición de mecanismo de cuatro barras

```

function Resolver Callback(hObject, eventdata, handles)

cla(handles.axes1, 'reset') } Esta línea limpia el axes para poder graficar sin que los datos se sobrescriban

L1=str2num(get(handles.Longitud1, 'string'));
L2=str2num(get(handles.Longitud2, 'string'));
A1=str2num(get(handles.Angulo1, 'string'));
A2=str2num(get(handles.Angulo2, 'string'));
A3=str2num(get(handles.Angulo3, 'string'));
A4=str2num(get(handles.Angulo4, 'string')); } Esta parte del código convierte las variables tipo string
dadas por el usuario en datos numéricos que pueden ser
utilizados por la interfaz para realizar los cálculos necesarios

L3=(-1/(sind(A4-A3)))*(((sind(A4)*(L1*cosd(A1)+L2*cosd(A2)))+(-cosd(A4)*(L1*sind(A1)+L2*sind(A2)))));
L4=(-1/(sind(A4-A3)))*((-sind(A3)*(L1*cosd(A1)+L2*cosd(A2)))+(cosd(A3)*(L1*sind(A1)+L2*sind(A2)))));

axes(handles.axes1);
set(handles.Longitud3, 'string', num2str(L3)) } Este par de líneas fija los resultados de las
set(handles.Longitud4, 'string', num2str(L4)) } operaciones anteriores en el espacio asignado

dx1=L2*cosd(A2);
dy1=L2*sind(A2);
dx2=L3*cosd(A3);
dy2=L3*sind(A3);
dx3=L4*cosd(A4);
dy3=L4*sind(A4);
dx4=L1*cosd(A1);
dy4=L1*sind(A1); } Esta parte del código sirve para determinar las
magnitudes de la longitud de los eslabones
x1= [0, dx1];
x2= [0+dx1, 0+dx1+dx2];
x3= [0+dx1+dx2, 0+dx1+dx2+dx3];
x4= [0+dx1+dx2+dx3, 0];
v1= [0, dvl1];

```

Figura 4.- Código para la adquisición de variables y cálculo de incógnitas

```

93 - set(handles.Longitud3,'string',num2str(L3))
94 - set(handles.Longitud4,'string',num2str(L4))
95 - dx1=L2*cosd(A2);
96 - dy1=L2*sind(A2);
97 - dx2=L3*cosd(A3);
98 - dy2=L3*sind(A3);
99 - dx3=L4*cosd(A4);
100 - dy3=L4*sind(A4);
101 - dx4=L1*cosd(A1);
102 - dy4=L1*sind(A1);
103 - x1= [0, dx1];
104 - x2= [0+dx1, 0+dx1+dx2];
105 - x3= [0+dx1+dx2, 0+dx1+dx2+dx3];
106 - x4= [0+dx1+dx2+dx3,0];
107 - y1= [0, dy1];
108 - y2= [0+dy1, 0+dy1+dy2];
109 - y3= [0+dy1+dy2, 0+dy1+dy2+dy3];
110 - y4= [0+dy1+dy2+dy3, 0];
111 - hold on
112 - grid on
113 - axis off
114 - plot(x4, y4, 'r', 'LineWidth',3);
115 - plot(x1, y1, 'y', 'LineWidth',3);
116 - plot(x2, y2, 'b', 'LineWidth',3);
117 - plot(x3, y3, 'g', 'LineWidth',3);
118 - legend('Eslabón R1','Eslabón R2','Eslabón R3','Eslabón R4','Location','NorthWestOutside');
119
120 - function Longitud3_Callback(hObject, eventdata, handles)
121
122 - function Longitud3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

Esta parte del código se encarga de reasignar los puntos de comienzo del vector que será la representación en el axes de cada eslabón

Estas líneas se encargan de graficar cada uno de los eslabones

Figura 5.- Código realizado para el trazado del mecanismo de cuatro barras

2.3 Interfaz gráfica

En el desarrollo de la interfaz gráfica se buscó que fuera muy amigable con el usuario, obteniéndose al final solo dos ventanas principales. La primera ventana es la de inicio y permite seleccionar el tipo de caso requerido y el sistema de unidades angulares a seleccionar, ver Figura 6.

Después se procede al proceso de adquisición de la información necesaria mediante una interfaz gráfica de usuario y mediante una ventana se despliega: i) la solución matemática del mecanismo de cuatro barras y ii) la representación gráfica del mecanismo solucionado. En esta misma ventana permite el regreso a la ventana de inicio para hacer la selección de otro posible caso. En la Figura 7 se observa la ventana para el caso 2. Finalmente, un archivo ejecutable fue creado para plataforma de Microsoft Windows®.

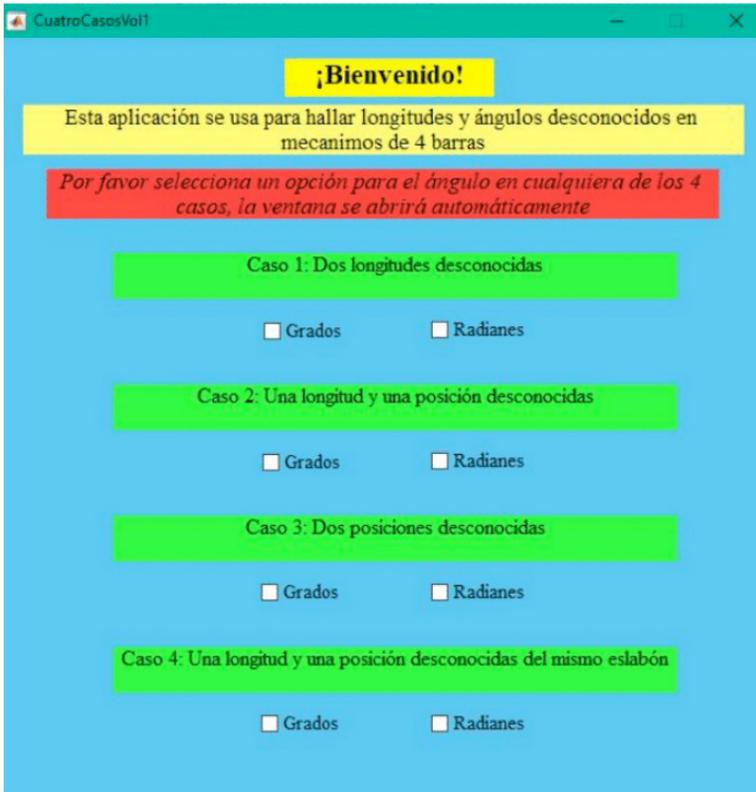


Figura 6.- Ventana de inicio para realizar el análisis de posición de mecanismo de cuatro barras

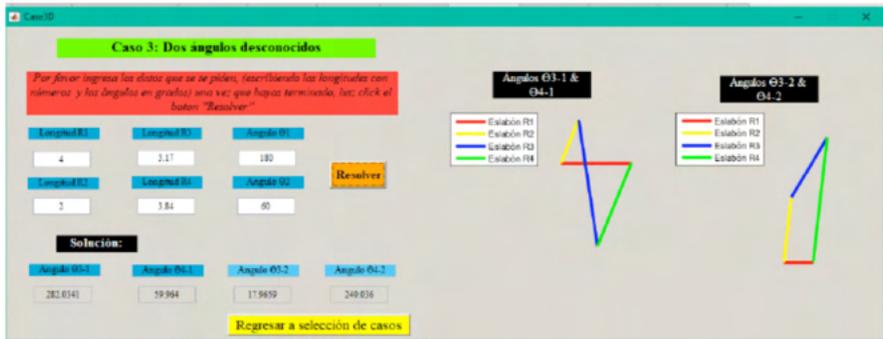


Figura 7.- Ventana de cálculo y de resultados en el análisis de posición de mecanismo de cuatro barras

3 I RESULTADOS

Se realizaron 20 pruebas de los 4 posibles casos presentados para el análisis de posición del mecanismo de cuatro barras, propuesto. En la Tabla 1 se muestra la información manejada en un ejemplo procesado que corresponde al caso 2 y donde no se conoce la longitud de eslabón 4 ni tampoco la posición angular del eslabón 3. En la Figura 8 se

observa la ventana de resultados que el programa despliega, y que además de mostrar el valor de la longitud desconocida del eslabón 4, y la posición angular desconocida del eslabón 3, también realiza el gráfico del mecanismo que corresponde a las condiciones estudiadas.

Eslabón	Longitud (un. arb.)	Posición angular (°)
1	4	180
2	2	60
3	5.17	17.92
4	3.83	240

Tabla 1.- Datos de prueba y resultados para Caso 2.



Figura 8.- Ventana de resultados del mecanismo de cuatro barras

La aplicación desarrollada se aplicó en un grupo de estudiantes de la unidad de aprendizaje de “Análisis y síntesis de mecanismos” de la carrera de ingeniería mecatrónica de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingenierías Campus Hidalgo (UPIIH) del Instituto Politécnico Nacional, creándose un experimento dónde se comparan los tiempos de resolución en los problemas de análisis de posición que le toman a los alumnos cuando utilizan la aplicación (E1) y cuando no la utilizan (E2), además se muestra la calificación obtenida por los alumnos en el tema del análisis de posición de un mecanismo de cuatro barras. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Los resultados muestran que existe un intervalo del 25%-33% de disminución en el tiempo de solución de los ejercicios de análisis de posición del mecanismo de cuatro barras, que puede atribuirse al aprendizaje que tiene el alumno al visualizar de manera gráfica la longitud y la posición angular de cada uno de los eslabones de estudio, y la configuración entre ellos. Los resultados también muestran que, con la herramienta computacional desarrollada, se contribuye a formar un aprendizaje significativo del tema y

que se ve reflejado en las calificaciones obtenidas por cada estudiante.

Alumno	E1 (min.)	E2 (min.)	% reducción en tiempo de solución	Calificación de la evaluación del tema
1	34	25	26.4	9
2	31	23	25.8	9
3	33	23	30.3	10
4	45	32	28.8	9
5	30	20	33.3	9
6	32	22	31.2	10
7	33	22	33.3	10
8	42	31	26.1	9
9	31	22	29.0	10

Tabla 2.- Tiempos de resolución de problemas en la etapa E1, E2 y el porcentaje de reducción

4 | CONCLUSIONES

A través de la plataforma de MATLAB se desarrolló un programa didáctico que permite encontrar la posición angular y en su caso la longitud de los eslabones que conforman un mecanismo de cuatro barras, los resultados obtenidos al aplicarse a un grupo de estudiantes muestran un porcentaje de reducción en el tiempo de solución de los problemas típicos del tema, además de que el programa contribuye a que el alumno posea un aprendizaje significativo del estudio de la ecuación de lazo cerrado, del análisis matemático y gráfico de las posiciones angulares. El programa creado ayuda a fortalecer la competencia de analizar los mecanismos en dos dimensiones mediante métodos gráficos y analíticos.

REFERENCIAS

Doane J. **Machine analysis with computer applications for mechanical engineers**. Wiley, 2016.

Gans R. **Analytical Kinematics. Analysis and Synthesis of Planar mechanisms**. Butterworth-Heinemann, 1991.

Highman, D.J. *et. al.* **Matlab Guide**, 2016.

Rider M.J. **Design and Analysis of mechanisms a planar approach**. Wiley, 2016.

Shih R. **Learning Autodesk Inventor 2013**. SDC Publications, 2013.

Vinograd O. **Fundamentals of kinematics and dynamics of machines and mechanism**. CRC Press Wiley, 2000.

LA ECUACIÓN DE SEGUNDO GRADO COMO MODELO MATEMÁTICO PARA OBTENER LA COMPONENTE AXIAL (C_{2u}) DE LA VELOCIDAD ABSOLUTA EN LOS IMPULSORES DE LOS TURBOCOMPRESORES CENTRÍFUGOS

Data de aceite: 10/01/2022

Tena Verdejo Juan

Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Minatitlán Minatitlán, Ver., MEXICO

Santiago Gabino Francisco

Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Minatitlán Minatitlán, Ver., MEXICO

Tena Galván Sandra Zulema

Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Minatitlán Minatitlán, Ver., MEXICO

Oropeza Ramírez Salvador

Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Minatitlán Minatitlán, Ver., MEXICO

Gutierrez Pola Marlene

Departamento de Ciencias Básicas Instituto Tecnológico de Minatitlán Minatitlán, Ver., MEXICO

Ordoñez Tapia Mayanin

Departamento de Ciencias Básicas Instituto Tecnológico de Minatitlán Minatitlán, Ver., MEXICO

RESUMEN: El presente trabajo consiste en el análisis cuantitativo de las variables que intervienen en los impulsores que son utilizados en los turbocompresores para determinar en base al modelo matemático obtenido la componente

axial de la velocidad (C_{2u}) la cual es necesaria conocerla para que sea aplicada en la ecuación de Euler, siendo esta la ecuación fundamental de las turbo máquinas.

PALABRAS CLAVE: Turbo máquinas, Ecuación de Euler.

ABSTRACT: The present work consists of the quantitative analysis of the variables that intervene in the impellers that are used in the turbochargers to determine based on the mathematical model obtained the axial component of the speed (C_{2u}) which is necessary to know it so that it is applied in the Euler's equation, this being the fundamental equation of turbo machines.

KEYWORDS: Turbo máquinas, Ecuación de Euler.

INTRODUCCIÓN

Es evidente que el desarrollo actual de modelos representa una herramienta útil, rápida y de bajo costo para el análisis de problemas ingenieriles reales. La confiabilidad y precisión de tales modelos es a la fecha un tema de interés científico. Lo anterior, debido a que se pretende que éstos ofrezcan un resultado tal que ya no sea necesario realizar experimentación para comparar la información obtenida numérica con respecto a la experimental. En este trabajo se tomaron los conceptos de Termodinámica y de Mecánica de los Fluidos siendo la evaluación el balance de energía y la cinemática en los impulsores. Es importante mencionar que en las

industrias de procesos químicos, petroquímicos y afines se utilizan compresores centrífugos para aire y gases cuyo diseño y análisis se basan en los fundamentos y o conceptos de **Ingeniería MECÁNICA**. En base a la ecuación fundamental de las turbo máquinas que determinó Euler a partir de la cinemática de los impulsores la cual determina la energía de presión (H) debido a la velocidad tangencial y a la componente axial de la velocidad absoluta. Puesto que la energía de presión es directamente proporcional al producto de las velocidades tanto axial y la componente axial.

DESARROLLO DEL MÉTODO

Los sistemas termodinámicos e hidrodinámicos son descritos por las leyes de la termodinámica y de la mecánica de los fluidos, siendo la ecuación de balance de energía la misma para estos sistemas como lo indica la primera ley de la termodinámica y la ecuación de Bernoulli para la hidrodinámica, La ecuación de balance de energía para estos sistemas está dada por siguiente modelo matemático (Ec. 1) en base al modelo mecánico del impulsor (Fig. 1)

$$E_{c1} + E_c - q = E_{c2}, \quad (1)$$

Donde E_{c1} es la Energía Cinética del Impulsor, E_c es la Energía Adquirida en su recorrido, q es el Calor debido a la Fricción gaseosa, remolinos y Transferencia de Calor al medio Circundante, E_{c2} es la Energía Cinética a la Descarga del Impulsor

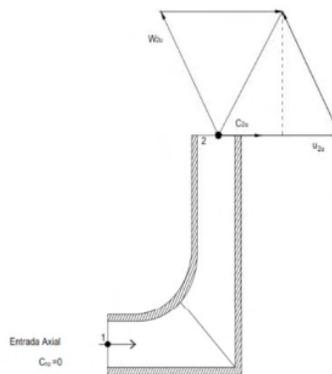


Figura 1

La ecuación 1 quedara expresada en forma de energía $y_1 + y - q = y_2$ (1 a)

Donde

$$y_1 = E_{c1} = \frac{c_1^2}{2} + C_p T_1 \quad \left[\frac{J}{Kg} \right] \quad (2)$$

$$y = E_c = C_{2u} u_2 - C_{1u} u_1 \quad \left[\frac{J}{Kg} \right] \quad (3) \text{ Ecuación de Euler}$$

$$y_2 = E_c = \frac{c_2^2}{2} + C_p T_2 \quad \left[\frac{J}{Kg} \right] \quad (4)$$

De la cinemática del impulsor (ver Fig. 2). Euler obtuvo la ecuación de la energía específica E_c intercambiada entre el rodete y el fluido, siendo esta:

$$E_c = C_{2u} u_2 - C_{1u} u_1 \quad (5)$$

Como la energía cinética es:

$$E_c = \left(\frac{J}{kg} \right) = E_c = \left(\frac{m^2}{s^2} \right) \quad (6)$$

Además H_u es la altura equivalente a la energía intercambiada en el fluido, donde:

$$H_u (m) g \left(\frac{m}{s^2} \right) = E_c \quad (7)$$

Igualando las ecuaciones (6) y (7) en la ecuación (3) obtenemos la ecuación de Euler expresada en ALTURAS (H_u):

$$H_u = \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g} \quad (8)$$

En donde los términos de la ecuación (8) son:

H_u = Altura de Presión del Impulsor

u_2, u_1 = Velocidades Tangenciales a la entrada y salida del impulsor

c_{2u}, c_{1u} = Componentes axiales a la entrada y salida del impulsor

g = gravedad

CINEMÁTICA DEL IMPULSOR

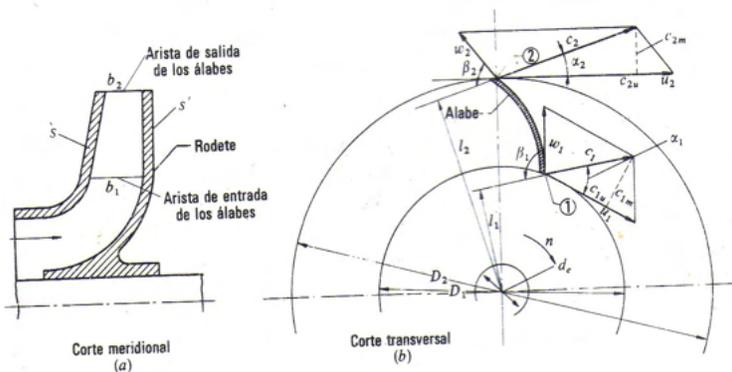


Figura 2 Impulsor de un compresor centrífugo: (a) corte meridional, (b) corte transversal

Una vez analizado los conceptos térmicos hidráulicos del impulsor, partiendo del concepto cinemático del impulsor o para obtener la energía específica intercambiada entre el impulsor y el fluido:

Sustituiremos en la ecuación 1 las ecuaciones 2, 3 y 4

$$\frac{c_1^2}{2} = C_p T_1 + (C_{2u} u_2 - C_{1u} u_1) - q = \frac{c_2^2}{2} + C_p T_2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

La temperatura T_2 del gas al salir del impulsor será

$$T_2 = T_1 + \frac{1}{2C_p} [C_1^2 - C_2^2 + 2(C_{2u} u_2 - C_{1u} u_1)] - \frac{q}{C_p} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Si el proceso de compresión fuese adiabático, la temperatura de salida T_2 sería:

$$T_{2a} = T_1 + \frac{1}{2C_p} [C_1^2 - C_2^2 + 2(C_{2u} u_2 - C_{1u} u_1)] - \frac{q}{C_p} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\frac{T_{2a}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2a} - T_1}{\eta_a} \quad (\text{Ecuación 12.a})$$

Dónde:

K = Coeficiente isentrópico

P_2 y P_1 = Presiones a la salida y la entrada

De las ecuaciones 11 y 12 se puede calcular la presión de salida del impulsor

$$P_2 = P_1 \left\{ 1 + \frac{1}{C_{p1}} [C_1^2 - C_2^2 + 2(C_{2u} u_2 - C_{1u} u_1)] \right\}^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Debido a las pérdidas provocadas por el fluido que circula a gran velocidad por los canales inter alabes, el proceso de compresión se aleja de las condiciones isentrópicas, ya que una parte de la energía del fluido se pierde en forma de fricción y en formación de remolinos, transformándose en calor, siendo el proceso real muy próximo al poli trópico.

Dónde: $Pv^n = Cte$

η = Índice poli trópico

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\eta}{\eta-1}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Para compresores con buen aislamiento térmico $q = 0$

$$\eta_a = \frac{W_a}{W_i} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Dónde:

η_a = Rendimiento adiabático

W_a = Trabajo necesario para realizar la compresión adiabática

W_i = Trabajo interno real

$$W_a = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (\text{Ecuación 15.a})$$

Para el proceso real la ecuación 13 toma la forma:

$$P_2 = P_1 \left\{ 1 + \frac{\eta_a}{C_p T_1} [C_1^2 - C_2^2 + 2(C_{2u}u_2 - C_{1u}u_1)] \right\}^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

El η_a para compresores multietapas anda entre 0.80 – 0.90 la eficiencia adiabática de la etapa se puede tomar igual a 0.85.

Para los impulsores centrífugos la componente axial (a la entrada del impulsor) $C_{1u} = 0$, y las componentes radiales $C_{1m} = C_{2m}$ por lo tanto tenemos la siguiente relación:

$$C_{1m} = C_{2m} = C_1$$

$$W_1 = \sqrt{u_1^2 + C_1^2}$$

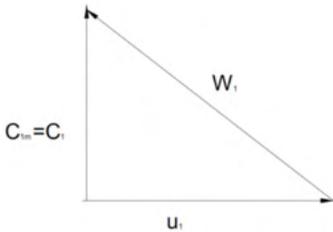


Figura 3. Triangulo de velocidades a la entrada del impulsor del compresor centrífugo.

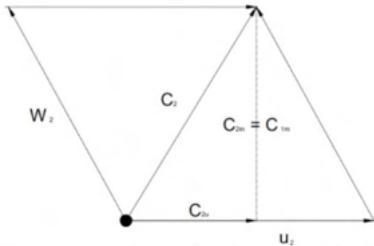


Figura 4. Triangulo de velocidades a la salida del impulsor del compresor centrífugo.

De la ecuación 16

$$P_2 = P_1 \left\{ 1 + \frac{\eta_a}{C_p T_1} [C_1^2 - C_2^2 + 2(C_{2u}u_2 - C_{1u}u_1)] \right\}^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 1 + \frac{\eta_a}{C_p T_1} [C_1^2 - C_2^2 + 2 C_{2u}u_2]$$

Y cuya ecuación de solución es:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

En la ecuación 21 los coeficientes a, b y c serán:

$$a = -1$$

$$b = u_2$$

$$C = -2 \frac{C_p T_1}{\eta_a} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right] = -B$$

Donde B es la constante C

Aplicando la fórmula general para resolver la ecuación de segundo grado y sustituyendo las constantes a, b y c se obtiene la siguiente ecuación:

$$C_{2u} = \frac{-u_2 \pm \sqrt{u_2^2 - 4(-1)(-B)}}{2(-1)} = C_{2u} = \frac{-u_2 \pm \sqrt{u_2^2 - 4B}}{-2} \quad (\text{Ecuación 22})$$

POR LO QUE LA FORMA GENERAL SERA:

$$C_{2u} = \frac{-u_2 \pm \sqrt{u_2^2 - 4B}}{-2}$$

CONCLUSIONES

Se obtuvo el Modelo Matemático y con ello, poder calcular la componente axial de la velocidad absoluta en base a las ecuaciones de energía. En particular dicha componente es la que refleja el comportamiento cinemático de los impulsores que son utilizados en los compresores centrífugos, esta, es parte importante de las variables que intervienen en dicha ecuación para determinar la energía de presión expresada en alturas. De antemano este modelo matemático obtenido para la expresión está de manera analítica. Otra de las virtudes es el modelado y analizar el comportamiento energético de las turbo máquinas, poniendo de manifiesto la aplicación de la herramienta matemática que desde la secundaria se enseña para las soluciones de las ecuaciones de segundo grado por la fórmula general.

REFERENCIAS

Fernández, Francisco. **INTRODUCCION A LA MECANICA DE FLUIDOS**. Editorial. Alfa Omega.

Igor J. Karassik y Roy Carter. **BOMBAS CENTRIFUGAS**, Editorial. CECSA

Joseph B. Franzini. **MECANICA DE FLUIDOS CON APLICACIÓN EN INGENIERIA**. Editorial Mc Graw Hill.

Luszczewski, Antoni. **REDES INDUSTRIALES DE TUBERIA, BOMBAS PARA AGUA, VENTILADORES Y COMPRESORES**. Editorial Reverté Ediciones, S.A. de C.V. 1a Edición 1999

Mataix, Claudio, “**Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**”, Harla México, 2da. Ed., 1982

Mott, Robert L. **MECANICA DE FLUIDOS**. Editorial Prentice Hall.

Munson Young. **FUNDAMENTOS DE MECANICA DE FLUIDOS**. Editorial. Noriega Limusa.

Smits Alexander S. **MECANICA DE LOS FLUIDOS**. Editorial ALFA OMEGA. 2003

Vickers. **BOMBAS SELECCIÓN, USO Y MANTENIMIENTO**. Editorial Vickers.

MENSURAÇÃO DO AUMENTO DE EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO E ENERGIA ELÉTRICA USANDO O PRÉ RESFRIAMENTO PARA O ULTRACONGELAMENTO DE PÃES

Data de aceite: 10/01/2022

Leandro Fluvio Torno

Faculdade Profissional – FAPRO

Alexandre Fernandes Santos

Mestre em Engenharia LACTEC-UFPR;
Professor FAPRO (Faculdade Profissional);
Doutor UBI (Universidade Beira Interior-
Portugal).

Heraldo José Lopes de Souza

Faculdade Profissional – FAPRO

Sariah Torno

Faculdade Profissional – FAPRO

Darlo Torno

Faculdade Profissional – FAPRO

RESUMO: Trata-se de simulações em softwares de refrigeração como o cool pack mostrando as vantagens da aplicação do pré-resfriamento no processo de ultracongelamento de pães cru, comparando medições reais em uma fábrica de pães ultracongelados com o processo tradicional. Com a simulação observa-se um acréscimo de produtividade próximo de 75%, foi analisado que com a aplicação do processo de pré-resfriamento de pães cru congelado obtém-se ganhos próximos entre 20 a 26% na economia de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Pré resfriamento, ultracongelamento, rendimento térmico.

MEASURING THE INCREASE IN EFFICIENCY OF PRODUCTION AND ELECTRIC ENERGY USING PRE-COOLING FOR THE UL-FREEZING OF BREAD

ABSTRACT: These are simulations in refrigeration software such as the cool pack showing the advantages of applying pre-cooling in the deep freezing process of raw bread, comparing real measurements in a deep-frozen bread factory with the traditional process. With the simulation it was observed an increase in productivity close to 75%, it was analyzed that with the application of the pre-cooling process of frozen raw bread, gains close to between 20 to 26% in the economy of electricity.

KEYWORDS: Pre cooling, ultra-freezing, thermal efficiency.

1 | INTRODUÇÃO

A história da criação do pão é estimada a 12 mil anos atrás, juntamente com o cultivo do trigo, na região da Mesopotâmia, onde atualmente está o Iraque, anos depois ele passou a ser triturado com pedras e transformado em farinha. O produto alimentício obtido pelo cozimento da massa que se faz com a mistura de farinha de certos cereais, principalmente o trigo, com água e sal, sem dúvidas o pão levedado foi um dom do Nilo. Os egípcios também inovaram com o forno de barro e foram os primeiros a fermentar a massa fazendo com que ela crescesse e com o desenvolvimento chegaram a produzir mais de

50 tipos de pães. Em Jerusalém, não se tinha a tecnologia de fornos de barro e os pães eram assados entre pedras, no entanto eles tinham uma rua de padeiros. Os gregos não tinham nenhuma inovação, mas foram os primeiros a fabricar pães na Europa. Os egípcios, os gregos e os romanos honravam seus deuses com oferendas de animais, flores e miolo de pão. No século XIII o pão já era comercializado em Paris com mais de 20 variedades, todavia só com Maria de Médicis, no século XVII é que os modernos processos italianos de produção de pão foram introduzidos na França, se tornando o centro de fabricação de pães de luxo. Entre as mais diversas variedades de pães, além daqueles conhecidos no consumo diário, existem ainda os pães especiais para datas comemorativas, como por exemplo: pão de Natal dos suíços em forma de estrela, pão grego de Páscoa, a paska da Ucrânia decorado com uma grande cruz para o Domingo da Ressurreição, entre outros.

Com base nisto, deduz-se que desde os primórdios da humanidade o pão faz parte da alimentação e do dia a dia das pessoas por todo o mundo e, cada vez mais os processos de fabricação vêm sendo aprimorados para atender as demandas com qualidade e padronização na produção.

No Brasil, a partir da década de 90, a refrigeração vem se fazendo cada vez mais presente na fabricação de pães. Muitos fatores, ou necessidades, motivaram esta participação da refrigeração a qual passou a ter uma significativa contribuição para o segmento. Entre os itens de maior destaque para esta interação, estão: o costume de se ter pão fresco todas as manhãs para o jejum e, por outro lado, as dificuldades relacionadas ao trabalho noturno (segurança, leis trabalhistas, valores de adicionais noturno etc.) para a produção destes pães. O primeiro passo da refrigeração para auxiliar neste segmento foi o resfriamento da água para desacelerar o crescimento da massa, e outro com destaque foi o desenvolvimento das câmaras climáticas para conservação e controle do processo de fermentação, também conhecidas, ou apelidadas, de “padeiro noturno”, evoluindo depois para uma produção ainda mais uniformizada auxiliada pelo congelamento dos pães [1].

Já nas Câmaras climáticas retardadoras do crescimento da massa de pão houve grande engenharia pelo fato das questões da umidade relativa, a umidade relativa baixa ressecava a casca do pão e ainda o tempo das 08-12 horas do pão no equipamento gerava um sabor diferente do pão original, para resolver tal problema as marcas criaram serpentinas com ênfase na retirada de calor sensível e com alta temperatura de evaporação do fluido refrigerante.



Figura 1: Câmara Climática Gelo Pão [2]



Figura 2: Amassadeira espiral [3]

Para a aplicação do sistema de refrigeração na panificação, é necessário o conhecimento das particularidades da massa de pão e seu processo de fabricação.

O pão, tal como conhecido, é o produto resultante da cozedura de uma massa, na composição da qual entram farinha, água, sal e fermento ou levedura. Todas estas substâncias são amassadas em conjunto até a formação de um produto homogêneo: a massa [4]. Após crescer pelo processo de fermentação ela é levada a um forno a temperatura de 240°C obtendo o produto final que é o pão.

No processo de amassamento, que é a início da fabricação, quando se faz a mistura dos ingredientes, normalmente em uma máquina chamada de misturador, amassadeira, masseira ou batedeira, a massa sofre muitos choques mecânicos, gerando o aquecimento indesejado da massa no final do processo.

A refrigeração gera uma importante designação no processo, visto que a adoção de água gelada é essencial para a redução deste aquecimento da massa. A energia gerada neste momento da mistura é em cerca de 63kJ/kg de massa. Após o amassamento, a massa é deixada em um processo de “repouso” por um determinado espaço de tempo para que ela passe a ter a firmeza necessária para a próxima etapa. Este processo também é conhecido como “tempo de levedar”. Na etapa seguinte, a massa, em alguns casos chamada de “bolo”, já se tornou menos pegajosa e adquire a plasticidade desejada para poder ser dividida em porções iguais (peso de cada pão), seja manualmente ou nas divisoras.

Estas porções são levadas a modeladora onde enfim surge o pão cru.

Na etapa seguinte será definido o destino imediato deste pão cru. Se optado pelo assamento, os pães ficarão dispostos em assadeiras pelo período de aproximadamente duas horas para acontecer o crescimento, ou fermentação, do pão (vai depender da receita adotada e condições climáticas) e em seguida é levado ao forno para ser assado por aproximadamente 45 minutos a 240°C. Quando o pão é produzido e não vai ser imediatamente assado, ele pode ser conservado refrigerado por até 20h em uma câmara

de controle de fermentação; ou a terceira opção que é ser congelado (cru ou pré-assado).

Se for ser mantido refrigerado, utiliza-se as câmaras de controle de fermentação, a qual deve ter a temperatura controlada em 7°C com 75% de umidade e baixa velocidade do ar quando adotado o processo de circulação de ar forçada.

Já se o pão for levado para o congelamento, deve-se atingir a temperatura de -18°C no interior do pão para ambas as opções (cru ou pré-assado).

É importante salientar que para cada uma das opções apresentadas (assamento, conservação ou congelamento) a formulação da mistura deverá ser ajustada para que seja mantida a qualidade final do produto.

Ainda dentro da aplicação da refrigeração ao pão, existem as opções de congelamento do “bolo” (massa antes de ser dividida em porções iguais), ou o pão pré-assado, como já mencionado anteriormente. Neste último processo o pão é assado parcialmente e depois levado ao congelamento ficando uma parte final do processo de assamento para pós descongelamento.

Ainda um pouco antes do aprimoramento do congelamento do pão no Brasil, houve o desenvolvimento da conservação nas câmaras climáticas para controle de fermentação. Este processo teve uma significativa participação no desenvolvimento dos equipamentos e também dos percentuais de mistura dos ingredientes para a formação da massa. A câmara de controle de fermentação tinha tanto a função de segurar o crescimento (fermentação) da massa, quanto proporcionar o crescimento controlado em preparação para o assamento. Isto ajudou muito na padronização das receitas, pois antes da existência deste equipamento os percentuais dos ingredientes da mistura da massa tinham que ser avaliados de acordo com as condições climáticas do dia (temperatura e umidade) para que fosse atingido o ponto ideal sem o ressecamento e com o crescimento correto. Também para o congelamento a padronização da receita foi necessária, assim como a adaptação para que a massa tenha “força” para o crescimento após o descongelamento, logo a câmara de controle de fermentação teve uma importante participação nesta evolução.

A Refrigeração – o calor flui de um lugar quente para um lugar frio, como do Sol para a Terra. Nunca ocorre um fluxo líquido “natural” de calor no sentido inverso. Um dispositivo que transmite calor de um lugar frio para um quente é chamado de refrigerador [5].

Para uma análise do coeficiente de desempenho (K) de um refrigerador, precisa-se entender que o calor (Qc) extraído do reservatório de baixa temperatura – o evaporador – somado ao trabalho (W) realizado sobre o sistema por um agente externo – o compressor – resultam no calor (Qh) que é descarregado em um reservatório de alta temperatura – o condensador, essas siglas têm um sentido no Inglês, onde “c” é derivado de “cool” que se refere a fonte fria, e “h” de “hot” que se refere a fonte quente. [6].

$$K = Q_c / (Q_h - Q_c) \quad (1)$$

O coeficiente de desempenho deve ter o valor mais alto possível. Um valor de 5 é típico para um refrigerador doméstico e um valor nos limites de 2 – 3 para um condicionador

de ar de quarto. [5]

Uma outra forma rápida de análise, é através do ciclo ideal com gás ideal em uma máquina reversível que depende somente da temperatura dos dois reservatórios, a máquina de Carnot. Por ela ser reversível e levar em conta somente as temperaturas, temos que o coeficiente de desempenho pode ser medido pelas temperaturas de evaporação (T_c) e temperatura de condensação (T_h). Nestas condições se tem:

$$K = T_c / (T_h - T_c) \quad (2)$$

Isto mostra que quanto menor for a diferença de temperatura entre T_h e T_c , menos será necessário o uso do refrigerador, logo seu desempenho será maior.

O Congelamento – para a caso do foco de nosso estudo, o pão cru congelado, é necessário que seja feito um congelamento rápido, estimado como tempo ideal o período de 1 a 2 horas. Para que isto seja possível é utilizado um método denominado como ultracongelamento ou sobre congelamento.

O congelamento rápido dos gêneros consiste em submetê-los à ação de um frio de baixa temperatura, de modo a provocar rapidamente a cristalização da água do gênero, e diminuir a temperatura até um valor suficientemente baixo para que a proporção de água não gelada seja muito pequena [4].

Antigamente o congelamento era aplicado quase exclusivamente à carne, submetendo a mesma a temperatura de -12°C podendo levar de 2 a 4 dias para atingir esta temperatura. O resultado deste processo nem sempre era satisfatório pois o processo lento de congelamento ocasionava na desorganização dos tecidos gerados pela migração da água e conseqüente formação de grandes cristais de gelo e como conseqüência negativa se tinha a alteração da aparência e sabor, entre outras características. Depois foi observado que este fenômeno também acontece com outros produtos (alimentos) além da carne. Plank foi o primeiro a descrever a cinética e determinar o tempo de congelamento em produtos alimentícios. No seu primeiro trabalho ele apresentou uma fórmula para calcular o tempo de congelamento por um bloco de gelo, ele estudou esta situação e descobriu que existe um tempo ideal para o congelamento dos alimentos, e cada um tem seu tempo ideal em função de vários fatores. Com o congelamento rápido, ou de tempo ideal, os cristais de gelo que se formam são menores, permitindo que os alimentos conservem suas características e qualidades iniciais, como: aparência, sabor, odor, vitaminas e valores nutritivos [7].

É importante salientar que nem o processo de congelamento, e nem o processo de sobre congelamento (ou ultracongelamento), conseguem gerar qualquer melhora nos produtos, eles apenas conservam os alimentos no estado e condições que estão antes do congelamento, e logo após passar por este processo o alimento deve ser levado imediatamente para uma câmara com temperatura e umidade adequadas para a conservação do produto.

Quando os produtos são retirados das câmaras de conservação, eles precisam ser imediatamente consumidos pois perdem suas qualidades rapidamente. Alguns produtos

requerem cuidados especiais no descongelamento. Para os legumes é sugerido que seja descongelado em água fervente; para as carnes, inclusive aves e peixes, deve ser feito o descongelamento lento em geladeira; as frutas a serem consumidas cruas, descongelar em local fresco ou geladeira e se possível envoltos em papel celofane para evitar a oxidação do ar; para os pães congelados crus, devemos fazer de forma lenta, de preferência em uma câmara climática para controle de fermentação.

Entre os processos de congelamento rápido de produtos frescos, há algumas classificações quanto ao método adotado conforme a seguir: contato entre placas frias; imersão em banho líquido incongelável; túnel de congelamento; fluidização com produtos em suspensão em corrente de ar; túnel de congelamento e criogenia.

Congelamento por contato: pode ser com placas verticais ou horizontais. Muito utilizado para filés de peixe e assegura um congelamento rápido e uniforme. Também é aplicado para polpas de frutas.

Congelamento em leito fluidizado: utilizado para produtos de pequenas dimensões como ervilhas, feijões e pequenos frutos. Consiste em uma corrente de ar ascendente suficientemente forte para manter os produtos em suspensão durante o processo.

Congelamento por imersão: praticamente exclusivo para o congelamento de peixes. Consiste na imersão do mesmo em uma salmoura com ponto de congelamento de -20°C . O inconveniente deste método é a alteração do sabor do produto.

Congelamento por fluido criogênico: é um fluxo de nitrogênio a temperatura de evaporação de -196°C . Apesar de muito eficaz, tem alto custo.

Túnel de congelamento: consiste na exposição do produto a uma corrente de ar com baixa temperatura, na faixa de -35°C a -55°C , e alta velocidade de insuflamento que podem variar de 3 a 5m/s.

Cálculos – em nosso estudo analisaremos o congelamento do pão cru auxiliado por uma etapa de pré resfriamento.

Primeiramente vamos estudar os cálculos de carga térmica. Para isso dividiremos o congelamento em três etapas: resfriamento até o congelamento, congelamento e resfriamento após congelamento.

Na etapa inicial – resfriamento até o congelamento – teremos apenas a retirada de calor sensível.

O calor sensível é aquele que não tem mudança de estado da matéria, ocorre apenas a variação de temperatura.

Esta etapa se inicia logo após o término da modelagem dos pães. A temperatura do pão nesta etapa pode chegar a 30°C e deverá ser rebaixada até um pouco antes do início do congelamento que é entre -5°C a -8°C (esta temperatura vai depender da receita adotada). Em nosso estudo teórico vamos utilizar o -5°C . Quando o produto chega neste ponto é possível perceber que a queda de temperatura sofre uma parada por um longo período de tempo, que é a segunda etapa do processo. Esta etapa requer quase metade

do tempo de total do processo que é de 1 hora, isto acontece pois estamos retirando o calor latente, que é o momento do congelamento propriamente dito.

O calor latente é aquele que envolve a mudança de fase, ou do estado da matéria.

Logo após o congelamento, se tem a terceira etapa que é mais uma fase de retirada apenas do calor sensível, só que agora após o ponto de congelamento. Nesta etapa a temperatura vai de -5°C a -18°C e isto acontece muito rapidamente pois é uma carga muito pequena a ser retirada.

Como exemplo de cálculo de carga térmica e consumo de energia, vamos adotar um ultra congelador para 70kg de massa por hora pois é uma quantidade compatível com os produtos disponíveis no mercado e também compatível com os outros equipamentos de produção da massa que precedem o congelamento.

Na etapa 1 (calor sensível antes do congelamento) foi adotado a seguinte fórmula [8]:

$$\mathbf{QS = m.c.\Delta T} \quad (3)$$

Onde m é a massa da quantidade de pães que será congelada, neste caso 70kg.

O c é o calor sensível da massa de pão antes do ponto de congelamento, de acordo com dados tabelados tem-se $c = 0,60\text{kcal/kg }^{\circ}\text{C}$.

E ΔT é a diferença entre a temperatura final e inicial do processo. A temperatura inicial é 30°C e a final -5°C , logo o ΔT será de 35°C .

Então, colocando os valores na fórmula tem-se:

$$Q1 = 70,00 * 0,60 * 35,00$$

$$Q1 = 1.470,00 \text{ kcal}$$

Na etapa 2 (transformação de fase), a fórmula a ser utilizada é [9]:

$$\mathbf{QL = m.L} \quad (4)$$

Onde m é a massa da quantidade de pães que será congelada, neste caso 70kg e L é calor latente de congelamento do pão. Também tabelado o valor é de 27kcal/kg . Então, colocando os valores na fórmula tem-se:

$$Q2 = 70,00 * 27,00$$

$$Q2 = 1.890,00 \text{ kcal}$$

A etapa 3 (calor sensível após o congelamento), utilizaremos a fórmula 3, porém com o valor de $c = 0,47\text{kcal/kg }^{\circ}\text{C}$, igualmente tabelado, e as temperaturas serão: final de -18°C e inicial de -6°C , logo o ΔT será de 12°C , então tem-se:

$$Q3 = 70,00 * 0,47 * 12,00$$

$$Q3 = 394,80 \text{ kcal}$$

A carga total de calor retirado do produto será a soma das 3 etapas, logo se tem:

$$\mathbf{Q_{massa} = Q1 + Q2 + Q3} \quad (5)$$

$$Q_{massa} = 1.470,00 + 1.890,00 + 394,80$$

$$Q_{massa} = 3.754,80 \text{ kcal}$$

Além da carga térmica da massa, a qual é a mais representativa, também vamos

considerar os ganhos de calor através das paredes do túnel de congelamento. As outras cargas menores serão desprezadas em nosso estudo devido à pouca influência que representarão nos comparativos.

As câmaras terão as seguintes dimensões para comportar os 70kg de pães já moldados: Altura = 1,80m; Largura = 1,00m e Profundidade = 1,00m, e o isolamento adotado para o ultra congelador vai se o poliuretano expandido com 250mm de espessura e, para a câmara de pré resfriamento será o mesmo material com 120mm de espessura. O material e espessura foi escolhido de acordo com o critério de temperatura das câmaras. Logo, para o cálculo das perdas pelas paredes, se utilizou a seguinte fórmula [10]:

$$QP = U.A. \Delta T \quad (6)$$

Onde QP é o calor transmitido pelas paredes, teto e piso em kcal/h; U é o coeficiente global de transmissão de calor para o painel de poliuretano, com valor de 0,083 kcal/h.m² °C para o painel de 250 mm; A é área total do equipamento com 9,20 m²; e ΔT é a variação de temperatura entre o ambiente externo (30°C) e interno do ultra congelador (-35°C) que é igual a 65°C, logo:

$$QP = 0,083 * 9,20 * 65,00$$

$$QP = 49,60 \text{ kcal/h}$$

Com isto tem-se que a carga térmica considerada para o ultra congelador será a soma da carga de massa (3.754,80 kcal) mais as paredes, teto e piso (49,60kcal/h). Considerando que foi adotado o tempo de 1 hora para a produção, pode-se somar diretamente as cargas, chegando a carga total de 3.804,40 kcal/h.

Para a retirada desta quantidade de calor, considerando um equipamento com fluido refrigerante R-404, com temperatura de condensação de 35°C e temperatura de evaporação de -40°C, foi consumido aproximadamente 4,524 kW de acordo com o Software COOLPACK, [11] [12].

CYCLE SPECIFICATION								
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES		SUCTION GAS HEAT EXCHANGER		REFRIGERANT		
T _E [°C]:	-40,0	ΔT _{SH} [K]:	5	ΔP _{SL} [K]:	0,5	No SGHX	0,30	R404A
T _C [°C]:	44,0	ΔT _{SC} [K]:	2	ΔP _{DL} [K]:	0,5			
CYCLE CAPACITY								
Cooling capacity Q _E [kW]	4,27	Q _E : 4,27 [kW]	Q _C : 8,537 [kW]	m: 0,05095 [kg/s]	V _S : 27,91 [m ³ /h]			
COMPRESSOR PERFORMANCE								
Isentropic efficiency η _E [-]	0,663	η _{IS} : 0,663 [-]	W: 4,524 [kW]					
COMPRESSOR HEAT LOSS								
Heat loss factor f _G [%]	10	f _G : 10,0 [%]	T ₂ : 83,1 [°C]	Q _{LOSS} : 0,4524 [kW]				
SUCTION LINE								
Heat ingress Q _{SL} [W]	180,0	Q _{SL} : 180 [W]	T ₈ : -30,7 [°C]	ΔT _{SH,SL} : 4,3 [K]				
Calculate	Print	Help	Home	Auxiliary	State Points	COP: 0,944	COP*: 0,984	

Figura 3: Software Coolpack – Carga Ultra Congelador [12].

Sabendo que quanto maiores as relações de compressão, ou seja, maior diferencial entre pressão de alta e baixa absoluta é menor o coeficiente de performance e que isso tem relação direta com a temperatura de evaporação, ou seja, quanto menor a temperatura de evaporação para uma mesma temperatura de condensação, menor é o rendimento, maior será o consumo energético no processo de congelamento do pão. Uma das opções para redução do consumo de energia e ao mesmo tempo aumentar a produção diária, é a separação da etapa 1 (calor sensível antes do congelamento) das outras duas, pois a mesma possui uma carga térmica representativa no processo e essa permite que seja utilizada uma temperatura de evaporação bem mais elevada do que a de um ultra congelador.

Será considerado um equipamento para congelamento com capacidade de 70kg/h de pão cru, e será retirado deste equipamento a carga referente a etapa 1 recalculando a capacidade do ultra congelador e, na sequência definir uma câmara de pré resfriamento de mesma capacidade analisando assim o quanto há de redução de consumo de energia em relação ao aumento de produtividade, pois aumentará a capacidade diária com um menor consumo de energia [13]. Então:

$$Q_{\text{massa}} = Q_2 + Q_3$$

$$Q_{\text{massa}} = mL + mc \Delta T$$

$$m = Q_{\text{massa}} / (L + c \cdot \Delta T)$$

$$m = 3.754,80 / (27,00 + 0,47 \cdot 12,00)$$

$$m = 115,03 \text{ Kg}$$

Com esta nova massa, recalcula-se a carga térmica da câmara de pré resfriamento, a qual será o calor da etapa 1 mais o calor das perdas pelas paredes. Para este último calor vamos seguir a mesma fórmula utilizada para o cálculo do ultra congelador sendo o $U = 0,169$ para o isolamento de 120mm, e o ΔT igual a 35°C já que a temperatura interna da câmara será de -5°C e o tamanho será o mesmo [14].

$$Q_{\text{inovo}} = 115,03 * 0,60 * 35,00 = 2415,60 \text{ kcal}$$

$$Q_{\text{p pré}} = U.A. \Delta T$$

$$Q_{\text{p pré}} = 0,169 * 9,20 * 35,00$$

$$Q_{\text{p pré}} = 54,40 \text{ kcal/h}$$

Então no pré resfriador haverá uma carga total de $2415,60 + 54,40 = 2.470,00\text{kcal/h}$. Para a retirada desta quantidade de calor será adotado o fluido refrigerante R-134a (pois o mesmo possui melhor rendimento em médias temperaturas se comparado ao R-404a), com temperatura de condensação também de 35°C e temperatura de evaporação de -10°C , com isto o consumo será de **1,362 kW**.

CYCLE SPECIFICATION								
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES		SUCTION GAS HEAT EXCHANGER		REFRIGERANT		
T_E [°C]:	-10,0	ΔT_{SH} [K]:	5	Δp_{SL} [K]:	0,5	No SGHX	0,30	R134a
T_C [°C]:	42,0	ΔT_{SC} [K]:	2	Δp_{DL} [K]:	0,5			
CYCLE CAPACITY								
Cooling capacity \dot{Q}_E [kW]	2,93	\dot{Q}_E : 2,93 [kW]	\dot{Q}_C : 4,34 [kW]	\dot{m} : 0,02093 [kg/s]	\dot{V}_S : 8,18 [m ³ /h]			
COMPRESSOR PERFORMANCE								
Isentropic efficiency η_{is} [-]	0,59	η_{is} : 0,590 [-]	\dot{W} : 1,362 [kW]					
COMPRESSOR HEAT LOSS								
Heat loss factor f_G [%]	10	f_G : 10,0 [%]	T_2 : 82,4 [°C]	\dot{Q}_{LOSS} : 0,1362 [kW]				
SUCTION LINE								
Heat ingress \dot{Q}_{HL} [W]	180,0	\dot{Q}_{SL} : 180 [W]	T_B : 4,9 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 9,9 [K]				
Calculate	Print	Help	Home	Auxiliary	State Points	COP: 2,151	COP*: 2,284	

Figura 4 Software Coolpack – Carga Pré Resfriador [12].

Desse modo, se obterá um aumento de produtividade de 64,03% no ultra congelador (de 70 kg/h para 115,03 kg/h) aumentando o consumo de energia em apenas 29,87% com o acréscimo da câmara de pré resfriamento.

Na prática, para comparar com o estudo teórico acima, foram feitos alguns testes em uma fábrica de pães congelados onde havia um equipamento para ultracongelamento com capacidade nominal de 40kg/h de pão cru e uma câmara climática adaptada para o pré resfriamento. O teste realizado consistiu em vários experimentos aumentando aos poucos a capacidade de produto até chegar ao ponto ótimo de 1h de congelamento com a máxima capacidade possível de pão entrando a -5°C. O equipamento de congelamento possuía um consumo de **2,32 kW** e o pré resfriador adaptado ficou com um consumo de **0,68kW**. Adotando o pré resfriamento da massa até a temperatura de -5°C, como no estudo teórico, foi possível ampliar a capacidade do ultra congelador de 40kg/h para 70kg/h, representando um ganho de capacidade de 75% com um aumento de consumo de energia de 29% (carga do pré resfriador), dados esses muito próximos dos valores obtidos na teoria.

CONCLUSÃO

No estudo usando o software “cool pack” da Universidade da Dinamarca chegou-se a conclusão que com a retirada da carga térmica da etapa 1 (calor sensível antes do congelamento) do ultra congelador e considerando a entrada do pão já pré resfriado, obteve-se um acréscimo de produção de 64,03% no ultra congelador, aumentando o consumo de energia em apenas 29,87% referente a carga da câmara de pré resfriamento. Nas medições práticas realizadas observou-se um aumento de produtividade de até 75% com um aumento de consumo de energia de 29% do pré resfriador.

No estudo teórico, para se obter um aumento de produtividade de 64% utilizando apenas o ultra congelador, seria necessário ter que trabalhar, por exemplo, 13 horas/dia ao invés de 8 horas/dia, consumindo com isso $13 \times 4,524 \text{ kW} = 58,81 \text{ kW/dia}$. No entanto, utilizando o pré resfriador, temos $8 \times 4,524 \text{ kW}$ do ultracongelamento + $8 \times 1,362 \text{ kW}$ do pré resfriamento = **47,08 kW/dia**, totalizando uma economia direta de energia de **20%**. Nos testes práticos obteve-se 75% a mais de produtividade com a aplicação do pré resfriamento. Utilizando a mesma comparação do estudo teórico, tem-se 14 horas/dia ao invés de 8 horas/dia, logo, utilizando a mesma lógica, seriam $14 \times 2,32 \text{ kW} = 32,48 \text{ kW/dia}$ do ultra congelador contra $8 \times 2,32 \text{ kW}$ do ultra congelador + $8 \times 0,68 \text{ kW}$ do pré resfriador = **24,00 kW/dia**, ou seja, uma economia direta de **26,11%**.

Logo, conclui-se que a aplicação do processo de pré resfriamento do pão cru congelado gera um ganho direto de **20% a 26%** no consumo de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] ENCICLOPÉDIA BARSA, Volume 12, 1990 – **Pão**. Rio de Janeiro: Enciclopédia Britânica do Brasil Publicações Ltda.
- [2] GELOPAR. **Câmara Climática Gelopar Termopão GCTP-1200 220V**. Disponível em WWW. gelopar.com.br acessado em 08/07/2021.
- [3] G. PANIZ. **Amassadeira espiral**. Disponível em <https://gpaniz.com.br/produtos/gpaniz/panificacao/amassadeira-espiral/>. Acessado em 08/07/2021.
- [4] RAPIN, P. **Manual do Frio – Fórmulas Técnicas – Refrigeração e Ar Condicionado**. 8ª ed. Brasil: Hemus, 2001. 462p
- [5] HALLIDAY, David; ROBERT, Resnik; MERRIL, John. **Fundamentos da Física 2 – Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 275 p.
- [6] TORREIRA, Raul P. **Elementos Básico de Ar Condicionado**. São Paulo: Hemus, 1976. 261p.
- [7] Soares, D.S.C.; Santos, J. T. S.; Campos, A. F. P.; Costa, F. S. C.; Nunes, T. P.; Junior, A. M. O. **Avaliação do tempo de congelamento da mangaba – (Hancornia Speciosa Gomes) em ultrafreezer através dos modelos matemáticos de Plank e Pham**. SCIENTIA PLENA VOL. 8, NUM. 4. 2/03/2012.
- [8] GASPAR, Alberto. **Física Ondas, Óptica e Termodinâmica**. 1ª ed. São Paulo: Ática, 2000. 414 p.
- [9] DA SILVA, Alessandro. **Refrigeração Comercial**. 1ª ed. São Paulo: Nova Técnica, 2011. 143p.
- [10] COSTA, Ênio C. da. **Refrigeração**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 1982. 321 p.
- [11] ABNT. ABNT NBR 16255, 2013. **Sistema de refrigeração de supermercados – Diretrizes para o projeto, instalação e operação**. 2013.

[12] COOLPACK. **Software Coolpack v 1.5**. Department of Energy Engineering at the Technical University of Denmark. 2021.

[13] ESCOLA TÉCNICA PROFISSIONAL, **Apostila de Projeto de Ar Condicionado**.

[14] WYLEN, Gordon Van; SONNTAG, Richard; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 1997. 589 p.

REQUISITOS METROLÓGICOS LEGAIS PARA MEDIÇÃO FISCAL APLICADOS A UNIDADES FLUTUANTES DE PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE PETRÓLEO (FPSO): CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Data de aceite: 10/01/2022

Hélio Damásio de Lima Filho

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA)
Mossoró-RN
<http://lattes.cnpq.br/0114638867548018>

Jardel Dantas da Cunha

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA)
Mossoró-RN
<http://lattes.cnpq.br/3658783471840574>

Andréa Francisca Fernandes Barbosa

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA)
Mossoró-RN
<http://lattes.cnpq.br/5160430176229725>

Antônio Robson Gurgel

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA)
Mossoró-RN
<http://lattes.cnpq.br/3757236425411868>

Antonio Rodolfo Paulino Fernando Pessoa

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA)
Mossoró-RN
<http://lattes.cnpq.br/5462842425443359>

André Luís Novaes Motta

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA)
Mossoró-RN
<http://lattes.cnpq.br/6655822329418320>

RESUMO: A produção de petróleo e gás natural no Brasil é de grande importância, já que ele é por lei uma *commodity* nacional, o volume produzido deste bem influencia diretamente a receita da união, estados e municípios, graças a uma série de leis nacionais que promovem a divisão dos recursos oriundos da sua exploração. O método de partilha mais comum é a do recolhimento de *royalties*, que são pagos em montante diretamente proporcional a vazão produzida pelo produtor do campo. Para padronizar e regulamentar as medições volumétricas de óleo a ANP publicou um documento que rege os requisitos metrológicos dos sistemas de medição, esse documento é denominado de Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM). A seleção dos equipamentos que irão compor o sistema de medição, a forma como este deve ser projetado e inserido na planta de processo e os mecanismos de apoio preconizado pelo RTM devem atender os requisitos metrológicos legais e uma série de normas nacionais e internacionais. O objetivo deste trabalho é selecionar um medidor de vazão tomando como base os requisitos metrológicos ou RTM, onde serão utilizados dados de produção diária média de 150000 barris por dia (bbl/d), o petróleo possui as seguintes características: grau °API de 31,5, vazão de óleo 993,67 m³/h, viscosidade de 832 mPa.s e Teor de água e sedimentos (BSW) de 0,02%. O medidor de vazão tipo turbina é o mais adequado onde os requisitos do RTM especificam que a utilização e implantação do sistema de calibração devem conter: as calibrações *in loco*, utilizando um fluido de massa específica, viscosidade e temperatura

observando os seguintes limites máximos de desvio, massa específica (20%), temperatura (5°C), pressão e vazão (10%), deve haver um sistema que comprove a proficiência do pessoal envolvido e os medidores em operação devem ser calibrados utilizando provadores, tanques de calibração ou medidor padrão de trabalho.

PALAVRAS CHAVE: Petróleo, Medição Fiscal, Requisitos Metrológicos, FPSO.

LEGAL METROLOGICAL REQUIREMENTS FOR FISCAL MEASUREMENT APPLIED TO FLOATING UNITS OF OIL PRODUCTION, STORAGE AND TRANSFER (FPSO): CRITERIA FOR SELECTION OF MEASUREMENT INSTRUMENTS

ABSTRACT: The production of oil and natural gas in Brazil is of great importance, as it is by law a national commodity, the volume produced of this good directly influences the revenue of the union, states and municipalities, thanks to a series of national laws that promote division of the resources arising from its exploitation. The most common sharing method is the collection of royalties, which are paid in an amount directly proportional to the flow produced by the producer in the field. In order to standardize and regulate volumetric oil measurements, the ANP published a document that governs the metrological requirements of measurement systems, this document is called Technical Regulation for the Measurement of Oil and Natural Gas (RTM). The selection of equipment that will make up the measurement system, the way it must be designed and inserted in the process plant and the support mechanisms recommended by the RTM must meet the legal metrological requirements and a series of national and international standards. The objective of this work is to select a flow meter based on the metrological or RTM requirements, where data of average daily production of 150000 barrels per day (bbl/d) will be used, oil has the following characteristics: oAPI grade of 31, 5, oil flow 993.67 m³/h, viscosity 832 mPa.s and water and sediment content (BSW) 0.02%. The turbine-type flowmeter is the most suitable where the RTM requirements specify that the use and implementation of the calibration system must contain: on-site calibrations, using a fluid of specific mass, viscosity and temperature observing the following maximum deviation limits, specific mass (20%), temperature (5°C), pressure and flow (10%), there must be a system that proves the proficiency of the personnel involved and the meters in operation must be calibrated using testers, calibration tanks or standard meter of Work.

KEYWORDS: Oil, assessment measurement, metrological requirements, FPSO.

1 | INTRODUÇÃO

Graças às características geológicas (THOMAS, 2004) o petróleo pode surgir nos mais variados locais, podendo ser descoberto e explorado em centros urbanos, florestas, rios e em alto mar. No alto mar um dos modelos mais comuns para produção de petróleo no mundo é a utilização de navios para produção, armazenamento e transferência, comumente denominados de FPSO, *Floating Production Storage and Offloading*, construção de uma unidade desse porte requer atendimento a uma quantidade muito abrangente de normas ambientais, sanitárias, de segurança operacional, inspeção, salvatagem marítimas e inúmeros requisitos metrológicos.

A medição fiscal então tem uma importância extremamente relevante no contexto brasileiro, já que está refletida diretamente em um componente da receita governamental. Ainda segundo a resolução conjunta ANP/INMETRO nº1 de 10.6.2013 cabe a ANP, Agência Nacional de Petróleo e Gás, aprovar a execução e implementação dos projetos de um sistema de medição, assim como também estabelecer todos os critérios e normas relacionadas a operação e manutenção deste sistema. Entre as mais variadas normas citadas pela resolução da ANP, uma das que merece destaque é a norma API MPMS capítulo 11.1 e capítulo 21, estabelece critérios para realizar medições de petróleo líquido utilizando medidores de vazão do tipo turbina e de deslocamento positivo, que segundo SILVA FILHO, 2010, estão entre os tipos de medidores de vazão mais utilizados no mundo. Estas mesmas normas ainda consideram a variabilidade das características de processo como densidade do fluido medido, correção de temperatura e compressibilidade para aplicações que exigem grande confiabilidade nas medições, cenário este que se adequa a um sistema de medição fiscal. Tais características são propriedades físico-químicas intrínsecas ao tipo de óleo e gás, vazão de produção e capacidade de armazenamento e transferência da unidade. Então um sistema projetado para atender um determinado campo não deve ser utilizado, ao menos integralmente, para atender um outro campo, devido as características únicas de cada sistema de medição. As definições de projeto se tornam deveras importantes, já que um erro em alguma especificação pode inviabilizar a aprovação de todo sistema (CABRAL, 2004; ALBERTAZZI, 2008).

O presente trabalho apresenta um estudo detalhado de documentos metrológicos normativos e legais que regem a medição fiscal no Brasil a fim de agrupar as exigências de projeto e seleção dos equipamentos de um sistema de medição de volume de óleo.

2 | METODOLOGIA

Métodos empíricos e computacionais, ainda na fase de prospecção de um reservatório de petróleo são utilizados para determinar a quantidade de óleo recuperável e suas características química e físicas e assim determinar a capacidade de processamento, armazenamento e transferência de um FPSO - *Floating Production Storage and Offloading* (ROSA, 2006).

Foi utilizada como referência a produção de óleo de um campo já em produção que mais se aproxime das características esperadas deste trabalho. Entre todos os campos de produção de óleo no Brasil os que significativamente apresentam maior produção de óleo são os campos localizados no Pré-sal¹.

O maior campo do Pré-sal está localizado a 230km da costa do município do Rio de Janeiro e em lâmina d'água de 2200m, o sistema de produção previsto pelo plano de desenvolvimento aprovado na reunião da diretoria nº0914 de 10 de janeiro de 2018 é do tipo

¹ Nossas atividades: O Pré-sal. Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em 06 de jun. de 2019.

unidade estacionárias FPSO, com plataformas previstas e capacidade de processamento já estimadas e pré-definidas, listadas na Tabela 01 (ANP, 2018).

Unidade	Petróleo (bbl/d)	Gás Natural (m³/d)
FPSO Cidade Angra dos Reis	100000	5000000
FPSO Cidade de Itaguaí	150000	8000000
FPSO Cidade de Mangaratiba	150000	8000000
FPSO Cidade de Maricá	150000	6000000
FPSO Cidade de Paraty	120000	5000000
FPSO Cidade de Saquarema	150000	6000000
P-66	150000	6000000
P-69	150000	6000000
P-67	150000	6000000

Tabela 01 – Capacidade de processamento das unidades de produção

Fonte: <http://www.anp.gov.br/images/exploracao_e_producao_de_oleo_e_gas/gestao_contratos/fase_producao/planos_desenvolvimento/sumario_lula.pdf>

Com base nos dados da Tabela 01 pode-se considerar que a produção média aproximada de óleo esperada no FPSO instalado neste campo é de 150000 barris por dia, o que significa uma produção de 993,67 metros cúbicos por hora (m³/h), este será o valor adotado como vazão de referência para a elaboração do sistema de medição fiscal. O óleo escolhido tem as características descritas na Tabela 02.

Propriedade	Valor	Unidade
Grau API	31,5	°API
Vazão de óleo	993,67	m³/h
Massa específica a 20°C	868,1	Kg/m³
Viscosidade	832	mPa.s
Pressão Média	6612	KPa
Temperatura Média	14,8	°C
BSW - Teor de Água e Sedimentos	0,02	%

Tabela 02 – Características estimadas do óleo produzido

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 | RESULTADOS

3.1 Instrumentos do Sistema de Medição

Os instrumentos de medição devem ser selecionados de acordo com critérios estabelecidos pelo RTM, esses critérios são definidos, mas não limitados, pelo RTM. Os equipamentos tidos como básicos, no qual um sistema de medição deve ser constituído no mínimo, são: o medidor de vazão, um sistema de calibração, um sistema de amostragem, instrumento de temperatura, instrumento de pressão e um computador de vazão.

3.1.1 Seleção do Medidor de Vazão

O primeiro item a ser analisado na escolha do medidor de vazão em operação é a classe de exatidão do sistema de medição, esta, definida no item 6.3.4 do RTM, conforme Tabela 04, levando em consideração apenas viscosidade do fluido medido.

Sistema	Viscosidade Dinâmica	Classe de Exatidão
Medição Fiscal	≤ 1000 mPa.s	0,3
Medição Fiscal	> 1000 mPa.s	1
Transferência de Custódia	≤ 1000 mPa.s	0,3
Transferência de Custódia	> 1000 mPa.s	1
Medição de Apropriação	-	1

Tabela 03 – Classe de exatidão do sistema de medição

Fonte: Adaptado - Regulamento Técnico de medição de Petróleo e Gás, portaria conjunta ANP/ INMETRO disponível em: < <https://www.anp.gov.br/SITE/acao/download/?id=66648> >. Acesso em 11 de mai. de 2019.

Como definido na metodologia, Tabela 03, o óleo aguardado no sistema tem viscosidade inferior a 1000 mPa. O sistema a ser projetado é para medição fiscal então devem ser selecionados instrumentos de medição de vazão com classe de exatidão 0,3.

O INMETRO estabeleceu, através das portarias de aprovação de modelo, PAM, que os modelos de equipamentos de medição de vazão, presentes na Tabela 04 estão classificados com classe de exatidão 0,3, assim, aptos a serem utilizados nos sistemas de medição.

Fabricante	Modelo	Tecnologia	PAM	Qmin.	Qmax.
Fabricante 01	Fab01_Modelo01	Coriolis	PAM003340	1,00	40,31
Fabricante 02	Fab02_Modelo01	Engrenagens	PAM003188	1,00	72,00
	Fab02_Modelo02	Engrenagens	PAM002132	1,80	600,00
Fabricante 03	Fab03_Modelo01	Coriolis	PAM006311	1,00	156,75
	Fab03_Modelo02	Coriolis	PAM003078	1,00	746,45
	Fab03_Modelo03	Coriolis	PAM005984	117,49	2073,49
Fabricante 04	Fab04_Modelo01	Coriolis	PAM006201	1,29	495,33
	Fab04_Modelo02	Coriolis	PAM004361	12,60	1382,30
	Fab04_Modelo03	Coriolis	PAM006202	12,67	1382,32
	Fab04_Modelo04	Coriolis	PAM006400	1,00	1497,52
	Fab04_Modelo05	Ultrassônico	PAM002545	14,00	28400,00
Fabricante 05	Fab05_Modelo01	Coriolis	PAM004544	1,00	691,00
	Fab05_Modelo02	Coriolis	PAM004543	1,00	691,16
Fabricante 06	Fab06_Modelo01	Turbina	PAM004470	15,80	1351,40
	Fab06_Modelo02	Ultrassônico	PAM002933	30,00	70790,00
Fabricante 07	Fab07_Modelo01	Ultrassônico	PAM005016	100,00	2910,00
Fabricante 08	Fab08_Modelo01	Turbina	PAM004024	1,00	4800,00
Fabricante 09	Fab09_Modelo01	Turbina	PAM005590	30,00	6680,00
Fabricante 10	Fab10_Modelo01	Ultrassônico	PAM004924	30,00	9500,00
	Fab11_Modelo01	Ultrassônico	PAM004963	5,30	17000,00
Fabricante 11	Fab11_Modelo02	Ultrassônico	PAM004963	5,90	24200,00
	Fab11_Modelo03	Ultrassônico	PAM004962	5,90	27200,00

Tabela 04 - Modelos de medidores de vazão aprovados pelo INMETRO

Fonte: Adaptado de <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/mais.asp?seq_classe=2>. Acesso em 03 de jun de 2019

Cada medidor possui uma faixa de aplicação para vazão, pressão e temperatura, sendo que alguns medidores também especificam os limites de densidade e viscosidade de trabalho. Devido as diferentes tecnologias de medição os valores de vazão aplicados podem ter suas unidades definidas em volume ou em massa por unidade de tempo.

A seleção do medidor ocorre, após a definição da classe de exatidão, com base na vazão esperada de produção, deve-se levar em consideração o item 9.4.3 do RTM que preconiza que o medidor em operação deve ter a sua vazão usual de operação limitada a +/- 10% da vazão de calibração.

O Gráfico 01 tem a finalidade de facilitar a escolha do medidor de vazão. Ele foi elaborado analisando todos os modelos de medidores de vazão que estão com a PAM aprovada pelo INMETRO. O Gráfico 01 apresenta os valores de vazão dispostos em uma escala logarítmica e os respectivos modelos dos medidores de vazão. A linha intitulada de “Vazão Esperada”, indica o valor de produção aguardado a ser mensurado pelo sistema

de medição, Q_{\max} indica o valor de vazão máximo que o medidor de vazão pode operar e Q_{\min} indica o valor de vazão mínimo que o medidor de vazão pode operar. Para seleção do medidor de vazão utilizando a vazão esperada a linha intitulada “Vazão Esperada” deve estar entre as curvas Q_{\max} e Q_{\min} .

Segundo RIBEIRO, 2003, o medidor do tipo turbina é amplamente utilizado na indústria do petróleo e possui excelente confiabilidade. Qualquer medidor do tipo turbina poderia ser escolhido seguindo esta orientação.

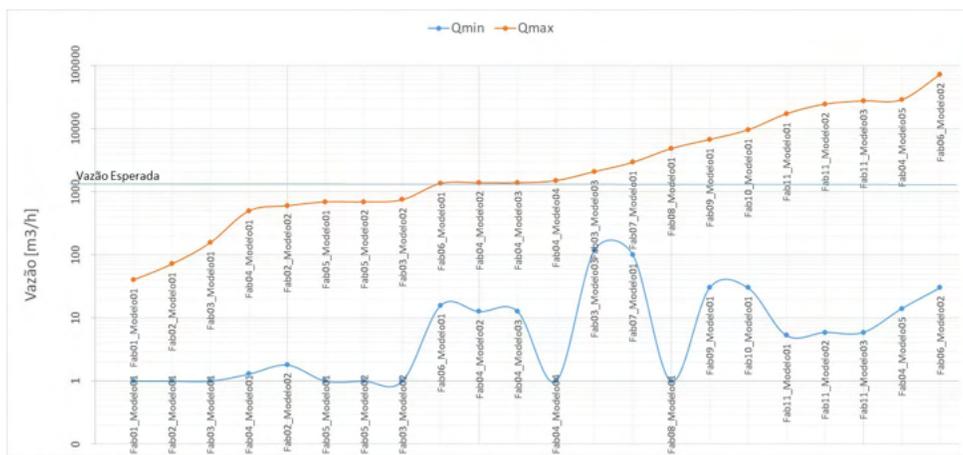


Gráfico 01 – Seleção do Medidor de Vazão por Vazão

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.1.2 Características Particulares do Medidor de Vazão Selecionado

Após a definição do medidor de vazão deve-se avaliar a sua aplicabilidade com base nos valores de temperatura e pressão, e para alguns casos, aplicabilidade também em relação aos limites de viscosidade e densidade. A PAM informa também um conjunto de requisitos particulares que devem ser atendidos especificamente para esse modelo de medidor de vazão.

3.1.3 Sistema de Calibração

O capítulo 9 do RTM especifica os requisitos que devem ser seguidos para utilização e implantação de um sistema de calibração:

- As calibrações devem ser *in loco*, ou seja, realizadas no local de instalação do medidor em operação, utilizando um fluido de massa específica, viscosidade e temperatura observando os seguintes limites máximos de desvio, vinte por cento na massa específica, cinco graus de temperatura, dez por cento (10%) de pressão e vazão;

- Deve haver um sistema que comprove a proficiência do pessoal envolvido no processo de calibração;
- Os medidores em operação devem ser calibrados utilizando provadores, tanques de calibração ou medidor padrão de trabalho;

O sistema de calibração proposto neste trabalho será composto por um medidor padrão de trabalho a ser confrontado, calibrado, contra o medidor em operação, a ser montado na planta de processo, atendendo os requisitos do item da API MPMS Capítulo 21 – *Flow Measurement Using Electronic Metering Systems* - especialmente os requisitos ao item 11 – *Verification and Calibration Equipment*, este item preconiza a existência de:

- Dispositivo de processamento de sinal de entrada para o sistema eletrônico de medição de Líquido, utilizando cartões de entrada de pulsos;
- Dispositivo de processamento de sinal de saída para o sistema eletrônico de medição de Líquido, utilizando cartões de saída de pulsos;
- Transmissor de temperatura;
- Transmissor de pressão;
- Transmissor e conversor de pulsos;
- Condicionador e isolador de sinal intermediário;
- Densímetro de medição em linha;
- Transmissores de sinal para os equipamentos eletrônicos.

O sistema de calibração de vazão deve ter seus valores diretamente comparados aos valores mensurados pelo sistema de medição, seguindo os requisitos do item 11.5 da API MPMS Capítulo 21 – *Flow Measurement Using Electronic Metering Systems*. O medidor padrão de vazão, utilizado como referência no sistema de calibração, deve estar calibrado em laboratório acreditado pelo INMETRO com certificação na ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, em intervalor não superior a três meses conforme especificação do ANEXO B do RTM.

3.1.4 Sistema de Amostragem

O RTM descreve os requisitos para o sistema de amostragem conforme o seu capítulo 8, as amostras de petróleo devem passar por análise quantitativa e qualitativa a serem utilizadas no sistema de computação de líquidos. É preconizada pelo RTM a utilização de um sistema de amostragem automático que deve atender os seguintes requisitos, conforme item 8.1.11 do RTM:

- O ponto de amostragem deve esta imediatamente a montante ou jusante do medidor de volume;
- O ponto deve garantir a representatividade da amostra;

- O recipiente de coleta deve ser estanque;
- A amostra deve ser misturada e homogeneizada antes da sua análise.

O laboratório de análises químicas, que deve manipular e mensurar as amostras obtidas pelo sistema de amostragem, deve atender aos requisitos conforme especificado no item 3.2 deste trabalho.

3.1.5 Medidor de Temperatura

O medidor de temperatura deve ser selecionado de forma a ser compatível com os valores de temperatura média aguardados, especificados na Tabela 03. O medidor escolhido a ser utilizado no sistema de medição proposto neste trabalho é do tipo termoresistência a platina de 100 ohms a zero graus Celsius. Esse modelo foi escolhido devido a sua linearidade e ampla utilização na indústria. O medidor deve atender aos requisitos da NBR 13773:2008 – Termoresistência industrial de platina – Requisitos e ensaio e da NBR-13772: Termoresistência — Calibração por comparação com termoresistência de referência, adicionalmente o medidor de temperatura deve ser calibrado em laboratório acreditado pelo INMETRO com certificação na ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração de acordo com o período estabelecido no Anexo B do RTM, medidores de temperatura em sistemas de medição fiscal devem ser calibrados em intervalo não superior a três meses.

3.1.6 Medidor de Pressão

O medidor de pressão deve ser selecionado de forma a ser compatível com os valores de pressão aguardados, especificados na Tabela 03. O medidor deve também atender os requisitos da norma ABNT NBR 14105-2:2015 Medidores de pressão Parte 2: Medidores digitais de pressão - Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização, adicionalmente o medidor de pressão deve ser calibrado em laboratório acreditado pelo INMETRO com certificação na ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração de acordo com o período estabelecido no Anexo B do RTM, medidores de pressão em sistemas de medição fiscal devem ser calibrados em intervalo não superior a três meses.

3.1.7 Computador de Vazão

O computador de vazão a ser escolhido, devido a simplicidade, será um modelo dedicado a medição de fluidos do tipo hidrocarbonetos líquidos. O computador de vazão selecionado deve atender aos requisitos da ABNT NBR 16020 – Medição eletrônica de líquidos – Computadores de vazão e da portaria do INMETRO Portaria n. ° 499 de 02 de outubro de 2015, que estipula os critérios técnicos e metrológicos aplicáveis aos computadores de vazão.

3.2 Recursos de Apoio

Devem existir recursos disponíveis, a fim de constituir um laboratório de análises físico-químicas certificado e habilitado a realizar as atividades contidas, e normalizadas, de acordo com a Tabela 05.

Norma	Descrição
ABNT 07148/01	Petróleo e Produtos do Petróleo – Determinação da Massa Específica, Densidade Relativa e °API
ABNT 14065/2006	Destilados de Petróleo e Óleos Viscosos – Determinação da Massa Específica e da Massa Específica Relativa pelo Densímetro Digital
ASTM D4052-2009	Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter
ASTM D5002/1999	Standard Test Method for Density and Relative Density of Crude Oils by Digital Density Analyzer
API/MPMS 9.1/2002	Hydrometer Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products
API/MPMS 9.3/2002	Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Thermohydrometer Method
ABNT-14236/02	Produtos de Petróleo e Materiais Betuminosos – Determinação do Teor de Água por Destilação
ABNT-NBR 14647/01	Produtos de Petróleo – Determinação da Água e Sedimentos em Petróleos e Óleos Combustíveis pelo Método de Centrifugação
ASTM D4007/08	Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure)
API/MPMS 10.1/02	Standard Test Method for Sediment in Crude Oils and Fuel Oils by the Extraction Method, Second Edition
API/MPMS 10.4/99	Determination of Water and Sediment in Crude Oil by Centrifuge Method (Field Procedure)
API/MPMS 10.7/02	Standard Test Method for Water in Crude Oil by Karl Fischer. Titration (Potentiometric) (ANSI/ASTM D4377) (IP 356)
ASTM D2892/05	Standard Test Method for Distillation of Crude Petroleum (15 -Theoretical Plate Column)
ASTM D5236-3/07	Standard Test Method for Distillation of Heavy Hydrocarbon Mixtures (Vacuum Potstill Method)
ABNT-NBR14533/07	Produtos de petróleo - Determinação de enxofre por espectrometria de fluorescência de raios X (energia dispersiva)
ASTM D129-00/05	Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products (General Bomb Method)
ASTM D1945/03	Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography.
ASTM D4294/10	Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry

ASTM D2622/10	Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry
---------------	--

Tabela 05 - Requisitos normativos para laboratório de análises físico químicas.

Fonte: Adaptado de <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/mais.asp?seq_classe=2>. Acesso em 03 de jun de 2019

Também deve existir um laboratório de instrumentação, a disposição, rastreável a rede brasileira de calibração, com a função de calibrar, aferir e manter os equipamentos que compõem o sistema de medição. Este laboratório deve atender os requisitos dispostos na norma ABNT-NBR ISO 10012/04 - Sistemas de Gestão de Medição – Requisitos para os Processos de Medição e Equipamento de Medição e da ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração.

4 I CONCLUSÃO

O projeto do sistema de medição, orientado pelos requisitos do RTM, é rígido e requer um amplo conhecimento de normas nacionais e internacionais, percebe-se também que o sistema normativo brasileiro ainda é carente quanto a existência de normas aplicáveis a indústria do petróleo, especialmente as relacionadas aos requisitos de medição e caracterização do petróleo e suas variáveis.

O sistema de medição não é um sistema que deve ser introduzido na planta de processo após a sua conclusão. Os requisitos de localização e compatibilidade afetam profundamente a concepção do projeto da planta de processo do FPSO. Assim como a variabilidade do sistema de medição, especialmente no que se refere a escolha do medidor de volume. Cada portaria de aprovação de modelo especifica requisitos próprios de instalação e operação, assim a depender do modelo e do fabricante selecionado os requisitos legais para instalação serão distintos. Desta forma a substituição do medidor por outro de modelo ou tecnologia diferente pode ocasionar a desregulamentação do sistema.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR ISO 10012 – Sistemas de gestão de medição – Requisitos para os processos de medição e equipamento de medição**. 1ª ed. 30 de abril de 2004.

_____. **NBR-13772:2008 Termoresistência – Calibração por comparação com Termoresistência de referência**. 1ª ed, 11 de ago de 2008.

_____. **NBR 13773:2008 – Termoresistência industrial de platina – Requisitos e ensaio**. 1ª ed, 11 de ago de 2008.

_____. **NBR 14105-2:2015 – Medidores de pressão**. Parte 2: Medidores digitais de pressão - Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização. 1ª ed, 01 de dez 2015.

_____. **NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração.** 1ª ed, 19 de ago 2014.

AGENCIA NACIONAL DO PETROLEO E GÁS. **Portaria Conjunta ANP/INMETRO nº 01, de 10 de junho de 2013.** Aprova o Regulamento técnico de medição de petróleo e gás natural. Disponível em: < <https://www.anp.gov.br/SITE/acao/download/?id=66648> >. Acesso em 11 de maio de 2019.

_____. **Plano de Desenvolvimento Aprovado Campo de Lula – Resolução nº007/2018.** Rio de Janeiro, 10 de janeiro de 2018. Disponível em <http://www.anp.gov.br/images/exploracao_e_producao_de_oleo_e_gas/gestao_contratos/fase_producao/planos_desenvolvimento/sumario_lula.pdf> Acesso em: 18 de maio de 2019.

_____. **Produção brasileira de petróleo em março cresce 2,8% em relação a fevereiro.** Rio de Janeiro, 03 de maio de 2019. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/noticias/anp-e-p/5162-producao-brasileira-de-petroleo-em-marco-cresce-2-8-em-relacao-a-fevereiro>> Acesso em: 18 de maio de 2019.

ALBERTAZZI, ARMANDO; SOUZA, ANDRÉ ROBERTO DE. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** 1ª. ed. Barueri: Manole, 2008.

ALBURQUERQUE, Karina Ferreira Soares de. **A importância dos recursos provenientes de royalties do petróleo como forma de distribuição de renda e aumento das relações de consumo.** 2013. Dissertação (Mestrado) - Direito Econômico, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná, 2013.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API/MPMS Chapter 21, Flow Measurement Using Electronic Metering Systems, Section 2 – Electronic Liquid Volume Measurement Using Positive Displacement and Turbine Meters,** Washington D.C., 1ª ed, 1998.

_____. **API/MPMS Chapter 7.2/2001, Temperature-Dynamic Temperature Determination.** Washington D.C., 2001. 38 p.

BRASIL. **Constituição Federal de 1988.** Poder Executivo, Brasília, DF, 5 out. 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm> Acesso em 28 de maio de 2019.

_____. Lei nº 5.966. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil,** Poder Executivo, Brasília, DF, 11 dez 1973. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L5966.htm >Acesso em 27 de maio de 2019.

_____. Lei nº 9.478. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil,** Poder Executivo, Brasília, DF, 6 ago 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9478.htm> Acesso em 08 de Maio de 2019.

_____. Lei nº 9.847. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil,** Poder Executivo, Brasília, DF, 26 out 1999. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9847.htm> Acesso em 27 de Maio de 2019.

_____. Lei nº 9.933. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil,** Poder Executivo, Brasília, DF, 20 dez 1999. Disponível em: < www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9933.htm> Acesso em 27 de Maio de 2019.

_____. Lei nº 12734. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 de nov de 2012. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/.../Lei/L12734.htm>. Acesso em 28 de maio de 2019.

CABRAL, Paulo. **Erros e Incertezas nas Medições**. Senhora da Hora, Portugal, 1ª ed, Instituto Eletrotécnico Português, 2004.

DELMEE, G.J. **Manual de medição de vazão**. São Paulo, 3ª ed, Edgard Blucher, 2003.

FERREIRA, Ana Luísa Auler da Silva. **Tecnologia Ultrassônica na Medição de Vazão em Escoamentos Incompressíveis**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LIRA, FRANCISCO ADVAL DE. **Metrologia na Indústria**. 3ª ed. São Paulo: Erica, 2011

ISO GUM - ABNT, INMETRO, SBM, “**Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**”, Segunda Edição Brasileira, Rio de Janeiro, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 91-2/1991**. Petroleum measurement tables - Part 2: Tables based on a reference temperature of 20 degrees C. Genebra: 1991. 3p.

_____. **ISO 9770/1989**. Crude petroleum and petroleum products -- Compressibility factors for hydrocarbons in the range 638 kg/m³ to 1 074 kg/m³. Genebra, 1989. 1 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia**. Rio de Janeiro: 2012. 95p.

_____. Portaria de aprovação de modelos de instrumentos de medição. Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/mais.asp?seq_classe=2>. Acesso em: 01 de jun. de 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. **OIML R 117-1** Dynamic measuring systems for liquids other than water - Part 1: Metrological and technical requirements. França: 2007. 127p. Disponível em: <https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r117-1-e07.pdf> Acesso em: 15 de jun de 2019.

OSCAR, R. F. P. **OPERAÇÃO DE OFFLOADING: operação de alívio em um FPSO com navio convencional**. 2013. 136 f. Dissertação (Aperfeiçoamento para oficiais de Náutica), Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2013.

PETROLEO BRASILEIRO S.A. **Nova plataforma que entra em produção este ano, segue para Bacia de Campos**. Rio de Janeiro: 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados-1/nova-plataforma-que-entra-em-producao-este-ano-segue-para-bacia-de-campos.htm>>. Acesso em: 20 de maio de 2019.

_____. **Pré-sal**. Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>> . Acesso em: 06 de jun. de 2019.

_____. **Tipos de plataformas: Conheça as tecnologias de nossas operações no mar.**

Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>> Acesso em 28 de maio de 2019.

RIBEIRO, M. A. **Instrumentação.** Câmara Brasileira do Livro, 14ª ed. Salvador, 2008.

_____. **Medição de Petróleo e Gás,** Apostila, 4ª ed. Salvador, 2003.

_____. **Incerteza na Medição – Fundamentos e Aplicações,** Apostila, 2ª ed. Salvador, 2006.

ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., XAVIER, J.A.D., **Engenharia de Reservatórios de Petróleo,** Interciência, 2006.

SILVA FILHO, J. A. P et al. **Importância da Avaliação das Incertezas na Medição dos Volumes de Petróleo e Gás Natural.** Revista Produto & Produção, vol. 11, n. 1, p. 99 - 112, fev. 2010. Disponível em < seer.ufrgs.br/index.php/ProdutoProducao/article/viewFile/11840/7042>. Acesso em: 05 de maio de 2019.

THOMAS, Jose Eduardo. **Fundamentos de engenharia de petróleo.** São Paulo, 2ª ed, Interciência, 2004.

WATLOW, **Poço termométrico com rosca.** Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/watlow/product-7347-210606.html>> Acesso em: 29 de maio de 2019.

SHM BASEADO EM ONDAS DE LAMB E MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O LIMIAR DE DETECÇÃO DE DANO APLICADO A ESTRUTURAS DE AERONAVES

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 08/10/2021

Lucas Altamirando de Andrade da Rocha

LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, INCT (EIE) – Instituto da Nacional de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia Mecânica
Uberlândia, MG
<http://lattes.cnpq.br/6293082139470909>

Roberto Mendes Finzi Neto

LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, INCT (EIE) – Instituto da Nacional de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia Mecânica
Uberlândia, MG
<http://lattes.cnpq.br/3792275882221002>

Valder Steffen Jr

LMEst – Laboratório de Mecânica de Estruturas, INCT (EIE) – Instituto da Nacional de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia Mecânica
Uberlândia, MG
<http://lattes.cnpq.br/6838375689601075>

principalmente, na identificação de danos estruturais, mas não tanto sobre modelagem estatística para determinar um valor de referência a ser considerado como limiar para a tomada de decisão do sistema de detecção de dano. Neste estudo, a técnica de ondas de Lamb é utilizada na detecção de danos considerando os efeitos da variação da temperatura. Para este objetivo, foi utilizada uma placa de alumínio 2024-T3 instrumentada com PZT's na configuração *Pitch-Catch* e com a temperatura variando de $25\pm 3^{\circ}\text{C}$. Assim, este trabalho propõe um método para determinar estatisticamente um limite para fins de detecção de danos usando conceitos de Controle Estatístico de Processos, com o objetivo de obter um diagnóstico dentro de um dado nível de confiança. Apresenta-se uma avaliação da sensibilidade da técnica de ondas de Lamb quando aplicada a placas de alumínio sob condições de temperatura variável. Com a técnica proposta, os níveis de limite de dano são determinados de modo que as pastilhas de PZT são capazes de identificar o dano inserido entre eles, sendo este caracterizado pela norma de avaliação não destrutiva, com intervalos de confiança de 95% dentro da gama de temperaturas considerado.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento da integridade estrutura, ondas de Lamb, determinação de threshold, análise estatística.

RESUMO. O método baseado nas ondas de Lamb tornou-se uma ferramenta promissora para a identificação de danos e é considerado como sendo uma técnica de avaliação não destrutiva. Estudos convencionais têm focado,

SHM BASED ON LAMB WAVES AND STATISTICAL METHODS FOR THE DAMAGE DETECTION THRESHOLD

ABSTRACT: The method based on Lamb waves has become a promising tool for damage identification and is considered as being a non-destructive damage detection technique. Conventional studies have focused mainly on identifying structural damage, but not so much on statistical modeling to determine a threshold for decision making in damage detection systems. In this study, the Lamb wave technique is used to detect damage considering the effects of temperature variation. For this purpose, a 2024-T3 aluminum plate instrumented with piezoelectric transducers in the Pitch-Catch configuration was used, with temperatures varying according to $25\pm 3^{\circ}\text{C}$. Consequently, the present work proposes a statistical methodology to determine the limit (threshold) for damage detection using concepts of Statistical Process Control, within a given confidence level diagnosis. The results showed that the damage threshold levels were able to identify the damage inserted in the plate, which is characterized by the non-destructive evaluation standard with 95% confidence intervals within the considered range of temperatures.

KEYWORDS: Structural health monitoring, Lamb waves, threshold determination, statistical analysis.

1 | INTRODUÇÃO

A estratégia de monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) e avaliação não destrutivas (*Nondestructive Evaluation* – NDE) são foco importante de vários trabalhos de investigação científica ao longo dos últimos vinte anos. Na indústria aeroespacial, especialmente, ao se considerar o envelhecimento da frota de aeronaves, atualizações (tais como maior capacidade de carga e instalação de novos equipamentos), tudo isso acrescenta motivação para o desenvolvimento de sistemas de SHM. Uma vez estabelecida uma metodologia de SHM, o processo completo geralmente inclui as seguintes etapas: avaliação operacional para aquisição de dados, seleção de atributos e, finalmente, análise estatística para tomada de decisão (Farrar et al., 2005).

Quando implantado, o sistema de SHM terá que lidar com estruturas que experimentam mudanças nas condições operacionais e ambientais. Estas mudanças nas condições operacionais e de avaliação produzirão mudanças na resposta medida e é imperativo que essas mudanças não sejam interpretadas erroneamente como indícios de danos (falsos positivos). A variação da temperatura ambiente é uma condição comum que deve ser contabilizada durante o processo de detecção de danos (Inman et al, 2005).

Um exemplo em sensoriamento local ativo para detecção de danos usando sensores de PZT é o método baseado nas ondas de Lamb (Sohn et al., 2005, Paget et al., 2003, Kessler et al. 2003). O método das ondas de Lamb monitora as ondas mecânicas elásticas que trafegam na estrutura carregando informação da existência de danos ao longo de seu trajeto. Embora algumas propriedades piezoelétricas sejam dependentes de mudanças de temperatura, existem técnicas de compensação que podem mitigar estes efeitos. Efeitos da variação de temperatura e procedimentos de compensação têm sido amplamente

estudados (Kijanka et al., 2013; Harley et al., 2012; Rocha et al., 2014).

A estatística no processo de tomada de decisão é uma das principais ferramentas de um sistema de SHM. Embora as ondas de Lamb sejam tipicamente usadas para identificação de danos estruturais (Su et al., 2006 e 2009; Ramadas et al., 2011; Monnier et al., 2006; Lu et al., 2009; Park, 2007; Sorohan et al., 2011), a maioria dos estudos fazem uso limitado de modelos estatísticos. Um dos objetivos dos modelos estatísticos em SHM é o de minimizar os diagnósticos falsos.

Este capítulo investiga a utilização de pastilhas de PZT (sensores/atuadores piezelétricos) para detectar uma modificação estrutural representada pela adição de massa (modificação estrutural usada como simulação de dano), seguindo a norma de avaliação não destrutiva feita em uma placa de alumínio 2024-T3 (material normalmente utilizado em aeronaves), considerando-se um intervalo de temperatura de 3 °C em torno da temperatura base de 25 °C. Evidentemente, a escolha deste intervalo de temperatura não corresponde a todo o intervalo de temperatura de uma superfície de asa de avião (-55 a 80 ° C), no entanto, permite ilustrar a metodologia proposta. Em seguida, um modelo estatístico foi desenvolvido para determinar os índices de limiar de dano de acordo com um nível de confiança pré-definido. Assim, este trabalho fornece uma avaliação da sensibilidade da técnica das ondas de Lamb considerando a taxa de sucesso, a fim de detectar danos inseridos em placas de alumínio sob condições de temperatura variável.

2 | ONDAS DE LAMB BASEADOS PARA SHM

Nesta secção, o princípio em que a técnica das ondas de Lamb (*Lamb Wave* – LW) se baseia é brevemente discutido juntamente com a metodologia segundo a qual os danos estruturais são detectados. Além disso, são discutidos ainda os problemas relacionados à variação de temperatura.

2.1 Princípio físico da técnica de LW

A técnica de LW é considerada como um método não destrutivo (Monnier, 2006). As ondas de Lamb geralmente ocorrem nos materiais que servem como guias de onda, tais como vigas, placas e cascas. A propagação das LW envolve certa complexidade devido a duas características: dispersão e multimodo (Viktorov, 1967). A técnica permite detectar, principalmente, defeitos presentes em estruturas esbeltas que são suscetíveis a sofrer perturbações provenientes do atuador piezelétrico incorporado (Farrar et al., 2005).

Raghavan e Cesnik (2005) definem dois métodos de diagnóstico habituais associados com a técnica de LW, a saber, o método de *pulse-echo* e o método *pitch-catch*. Em ambos os métodos o atuador excita a estrutura com um sinal de pulso, geralmente um único tom modulado na janela Hann 3,5 (Raghavan e Cesnik, 2005).

Ambas as metodologias fazem uso de algoritmos de processamento digital de sinais a fim de se extrair características referentes ao meio de propagação do sinal adquirido.

Sendo assim, pode-se, por exemplo, utilizar a Transformada Rápida de Fourier para detectar frequências características (Lemistre et al, 1999), ou ainda utilizar a Transformada Wavelet Contínua (TWC) para se extrair as características necessárias (Sohn, 2005), dentre outras. O presente trabalho utiliza TWC para extração das características do sinal (Debnath, 2001), sendo que o método de diagnóstico aqui utilizado é o do *pitch-catch*.

Definido o sinal de entrada e após excitar a estrutura, o sinal então adquirido é processado através da TWC, levando à obtenção de um escalograma que representa o sinal no plano escala-tempo. Seleciona-se então a escala correspondente à frequência de excitação e obtém-se o sinal filtrado que carrega as características de propagação do meio físico. A partir deste sinal define-se a região de análise.

Assim, analisando a janela de dados e procurando o pico do sinal, pode-se definir o tempo em que ocorre o chamado TOF (*Time of Flight*) e o valor do pico dado neste momento. Além disso, a energia do sinal pode ser utilizada para caracterizá-lo (Sohn, 2005).

2.2 Índice de Dano

É possível determinar um valor quantitativo associado ao dano. Um dos índices mais utilizados é o chamado Índice de Dano (*Damage Index – DI*) (Sohn, 2005; Lu et al., 2009) que utiliza uma comparação entre a energia da baseline e os sinais processados por TWC (Lu et al., 2009; Abbateet al., 1997; Lind et al., 2001; Farrar et al., 2005). A formulação para esta métrica é dada pela Eq. (1).

$$DI = 1 - \frac{\int_{x_1}^{x_2} Wft(x, S_0) dx}{\int_{x_1}^{x_2} Wfb(x, S_0) dx} \quad (1)$$

onde $Wft()$ é a Transformada de Wavelet do sinal testado; $Wfb()$ Transformada de Wavelet do sinal da baseline; x tradução da wavelet utilizada em TWC; S dilatação da wavelet utilizada em TWC; x_1 e x_2 são os intervalos de tradução (ligada ao tempo) analisados pela TWC.

A sensibilidade desta técnica depende da frequência de excitação selecionada, da amplitude aplicada, além do período da onda de Lamb. No entanto, este método utiliza apenas um canal de entrada para gerar o *tone burst* e, depois disso, o sinal é analisado.

2.3 Influência da temperatura na LW

Há uma série de efeitos relacionados com a temperatura que afetam o desempenho de um sistema baseado em LW para SHM. Alguns deles estão relacionados com a dependência da temperatura observada em alguns parâmetros e propriedades do acoplamento adesivo dos transdutores. Estes efeitos podem ser geralmente observados como uma variação na amplitude do sinal. No entanto, apenas fenômenos que contribuem para a dependência da temperatura da propagação da LW são aqui considerados; isto é, a expansão térmica ou contração que altera a distância de propagação e aparece como

uma mudança de velocidade da onda. Com base nestes efeitos, pode ser assumido que um efeito da temperatura sobre um sinal LW pode ser aproximado por um *time-stretch* do sinal $x_{(t)}$.

$$x_{(t)} \xrightarrow{\text{Temp}} x_{(\alpha t)} \quad (2)$$

onde α é a constante de *time-stretch* (Harley et al., 2012). Esta mudança pode ser observada como uma mudança de fase instantânea do sinal. A transformada de Hilbert pode ser empregada como uma ferramenta para extrair essa característica (Kijanka et al., 2013). Utilizando esta abordagem, tem-se um sinal complexo:

$$z_{(t)} = A_{(t)} e^{i\phi(t)} \quad (3)$$

onde representa a fase do sinal.

Se o sinal é afetado apenas pela temperatura, é esperado que uma única fase do sinal mude. Portanto, a influência da temperatura pode ser eliminada se as fases do sinal lido e a baseline forem conhecidos. A fase do sinal modificado pode ser determinada simplesmente usando a seguinte relação:

$$z'_{(t)} = z_{(t)} e^{i(\phi_B(t) - \phi(t))} \quad (4)$$

onde $\phi_B(t)$ é a fase sinal lido da baseline.

O sinal lido pode ser convertido de sua forma analítica de volta para o domínio do tempo, produzindo o sinal com a influência da temperatura compensada.

A compensação, no entanto, é apenas para as diferenças de propagação de ondas e não leva em conta os efeitos relacionados com as flutuações no desempenho de transdutores.

Neste estudo, a dependência da temperatura é ressaltada mostrando que uma variação pequena de temperatura pode influenciar no procedimento, levando a uma falsa interpretação. Embora o presente trabalho não aborde a técnica de compensação de temperatura, seu efeito fica bem evidente e é um fator crucial na tomada de decisão sobre a existência de dano na estrutura.

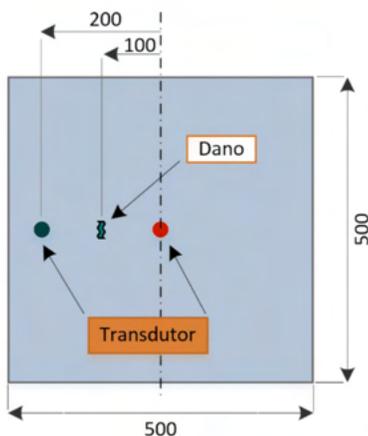
3 | PROJETO EXPERIMENTAL E CONFIGURAÇÃO

O foco deste trabalho está na preocupação quanto à incerteza sobre a existência ou não de danos estruturais (minimizando os falsos negativos e falsos positivos). Para a técnica de LW, exemplos de variáveis que influem no processo são a banda de frequência a ser escolhida ao excitar o corpo de prova, os transdutores piezoelétricos, o dispositivo de medição, o procedimento de colagem do sensor, as condições ambientais e operacionais, dentre outras. A incerteza do processo NDE é representada por uma matriz de teste contendo diferentes inspeções a serem realizadas no conjunto completo de amostras

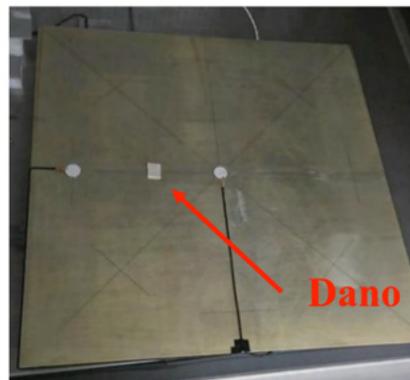
(Ginzel, 2006).

Assim, uma placa de alumínio 2024-T3, com dimensões de 500x500x1,6 mm e massa de 1.120 kg foi instrumentada com duas pastilhas de PZT (diâmetro de 15x0,5 mm espessura, do tipo 5H). Os sensores-atuadores de PZT foram colados com um adesivo à base de epoxi (Hysol EA9320NA). O corpo de prova foi preparado conforme ilustra a Figura 1(a). A fim de introduzir os danos foi seguido a norma MIL-HDBK 1823A que utiliza a adição de massa (Figura 1(b)) para simular diferentes níveis de danos na estrutura, segundo Farrar (2005). O procedimento da medição de ondas de Lamb foi descrito por Farrar (Farrar et al., 2005). A frequência de excitação foi escolhida experimentalmente. Este procedimento é tipicamente utilizado quando não é possível modelar o corpo de prova (por ser algo muito complexo). A mesma técnica foi adotada para generalizar sua aplicação, ou seja, a frequência de 30 kHz foi adotada com a modulação Hann 3.5 (SOHN, 2005). Para geração do sinal foi utilizado um gerador de função da *National Instruments* (PXI-5412 de 14 Bits de resolução e taxa de amostragem de 100 MS/s com amplitude máxima de $\pm 12 V_{pk-pk}$). Já para aquisição do sinal foi utilizado um digitalizador, também da *National Instruments* (PXI-5105, com 12 bits de resolução e taxa de amostragem de 60 MS/s, com 8 canais independentes). Esses equipamentos (PXI-5412 e PXI-5105) estão embarcados no chassi PXI-1033, uma controladora robusta com capacidade de operar ambos os equipamentos em tempo real. Na Figura 1(d) mostra-se o equipamento utilizado.

Para o controle de temperatura foi utilizada a câmara climática EPL-4H da série Platinous, Figura 1(c), que emprega um sistema BTHC (*Balanced Temperature and Humidity Control*) que opera com temperaturas que vão de -40°C a 180°C com uma resolução de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1: Configuração experimental: (a) Localização dos transdutores, danos e dimensões; (b) o painel instrumentado com adição do dano; (c) corpo de prova colocada no interior da câmara climática nas condições de contorno multe apoiado; (d) equipamento de geração e aquisição de sinal.

No interior da câmara climática a temperatura variou conforme 25 ± 3 °C. O tempo para estabilizar a temperatura no interior da câmara climática foi definido como sendo de 45 minutos, (Incropera et al., 2006). Assim, com a temperatura estável, foi realizada a aquisição da baseline da estrutura saudável nas temperaturas alvo; seguindo a norma MIL-HDBK 1823A foram introduzidos danos graduais em 4 níveis, conforme a adição de um *stick patch*, respeitando o tempo entre as adições de danos para a temperatura estabilizar.

Foram adquiridos 500 sinais para cada situação, com intervalo entre leituras de 100ms. É importante mencionar que foram adotados vários procedimentos para minimizar efeitos de ruído na coleta do sinal, além de sincronizar os sinais com um algoritmo de *trigger* (Tseng et al., 2002) no sinal aplicado no PZT atuador para não interferir nos sinais coletados.

Para simular o dano na estrutura, optou-se pela adição de massa. Para tanto, foi utilizado um *stick-pad* de dimensões de 10x5x2 mm para o primeiro dano (Dano 1), 10x10x2 mm para o segundo (Dano 2), 10x15x2 mm para o terceiro (Dano 3) e 10x20x2 mm para o quarto dano (Dano 4). Este procedimento (adição de massa) foi selecionado pela facilidade de simular danos na estrutura (provocando uma modificação estrutural), porém sem danificar a mesma.

4 | RESULTADOS E INDICES DE DANO

Os resultados de monitoramento usando o sistema de LW são mostrados na Fig. 2, onde se pode ver as 3 baselines para as temperaturas de 22°C, 25°C e 28°C. É também possível ver o efeito da temperatura na Fig. 2. Nota-se que cada um dos três sinais são as médias dos sinais de cada baseline.

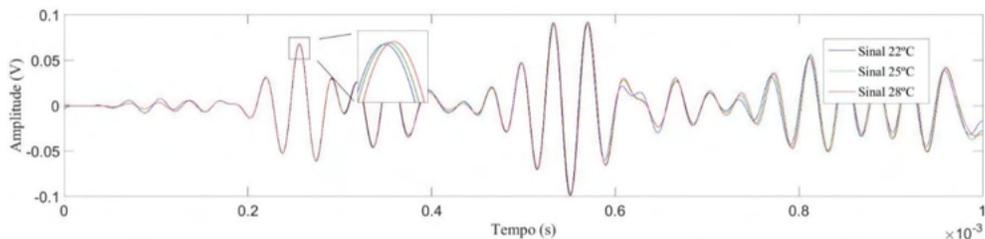


Figura 2: Sinal da *baseline* para as temperaturas de 22°C, 25°C e 28°C

Na Fig. 3 pode-se observar os índices de dano nas respectivas temperaturas, onde a situação BL se refere à estrutura saudável e as marcações 01, 02, 03 e 04 são as progressões do dano na estrutura segundo a Eq. 01.

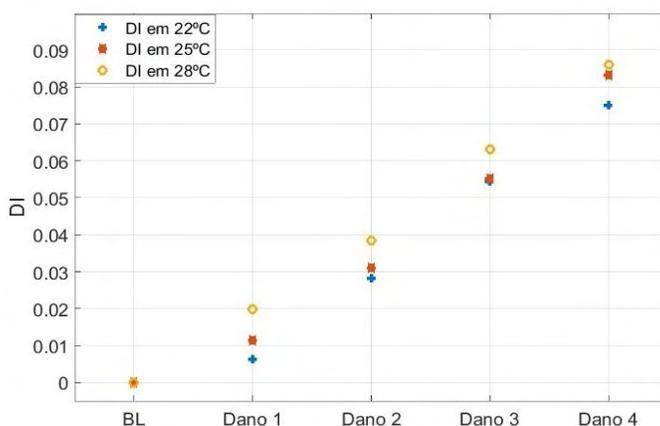


Figura 3: Índice de Dano em 22°C, 25°C e 28°C

Estes resultados mostram que é possível determinar, através de avaliações estatísticas, o valor do limiar que permite o sistema de LW indicar corretamente a presença de danos, mesmo com variações de temperatura, quando se tem a *baseline* na temperatura alvo.

A seção seguinte descreve o procedimento usado na análise estatística para determinar o valor de limiar, de modo que o sistema de detecção de danos seja capaz de distinguir um estado saudável a partir de um estado com dano.

5 | ANÁLISE ESTATÍSTICA E TAXA DE ACERTO

Em SHM é altamente desejável que um nível de limiar (*threshold*) de confiança possa ser estabelecido com base na informação adquirida a partir da estrutura saudável. Após a aquisição dos dados, o próximo passo é a preparação dos sinais brutos para posterior

análise. Neste sentido, a primeira operação tem a ver com a edição dos dados. Isto se refere às operações de pré-análise que são feitas para detectar e eliminar os sinais de dados espúrios ou degradados que podem resultar de aquisições e processos de gravação dos sinais, como o ruído excessivo, quedas de sinal, ou mesmo de alguma causa externa, como uma falha de alimentação (Bendat et al., 2000).

5.1 Teste de Chauvenet

O objetivo do critério de Chauvenet é remover os valores da amostra que têm uma maior dispersão em relação à média e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. Assim sendo, o critério do Chauvenet afirma que o desvio de cada uma das medições é comparado com o desvio padrão e, se for inferior à metade da média, então a medição suspeita deve ser rejeitada (Taylor, 1997).

Este critério presume que os erros estão normalmente distribuídos e têm variância constante e específica que qualquer leitura a partir de uma amostra de N leituras deve ser rejeitada se a magnitude do desvio d_{max} do valor médio da amostra é tal que a probabilidade de ocorrência deste desvio exceda $\left(\frac{1}{2N}\right)$. A Eq. 5 fornece o desvio máximo conforme:

$$\frac{d_{max}}{s} = 2.8751e^{0.0003N} - 1.0038e^{-0.0212N} - 1.2712e^{-0.2674N} \quad (5)$$

onde s é o desvio padrão da série e N é o número de pontos de dados. A literatura recomenda que o teste de Chauvenet não deve ser aplicada uma segunda vez. Portanto, esta recomendação foi rigorosamente seguida neste estudo (Reddy et al., 2011). Além disso, a suposição de que a amostra segue uma distribuição normal foi verificado através de testes de normalidade.

5.2 Teste de normalidade

Entre os testes de normalidade existentes na literatura sobre estatística, dois foram os escolhidos para verificar a normalidade das amostras. Sendo sucinto, neste trabalho os resultados são apresentados para o DI calculado para todas as situações propostas. O teste de *Jarque-Bera* (JB) e o teste de *Lilliefors* (LF) foram escolhidos uma vez que estes testes mostram-se estatisticamente mais rigorosos e adequados para avaliação das amostras de DI. A desvantagem do teste *Komolgorov-Smirnov* para este processo é que este se baseia na informação da população que gerou a amostra de ensaio, ao passo que no LF são testados os parâmetros estatísticos de base a partir da amostra considerada, ao invés de se considerar a população e que, no caso em tela, é inicialmente desconhecida. O teste JB usa os momentos estatísticos de *Skewness* e *Kurtosis*, para verificar se uma amostra vem de uma função de densidade de probabilidade de Gauss (PDF). Neste trabalho, os códigos MATLAB do toolbox de estatística foram utilizadas e são brevemente descritos nesta seção.

Para estes dois testes de normalidade, amostras de tamanho inferior a 1.000 e níveis

significativos entre 0,001 e 0,50, o teste utiliza uma tabela de valores críticos computados utilizando uma simulação de Monte Carlo. A Tabela 1 resume os resultados do teste de normalidade:

Skewness	Kurtosis	Teste	Ho	p-value[%]	Val. Lim.	Val. Crit.
0,0378	2,8832	JB 22°C	0	0,5000	0,4032	5,8581
		LF 22°C	0	0,5000	0,0190	0,0403
0,1075	2,6678	JB 25°C	0	0,1728	3,2620	5,8580
		LF 25°C	0	0,1482	0,0350	0,0404
-0,0216	2,6412	JB 28°C	0	0,2304	2,7207	5,8581
		LF 28°C	0	0,5000	0,0230	0,0403

Tabela 1: Resultados do teste de normalidade.

Na Tabela 1, os valores de *Skewness* e *Kurtosis* são os momentos estatísticos da amostra analisada. Um teste de normalidade simples é o de verificar se o valor de *Skewness* da amostra é próximo de zero, indicando assim simetria da PDF, bem como a *Kurtosis* com valor de três, indicando o formato de pico semelhante à forma de sino clássica de uma distribuição de Gauss. corresponde à hipótese nula, ou seja, 'a amostra segue uma distribuição normal' e o resultado em ambos os casos, sendo que 0 significa que a hipótese nula não deve ser rejeitada. O valor p indica o resultado do teste de hipótese. Se o valor de p é menor do que o nível de significância, α ($\alpha=5$), isso significa que a hipótese nula deve ser rejeitada. As duas últimas colunas correspondem aos valores-limite e os níveis críticos dos testes de normalidade. Para que a hipótese nula seja aceita, o valor crítico deve ser maior do que o valor limite. Estes resultados seguem a notação usada na toolbox de estatística do MATLAB®. Por conseguinte, os resultados indicam que a amostra poderia estar associada a uma distribuição de Gauss, com 95% de confiança.

5.3 Determinação do valor de *Threshold* com o Controle Estatístico de Processos e intervalos de confiança

Como a normalidade foi confirmada, um procedimento mais significativo para estimar os parâmetros de variáveis aleatórias envolve a estimativa de um intervalo, em oposição ao valor de um ponto único, que inclua o parâmetro a ser avaliado com um grau conhecido de incerteza. Para o caso do cálculo do valor médio, um intervalo de confiança pode ser estabelecido para o valor médio μ_x com base na média da amostra \bar{x} , de acordo com a Eq. 5:

$$\left[\bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\alpha}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\alpha}}{\sqrt{N}} \right], \nu = N - 1 \quad (5)$$

onde μ_x e σ_x são a média da população e o desvio padrão, respectivamente, \bar{x} é a média das amostras, N é o tamanho da amostra, ν é o número de DOF, e $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ é a variável

padronizada dada pela Eq. 6, associado com a significância do nível de α :

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (6)$$

Como σ_x é desconhecido, pode-se determinar o intervalo de confiança para a média desconhecidos os valores de μ_x e variância σ_x^2 . Para uma amostra de tamanho N , considera-se as Eq. 7 e Eq. 8 (Charles, 2013) para dar os intervalos de confiança para as médias e variâncias, respectivamente:

$$\left[\bar{x} - \frac{st_{v;\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{st_{v;\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{N}} \right], v = N - 1 \quad (7)$$

$$\left[\frac{vS^2}{\chi^2_{v;\frac{\alpha}{2}}} \leq \sigma_x^2 < \frac{vS^2}{\chi^2_{v;1-\frac{\alpha}{2}}} \right], v = N - 1 \quad (8)$$

onde s^2 é a variância da amostra, $t_{v;\frac{\alpha}{2}}$ é uma variável t de *Student* com DOF e $\chi^2_{v;\frac{\alpha}{2}}$ é uma variável Qui-Quardado considerados v DOF.

Portanto, estes intervalos foram obtidos e o limiar foi determinado de acordo com a Eq. 9:

$$DI_{\text{threshold}} = \mu_{x_{\text{max}}} + 5 \sigma_{x_{\text{max}}} \quad (9)$$

onde $\mu_{x_{\text{max}}}$ é o limite superior para a média da população e $\sigma_{x_{\text{max}}}$ é o limite superior para o desvio padrão da população, ambos obtidos a escolha de um nível de significância de $\alpha=1\%$ aplicado as Eqs. 7 e 8. Deve-se notar que a escolha do valor de *threshold* influencia na probabilidade de detectar um falso positivo. Além disso, o intervalo de confiança obtido com a Eq. 7 é geralmente mais largo do que o obtido com a Eq. 5, embora essa diferença diminui à medida que o tamanho da amostra aumenta. No entanto, a Eq. 5 fornece um intervalo de confiança da média, com o pressuposto de que a variância da amostra é igual à variação da população. Neste trabalho, a Eq. 5 foi utilizada para estimar o intervalo de confiança significativo, uma vez que a normalidade foi previamente verificada.

6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma comparação de todos os valores do índice de danos com os valores de *threshold* de cada temperatura resultou em uma definição sobre a sensibilidade do sistema. Esta comparação foi feita também para o caso em que todas as amostras estavam intactas, a fim de realizar uma análise da taxa de falsos positivos.

Como já foi dito, o objetivo desse trabalho é mostrar a influência da temperatura ao se determinar o nível de dano em uma estrutura. Assim, na Fig. 4(a) o cálculo do DI foi utilizado para a *baseline* referente à temperatura de 22°C para o cálculo da DI (Eq. 3) dos três casos de temperatura e o *Threshold* foi calculado segundo a Eq. 6. Já na Fig. 4(b) é

possível verificar a situação inversa, ou seja, o cálculo da DI (Eq. 3) utilizando o *baseline* referente à temperatura de 28 °C.

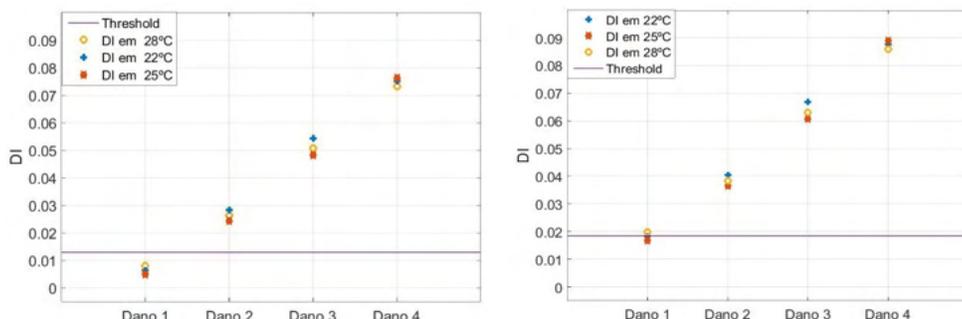


Figura 4: a) DI utilizando baseline de 22°C; b)DI utilizando a baseline referente à temperatura de 28°C

As Figs. 4 (a) e (b) mostram os resultados do acerto quando não é possível determinar exatamente a temperatura para o cálculo do DI. É importante ressaltar que não é o objetivo desse trabalho fazer a correção do efeito da temperatura, mas sim o de simplesmente mostrar que a variação de temperatura pode gerar uma decisão equivocada quanto à saúde da estrutura.

7 | CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou um método estatístico que foi desenhado para determinar um nível limite para os dados das LW e realizar uma análise de sensibilidade desta técnica. Este método leva em conta os conceitos de controle estatístico de processos e de intervalo de confiança, a partir da teoria estatística. O valor do *threshold* de decisão obtido com o método proposto foi usado para realizar uma análise de sensibilidade através da taxa de acerto (valores acima do *threshold* nas Figs. 4 (a) e (b) e como o sistema de detecção pode determinar com sucesso os danos introduzidos. Os testes foram verificados usando dados experimentais obtidos de painéis de alumínio usados em aeronaves em condição de variação de temperatura.

Além disso, um método para realizar a limpeza de dados com o critério do Chauvenet foi também apresentado, visando eliminar falsos positivos e melhorar os resultados globais da POD. A análise estatística incluiu testes de normalidade, assim como a verificação das amostras de todos os DI segundo a distribuição de Gauss.

Os resultados mostraram que o método de LW pode proporcionar uma medida do nível de danos, uma vez que se verificou um aumento da tendência proporcional nas métricas de dano com o aumento no nível de dano (Fig. 02). Nota-se também que a variação de temperatura influencia o DI tanto em amplitude como em fase, sugerindo a necessidade

de um algoritmo de compensação de temperatura.

Os danos foram introduzidos em uma região localizada entre os dois transdutores piezoelétricos de interesse, o que configura uma situação ‘ideal’ visto que o interesse maior deste trabalho é mostrar a influência da temperatura ao se determinar o *threshold* para uma pequena faixa de temperatura e se chegar a uma segurança de 5% quanto a falsos negativos.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor é grato à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado. Os autores também são gratos ao CNPq e FAPEMIG, agências de pesquisa brasileiras, através do INCT-EIE, que garantiram o financiamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S.C., Das, P., 1997, **Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor: Application to ultrasonic flaw detection**, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 44, pp14-26.

Bendat, JS, Piersol, AG 2000 **Random Data – Analysis and Measurement Procedures**. *John Wiley, New York*, 4th edition. ISBN: 978-0470248775.

Charles, P.E. 2013 **Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models**. R package mh1823, version 3.1.4, available in: Accessed in: August 5th 2013.

Debnath, L., 2001 **Wavelet Transforms & Their Applications**, Boston, MA, USA, *Birkhäuser Press*.

Farrar, C.R.; Lieven, N.A.J.; Bement, M.T., 2005 An **Introduction to Damage Prognosis. Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, *Wiley*, Cap.1, p. 1-12. 2005.

Ginzel E, 2006 **Introduction to the Statistics of NDT**. *NDT.net – The e-journal of Nondestructive Testing*. ISSN: 1455-4934. May 2006, Vol. 11, No. 5.

Harley, J., Moura, J., 2012 **Scale transform signal processing for optimal ultrasonic temperature compensation**, *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, *IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 10, pp. 2226–2236.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergamn, T. L., 2006 **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. *Wiley* edition 6, p. 272-275.

Inman, Dj, Farrar, Cr, Lopes Jr, V, Steffen Jr, V 2005 **Damage Prognosis For Aerospace, Civil and Mechanical Systems**. *John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK*.

Kijanka, P., Radecki, R., Packo, P., W. Staszewski, J., Uhl, T., 2013 **GPU-based local interaction simulation approach for simplified temperature effect modelling in Lamb wave propagation used for damage detection**, *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 3, p. 035014.

- Lemistre, M., Gouyon, R., Kaczmarek, H.; Balageas, D., 1999 **Damage Localization in Composite Plates Using Wavelet Transform Processing on Lamb Wave Signals**, *Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, 1999, Stanford, USA.
- Lind, R., Kyle, S., Brenner, M., 2001, **Wavelet analysis to characterize non-linearities and predict limit cycles of an aeroelastic system**, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15, 337-356.
- Lu Y., Ye, L., Wang D, Zhong Z., Herszberg I, 2009 **Damage Detection in a Large Composite Panel of Five Stiffeners Using Lamb Wave Signals**, *Materials forum volume 33*.
- MIL-HDBK-1823A: 2009 **Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment Department of Defense Handbook: nondestructive Evaluation System Reliability Assessment**.
- Monnier, T, 2006 **Lamb Waves-based Impact Damage Monitoring of a Stiffened Aircraft Panel using Piezoelectric Transducers**, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
- Park, C. Y, 2007 **Damage Index Comparison for a Composite Stiffened Panel Using Lamb Wave**, *Advanced Materials Research Vols. 26-28*.
- Raghavan, A., Cesnik, C. E. S., 2005 **Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring**. *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System*, Wiley, Cap.11, pp. 235-274.
- Ramadas, C., Balasubramaniam, K., Joshi, M, Krishnamurthy, C. V., 2011 **Interaction of Lamb mode (A0) with Structural Discontinuity and Generation of “Turning modes”** in a *T-joint*, *Elsevier*.
- Reddy, R. A., 2011 **Applied Data Analysis and Modeling for Energy Engineers and Scientists**. *Springer New York Dordrecht Heidelberg London*, ISBN: 978-1-4419-9612-1.
- Rocha, L. A. A., Rabelo, D. S., Steffen Jr., V., 2014 **Identification of Damage in Structures with Rivets using Impedance techniques and controls of Lamb waves** *CONEM 2014* no. 0503.
- Sohn, H., 2005 **Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates in Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems**, *John Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ, USA*.
- Sorohan, S., Constantin, N., Gavan, M., Anghel, V., 2011 **Extraction of Dispersion Curves for Waves Propagating in Free Complex Waveguides by Standard Finite Element Codes**, *Ultrasonics* 51.
- Su, Z., Ye, L., 2009 **Identification of Damage Using Lamb Waves From Fundamentals to Applications**, Springer, e-ISBN:978-1-84882-784-4.
- Su, Z., Ye, L., Lu, Y., 2006 **Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review**. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, p. 753-780.
- Taylor, Jr., 1997 **An Introduction to Error Analysis**. *University Science Books*, 2nd edition. ISBN: 78-0935702750.
- Tseng, K. K. H., Naidu, A. S. K., 2002 **Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material**. *Journal Smart Material and Structures*. V.11, p. 317-329.

VISIÓN POR COMPUTADORA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 07/10/2021

Samuel Sotelo Martínez

UTSJR, Mecatrónica
San Juan del Río – Querétaro

Raúl García García

UTSJR, Energías Renovables
San Juan del Río – Querétaro

Rafael Ocampo Martínez

UTSJR, Mecatrónica
San Juan del Río – Querétaro

Marco Antonio Olivo Flores

UTSJR, Mecatrónica
San Juan del Río – Querétaro

Pablo Saúl Espinoza Aguirre

UTSJR, Mecatrónica
San Juan del Río – Querétaro

RESUMEN: Existe poca información de sistemas de visión por computadora para la inspección de calidad aplicado a la industria de manufactura de tarjetas electrónicas, para la identificación, conteo y localización de circuitos integrados. La inspección visual automatizada en los procesos de producción de estas tarjetas permite discriminar un producto de acuerdo con diferentes criterios y estándares, incrementando la velocidad de inspección, reduciendo costos, y generando un análisis estadístico de información. Utilizando una cámara de video como sensor, una computadora

y un software específico, se captura la imagen de la tarjeta, se aplican técnicas de tratamiento de imágenes, se extrae la información de interés y se interpreta para obtener el resultado deseado.

PALABRAS CLAVE: Procesamiento de imagen, inspección visual, circuito integrado, tarjeta electrónica, calidad.

ABSTRACT: There is little information on computer vision systems for quality inspection applied to the electronic card manufacturing industry, for the identification, counting and location of integrated circuits. The automated visual inspection in the production processes of these cards allows to discriminate a product according to different criteria and standards, increasing the inspection speed, reducing costs, and generating a statistical analysis of information. Using a video camera as a sensor, a computer and specific software, the image of the card is captured, image treatment techniques are applied, the information of interest is extracted and it is interpreted to obtain the desired result.

KEYWORDS: Image processing, visual inspection, integrated circuit, electronic card, quality.

1 | INTRODUCCIÓN

El control de calidad es uno de los aspectos más importantes para la competitividad industrial, el alto costo de la inspección humana ha propiciado el desarrollo de sistemas de visión automática, actualmente se disponen de sistemas de visión de calidad a costos

accesibles, en las últimas décadas estos sistemas son comunes en la industria por su amplio campo de aplicaciones y su flexibilidad para adaptarse a los diferentes procesos, se utilizan para resolver una gran cantidad de problemas mediante la extracción de la información contenida en imágenes, Pajares y De La Cruz (2002).

Se ha generado una gran cantidad de recursos para la visión artificial, como: cámaras de video, procesadores de uso exclusivo, software y librerías que facilitan el procesamiento de imágenes para aplicaciones de inspección de manufactura hasta para la navegación de robot móviles, (Cuevas, Zaldívar y Pérez 2015). La visión artificial es una de las áreas de investigación y desarrollo de mayor inversión en los últimos años que ha generado aplicaciones que van desde inspección en manufactura, hasta la navegación de robot móviles, prácticamente en cualquier área. El presente trabajo describe la metodología, desarrollo y resultados obtenidos de una aplicación de visión por computadora para la inspección de circuitos integrados en tarjetas electrónicas. La localización y conteo de estos circuitos integrados es una verificación previa que facilita la validación del funcionamiento de una tarjeta electrónica.

2 | DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Un sistema de visión de bajo costo como el diseñado por Guerrero y Ramos (2014) presenta buenos resultados y altas velocidades de procesamiento por el uso de procesadores exclusivos y algoritmos para el procesamiento de imágenes, de forma similar Jácome (2018) presenta una propuesta interesante de sistema de visión para el control de calidad basado en un sistema ciber – físico relacionado con una aplicación del internet de las cosas y la industria 4.0, aunque ambas aplicaciones arrojan resultados muy específicos en ambientes controlados a manera de prototipos, el diseño realizado por Gabriel Zambrano (2007) presenta una estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador utilizando una cámara convencional con comunicación ethernet y un programa desarrollado en lenguaje de alto nivel con el algoritmo de procesamiento de imágenes.

Para el presente trabajo se utilizó una cámara USB full HD 1080p con corrección de enfoque e iluminación automáticos, una interface de usuario diseñada para uso práctico de la aplicación y un algoritmo programado en lenguaje propio de Matlab®. El algoritmo diseñado para el presente trabajo es el mostrado en la figura 1.

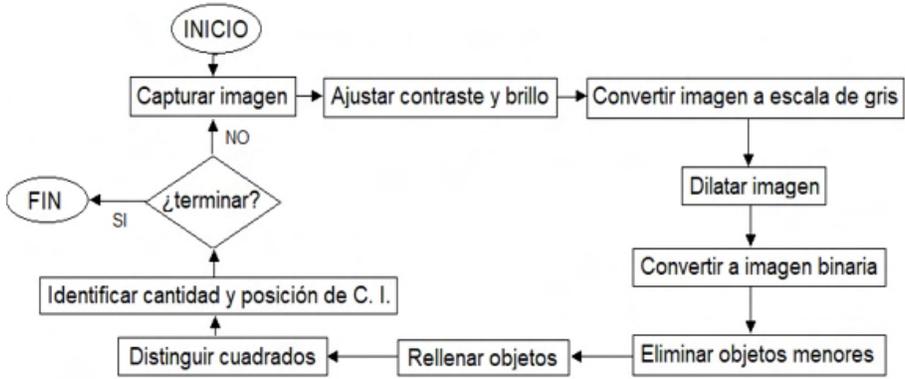


Figura 1. Algoritmo para procesamiento de imagen. Elaboración propia.

2.1 Capturar imagen

Para la captura de la imagen se utiliza un botón vinculado a una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) la cual utiliza una función en la que se identifica el tipo, número y resolución de la cámara a utilizar, al presionar el botón se inicializa la cámara, se captura la imagen, se coloca en una ventana y se muestra. La imagen capturada es guardada en una variable que representa la imagen en forma de matriz, una imagen en escala de gris tiene una sola matriz donde cada celda representa un pixel de la imagen cuyo valor oscila dependiendo el tono entre 0 y 255, donde 0 es negro y 255 es blanco, a su vez las imágenes a color tipo RGB están formadas por tres matrices (Rojo, Verde y Azul), las combinaciones de estas definen los colores de cada pixel indexado de la imagen original.

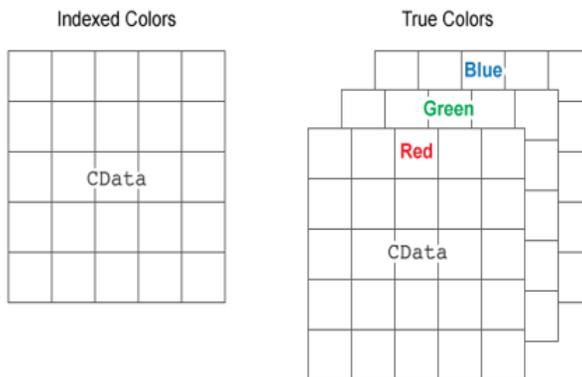


Figura 2 Representación de imagen RGB en forma de matriz.

Fuente mathworks.com

2.2 Ajustar contraste y brillo

El brillo de una imagen se incrementa sumando a la imagen el número de niveles al que se dese elevar la iluminación, por ejemplo, si se desea elevar la iluminación en 10 niveles, a la matriz se le suma 10, quedando el resultado en B. El contraste se aumenta mediante la multiplicación de la matriz por una constante positiva, por ejemplo, si se desea aumentar el contraste 50% la imagen se multiplica por 1.5, quedando el resultado en C.

$$B = A + 10 \quad C = B * 1.5$$

No es necesario considerar que pasaría si la multiplicación desborda el tipo de dato permisible, ya que algunos programas truncan automáticamente a 255 los valores de los pixeles que se sobre pasen.

2.3 Convertir imagen a escala de gris

El procedimiento para pasar una imagen RGB a una imagen en escala de gris requiere conocer los valores de color fundamental RGB que definen el color del pixel, la diagonal principal del tetraedro de color contiene los valores de gris desde el negro hasta el blanco como lo ilustra la figura 3.

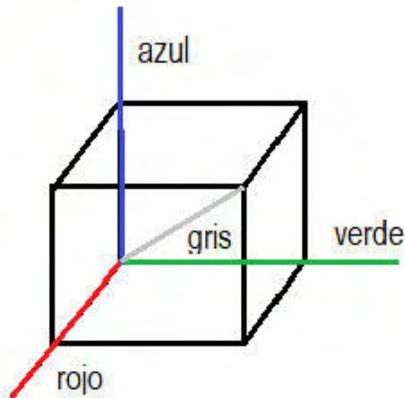


Figura 3. Tetraedro de color RGB y línea de escala de gris. Elaboración propia.

La transformación de imagen RGB a escala de gris utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Escala de gris} = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}$$

El valor obtenido para “Escala de gris” se asigna a cada uno de los pixeles correspondientes de una matriz unitaria que representa la imagen sin color.



Figura 4. Imagen de captura, ajustada en contraste, brillo y en escala de gris. Elaboración propia.

2.4 Dilatar imagen

La dilatación es una operación morfológica correspondiente al crecimiento, o agregado de una capa de píxeles a la estructura de la imagen:

$$I + H = (x', y') = (x + i, y + j)$$

Donde I es la imagen original y H es la estructura de referencia que se aplica en la dilatación, en esta aplicación la dilatación se utiliza para definir el contorno del circuito integrado.

2.5 Convertir a imagen binaria

Una imagen binaria se representa como una matriz que sólo contiene unos y ceros. Estos ceros y unos son especiales, porque no implican valores numéricos, sino más bien banderas que indican el estado de falso (0) o verdadero (1). Para la conversión de una imagen de escala de gris a binaria se requiere establecer el umbral que limite el cambio de estado de 0 a 1, dicho umbral está definido por uno de los valores de los 256 posibles que adopta cada pixel de la imagen gris dilatada.

2.6 Invertir imagen

Para la inversión de una imagen binaria se aplica una función lógica de inversión, de tal manera que cada pixel invierte su valor de 0 a 1 y viceversa. Se usa la siguiente expresión:

$$P' = \text{Not}(P)$$



Figura 5. Imagen dilatada, binaria e invertida. Elaboración propia.

2.7 Eliminar objetos menores

Se quitan todos los componentes que tienen menos de X píxeles de una imagen binaria. Los componentes a eliminar están limitados por un tipo de conectividad C-8, es decir los 8 píxeles vecinos determinan la conectividad del elemento y por lo tanto su área en píxeles. Esta operación se conoce como área de apertura. El valor de X píxeles determina el tamaño de objetos a filtrar en la imagen.

2.8 Rellenar objetos

Se rellena de píxeles de color uniforme una región plana completamente cerrada y definida por un elemento polígono dentro de la imagen. Para esta operación se utiliza la función “fill” en la programación propia de Matlab®.

2.9 Distinguir cuatros rectángulos

Para distinguir que el elemento de interés sea un cuadrado rectángulo se utiliza la relación área sobre perímetro, según las formulas:

$$Area = b * a \quad Perimetro = I1 + I2 + I3 + I4$$

Cuando el cociente entre área y perímetro este comprendido entre 0.25 y 0.375, lo que significa la relación que tiene un cuadrado equilátero o un rectángulo de lado 3:1, se identifica que es un circuito integrado por su forma. Los valores tanto el área como el perímetro se obtienen en píxeles y dependen de la resolución de la cámara y su posición.



Figura 6. Imagen filtrada, rellena y con C. I. identificado. Elaboración propia.

2.10 Identificar cantidad y posición de C.I.

El conteo de circuitos integrados sobre la tarjeta se realiza con una función predeterminada en una librería de programación para Matlab® la cual proporciona el número de elementos independientes y las coordenadas de sus centroides, las funciones son “bwlabel” y “regionprops”.

3 | RESULTADOS

El logaritmo para el procesamiento de imágenes utilizado en este trabajo permite identificar elementos dentro de la imagen que cumplen con la característica de forma, color y tamaño de un circuito integrado de montaje superficial sobre una tarjeta electrónica fue desarrollado en un software matemático con entorno de desarrollo integrado (IDE) que tiene un lenguaje de programación propio (Lenguaje M).

```
I = imread('C:\Users\ssotelom\Pictures\Saved Pictures\tarjeta');
I1 = I*2.3;
I2 = I1-13;
I3 = rgb2gray(I2);
SE = strel('square', 2);
I4 = imdilate(I3, SE);
I5 = im2bw(I4, 0.60);
I6 = (~I5);
I7 = bwareaopen(I6, 220);
I8 = imfill(I7, 'holes');
[L Ne]=bwlabel(I9);
propied= regionprops(L);
s = regionprops(I9, 'centroid');
centroids = cat(1, s.Centroid);
hold on
plot(centroids(:,1), centroids(:,2), 'b*')
for n=1:size(propied,1)
    rectangle('Position',propied(n).BoundingBox,'EdgeColor','g','LineWidth',2)
end
pause(3)
stats = regionprops('table', I9, 'Centroid', 'MajorAxisLength', 'MinorAxisLength')
chip = n
```

Figura 7. Algoritmo en lenguaje M de Matlab®. Elaboración propia.

Las pruebas se realizaron sobre diferentes tipos de tarjetas electrónicas con distintos tipos, disposiciones y cantidades de C. I. La colocación, iluminación y el enfoque de la cámara sobre la tarjeta son aspectos importantes a considerar antes de ejecutar el algoritmo en la aplicación. El algoritmo se ejecuta tantas veces como tarjetas se requieran verificar.

3.1 Interfaz Gráfica de Usuario

La interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada contiene una ventana para visualizar las imágenes en diferentes etapas, tiene un indicador numérico para mostrar la cantidad

de circuitos integrados encontrados, además cuenta con botones para capturar la imagen, realizar el procesamiento de la imagen y guardar los resultados

obtenidos, adicionalmente dispone de controles deslizantes para ajustar contraste, brillo, dilatación, umbral y filtrado.

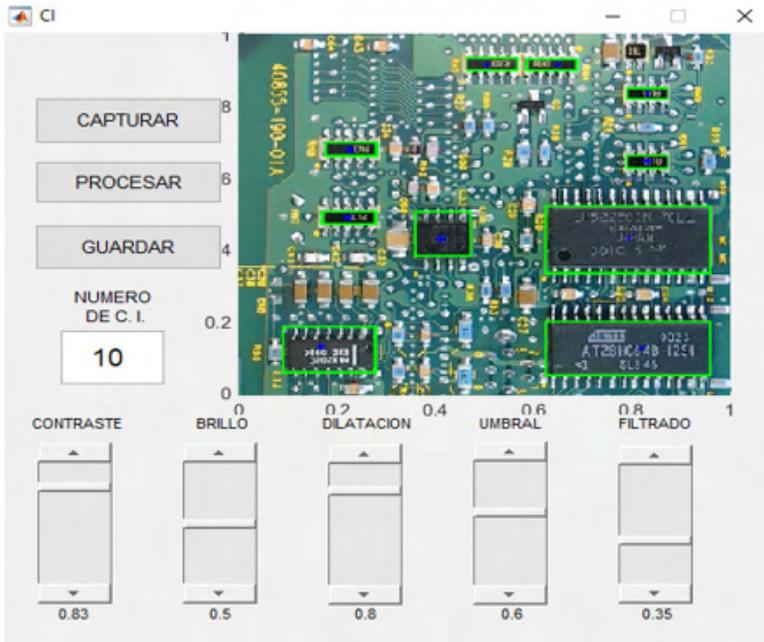


Figura 8. Interfaz gráfica de usuario (GUI). Elaboración propia.

De acuerdo a la configuración previa, se identifican los circuitos integrados sobre la tarjeta electrónica por su color característico, su forma cuadrada y su tamaño en píxeles creando una caja de contorno de identificación sobre ellos, en la configuración de parámetros se establece la cantidad de píxeles de área mínimos para ser identificados los C. I.

Por último, se obtiene la cuenta del número de circuitos integrados (C. I.) identificados, la cual se muestra en un apartado sobre la misma interfaz gráfica de usuario y se genera una tabla con información relevante como lo es la ubicación en coordenadas del centro del circuito integrado en la imagen de la tarjeta, el eje mayor y menor de cada C. I. como lo muestra la figura 9.

	1 Centroid		2 MajorAxisLength	3 MinorAxisLength
1	94.5796	419.9364	119.5132	52.2850
2	124.4664	249.2685	61.8206	19.0477
3	126.4850	159.5235	60.2297	18.4795
4	223.1793	277.2700	64.2096	54.6890
5	270.6118	46.9187	62.5343	18.2795
6	345.3016	46.5944	59.6195	18.8701
7	420.2749	276.2325	197.0133	85.7633
8	433.5293	421.8796	211.7086	68.9767
9	439.6232	85.4713	50.3954	18.4189
10	439.5000	175	50.5514	19.5421

Figura 9. Resultados de centros geométricos y ejes de los C. I. identificados. Elaboración propia.

3.2 Conclusiones

En este trabajo, el procesamiento previo a la identificación es indispensable para obtener buenos resultados, los parámetros de procesamiento se deben ajustar con anticipación para lograr la identificación adecuada dependiendo las características de la tarjeta electrónica, la calidad de la imagen, iluminación, el tamaño de los C. I.

Los resultados dependen mucho del color, el algoritmo está diseñado para identificar el color característico del circuito integrado que contrasta con el color del resto de la tarjeta, si estos cambiaran se tienen que ajustar los parámetros de procesamiento.

La posición y enfoque de la cámara de captura es indispensable, una mala posición dará una captura de imagen con circuitos integrados incompletos, deformes o con sombras y un mal enfoque generaría imágenes de mala calidad, borrosas o con ruido, ambos factores complicarían la identificación de los circuitos integrados. La presencia del factor vibración que se puede dar en algunos procesos de producción hace necesario ejecutar ésta aplicación sobre una posición estática.

La identificación y conteo de circuitos integrados sobre tarjetas electrónicas resuelve el trabajo de inspección visual que se realiza en el proceso de fabricación de tarjetas electrónicas, cabe mencionar que el presente trabajo no tiene efecto sobre la verificación funcional de los circuitos integrados ni las tarjetas electrónicas.

3.3 Recomendaciones

Para trabajos futuros o de continuidad al presente trabajo se recomienda considerar el factor de iluminación ya que es un elemento que genera muchos problemas en los sistemas de visión en general, se recomienda utilizar una cámara que aisle fuentes de luz externa, colocar al interior y sobre la posición de la tarjeta una fuente de luz blanca que

logre una iluminación adecuada, homogénea y enfocada al centro de la tarjeta para evitar sombras y obtener mejores resultados.

Como complemento, la inspección de soldadura en las terminales del circuito integrado y la verificación de la orientación adecuada sobre la tarjeta electrónica son aspectos que ampliarían el alcance del proceso de inspección visual del producto, estas funciones se pueden agregar al sistema de visión por computadora.

REFERENCIAS

CUEVAS E, ZALDIVAR D, PEREZ M. Procesamiento digital de imágenes usando Matlab & simulink. **Alfaomega grupo editor**, México. Febrero 2015. ISBN:978-84-7897-973-8. p. 25,31.

GUERRERO A, RAMOS P. Sistema embebido de bajo costo para visión artificial. **Universidad Tecnológica de Pereira** (en línea), Vol. 19. No. 2, 2014, consultada por internet el 19 de mayo del 2019. Dirección de internet: <http://revistas.utp.edu.co>

JÁCOME RAMÍREZ F. Desarrollo e integración de un sistema ciber-físico aplicado al control de calidad utilizando visión artificial. **Trabajo final de maestría**, Universidad Politécnica de Cataluña. España, 2018.

PAJARES G. Y DE LA CRUZ J. Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones, **Editorial RA-MA**, 2002.

ZAMBRANO G. Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador (CIM), **Revista Ingeniería y universidad** (en línea), Vol. 11, No. 1, 2007, consultada por internet el 24 de mayo del 2019. Dirección de internet: <http://www.redalyc.org>

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO EM CAVIDADES DIRIGIDAS COM USO DO DESIGN CONSTRUTAL

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 15/12/2021

Priscila Martta Rodrigues

Universidade do Vale do Rio dos Sino, Centro
de Ciências Exatas e Tecnológicas
São Leopoldo - RS
<http://lattes.cnpq.br/1478423514431780>

Cícero Coelho de Escobar

Universidade Federal de Pelotas, Centro de
Engenharias
Pelotas - RS
<http://lattes.cnpq.br/2824357187395679>

Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Universidade do Vale do Rio dos Sino, Centro
de Ciências Exatas e Tecnológicas
São Leopoldo - RS
<http://lattes.cnpq.br/8732272690265023>

RESUMO: O estudo da transferência de calor e de escoamento de fluidos é uma das principais áreas de aplicação da Engenharia. O avanço desse conhecimento permite contribuir para o desenvolvimento de equipamentos cada vez mais sofisticados e eficientes como, por exemplo, trocadores de calor que podem ser empregados em usinas elétricas, usinas de processamento químico, refrigeradores domésticos, aquecimento e condicionamento de ar em prédios, radiadores de automóveis, entre outros. Em várias dessas aplicações, trabalhos experimentais visando a otimização de dispositivos podem ser custosos e demorados. Nesse contexto, os estudos de

escoamentos em cavidades simulados com auxílio da Fluidodinâmica Computacional têm ganhado atenção entre os pesquisadores. Dentre as metodologias empregadas, o método denominado Busca Exaustiva associado ao Design Construtal tem sido aplicado na busca de melhores geometrias para sistemas de escoamentos para diversas finalidades como busca pelo desempenho global máximo minimizando a resistência térmica global. Apesar disso, poucos trabalhos relacionados ao Design Construtal têm sido empregados no estudo de aletas inseridas em cavidades dirigidas. Nesse sentido, este capítulo tem objetivo de revisar alguns dos principais trabalhos relatados na literatura referente ao uso do Design Construtal e a Busca Exaustiva para a otimização geométrica de aletas inseridas em cavidades dirigidas com escoamentos convectivos. Após revisão da literatura, foi constatado um crescente aumento no estudo de cavidades dirigidas em escoamentos com transferência de calor com convecção. Mais precisamente, o uso do Design Construtal tem sido empregado para análise de geometrias cada vez mais diversas. Apesar disso, ainda há várias lacunas que merecem ser investigadas nessa área, como a avaliação de diferentes números de Reynolds, a investigação de um número maior de aletas com diferentes geometrias e a análise numérica de escoamentos com escoamento turbulento.

PALAVRAS-CHAVE: Design construtal, cavidades dirigidas, transferência de calor, fluidodinâmica computacional.

GEOMETRICAL EVALUATION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN LID-DRIVEN USING CONSTRUCTAL DESIGN

ABSTRACT: The study of heat transfer and fluid flow is one of the main areas of application in Engineering. The advancement of this knowledge makes it possible to contribute to the development of increasingly sophisticated and efficient equipment, such as heat exchangers that can be used in power plants, chemical processing plants, domestic refrigerators, heating and air conditioning in buildings, radiators of automobiles, among others. In many of these applications, experimental work aimed at optimizing devices can be costly and time-consuming. In this context, studies of flows in simulated cavities with the aid of Computational Fluid Dynamics have gained attention among researchers. Among the methodologies used, Exhaustive Search associated with Constructal Design has been applied in the search for better geometries for flow systems for various purposes such as the search for maximum global performance while minimizing global thermal resistance. Despite this, few works related to Constructive Design have been used in the study of fins inserted in lid-driven cavities. In this sense, this chapter aims to review some of the main works reported in the literature regarding the use of Constructal Design and Exhaustive Search for the geometric optimization of lid-driven cavities subjected to convective flows. After reviewing the literature, a growing increase in the study of directed cavities in flows with convective heat transfer was observed. More precisely, the use of Constructal Design has been used to analyze increasingly diverse geometries. Despite this, there are still several gaps that deserve to be investigated in this area, such as the evaluation of different Reynolds numbers, the investigation of a larger number of fins with different geometries and the numerical analysis of flows with turbulent flow.

KEYWORDS: Constructal design, lid-driven cavities, heat transfer, computational fluid dynamics.

1 | INTRODUÇÃO

Através do estudo da transferência de calor e de escoamento de fluidos é possível contribuir para o desenvolvimento de equipamentos cada vez mais sofisticados e eficientes como, por exemplo, os trocadores de calor que podem ser empregados em usinas elétricas, usinas de processamento químico, refrigeradores domésticos, aquecimento e condicionamento de ar em prédios, radiadores de automóveis, entre outros (Çengel e Ghajar, 2012). Desta forma, um dos campos mais estudados em engenharia é a transferência de calor por convecção, ou simplesmente convecção, que é o estudo de processos de transporte de calor efetuados pelo escoamento de fluidos. De acordo com Incropera et al. (2014), existem muitas aplicações relacionadas à convecção, entre elas, trocadores de calor, sistemas de aquecimento solar, resfriamento de componentes eletrônicos, entre outros.

A transferência de calor por convecção ocorre quando existe contato entre um fluido em movimento e uma superfície com diferentes temperaturas. A convecção pode ser classificada, de acordo com a natureza do escoamento do fluido, em forçada (quando

o escoamento é causado por meios externos), natural (quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferenças de massas específicas causadas por variações de temperatura do fluido) e mista que é a combinação da convecção natural e forçada (Incropera et al., 2014).

A crescente necessidade de miniaturização de estruturas em remoção de calor, especialmente em materiais eletrônicos, torna a busca por soluções de refrigeração um tópico importante para ser investigado. Nesse contexto, o fenômeno de transferência de calor por convecção em cavidades dirigidas com aletas inseridas pode representar idealmente o resfriamento de vários cenários de interesse na engenharia, tais como projeto de salas, carros, painéis solares e espaço entre as aletas em trocadores de calor. Sendo assim, várias estratégias têm sido empregadas para melhorar o desempenho térmico nesses sistemas (Durga et al., 2017; Fontana et al., 2015). Dentre essas estratégias pode-se mencionar os estudos de escoamentos em cavidades.

Entre os estudos relacionados à convecção de calor, escoamento de fluido em cavidades representam vários problemas de engenharia e o escoamento em cavidade dirigida vem sendo um problema bastante discutido e estudado na área de dinâmica dos fluidos computacionais. As cavidades representam vários problemas ideais de engenharia e têm grande importância, pois podem ser encontradas em espaços entre aletas de trocadores de calor, sistemas de energia solar, espaços entre componentes eletrônicos em circuitos integrados, motores elétricos, entre outros. Com isso, estudos vêm sendo realizados para melhorar o entendimento sobre o comportamento dos escoamentos.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos a fim de se obter uma melhor compreensão do comportamento fluidodinâmico de sistemas isotérmicos dentro das cavidades, sob diferentes regimes de escoamento (Ertruck e Gokçol, 2006; Loseff e Street, 1984; T. P. Chiang W. H. Sheu Robert R. Hwang, 1998; P. N. Shankar and M. D. Deshpande, 2000). Do ponto de vista computacional, sua relativa simplicidade é contrabalançada por fenômenos físicos complexos, como a formação do vórtice principal e possíveis vórtices secundários.

O Design Construtal baseia-se em um princípio físico, denominado por Adrian Bejan como Lei Construtal, utilizado para explicar a geração e a evolução do design (configuração, forma, estrutura) de sistemas inanimados e animados (Bejan e Lorente, 2008). A Teoria Construtal é a visualização de que a geração das configurações em sistemas de fluxo é um fenômeno físico que pode ser baseado em um princípio físico (Lei Construtal). A Lei Construtal, por sua vez, determina que para um sistema de fluxo de dimensões finitas persistir no tempo (sobreviver), sua configuração deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem através do sistema (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012). Dessa forma, o Design Construtal é um método de avaliação geométrica que, através da aplicação de restrições e objetivos em geometrias pertencentes aos sistemas de escoamento de dimensões finitas, vem sendo utilizado para explicar de uma maneira determinista que os designs existentes na natureza não são resultado do acaso (Bejan,

2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012). Diversos exemplos de aplicação do Design Construtal podem ser encontrados na literatura como o projeto do movimento humano e dos animais (Bejan e Lorente, 2011), desenho urbano, trânsito, transporte, economia, evolução da tecnologia (Bejan e Lorente, 2008) e vários problemas na área de engenharia como projetos de eletrônica, células de combustível, turbinas, energia das ondas, mecânica de materiais, refrigeração e problemas de transferência de calor (Biserni et al., 2004; Lorenzini et al., 2014; Estrada et al., 2015; Xie et al., 2015; Dos Santos et al., 2014; Vieira et al., 2017).

Para efeitos de ilustração, considere o exemplo de um processo de otimização geométrica através do método denominado Busca Exaustiva associado ao Design Construtal, conforme descrito por Rodrigues (2018). Neste trabalho, foi investigada uma cavidade dirigida bidimensional com duas aletas inseridas na parte inferior submetidas a um escoamento em regime laminar e com convecção mista. O problema levou em consideração a estratificação estável, ou seja, é a prescrição da temperatura mais alta na superfície superior. A avaliação geométrica realizada consiste em um princípio de restrições e objetivos. Para este problema foram definidas três restrições que são a área da cavidade (A_T) e a área das duas aletas (A_1 e A_2). As aletas são inseridas com o propósito de trocar calor com o escoamento dentro da cavidade. O problema consistiu em analisar a troca térmica das duas aletas inseridas na cavidade quadrada de dimensões. O fluido estava inicialmente em repouso, e o escoamento é originado pelo deslocamento da superfície superior. A Figura 1 ilustra o Domínio Computacional do problema estudado.

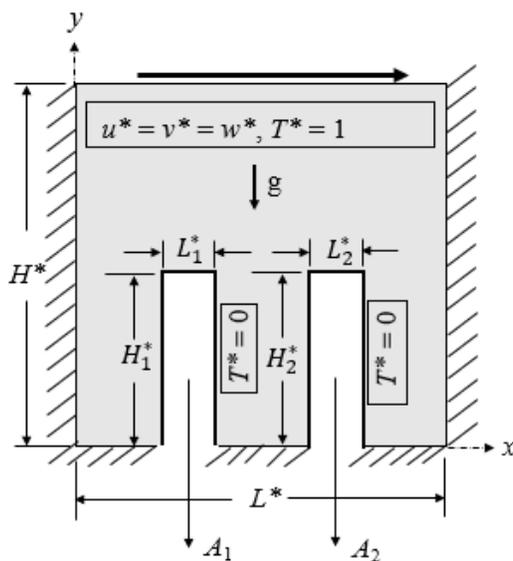


Figura 1: Domínio Computacional do problema estudado por Rodrigues (2018).

O número de Reynolds foi mantido constante e definido com base na velocidade de deslocamento e na altura da cavidade. Foi avaliado $Re_H = 400$, $Pr = 6.0$ e diferentes números de Richardson para diferentes ϕ_1 (razão entre A_1 sobre a A_T) e ϕ_2 (razão entre A_2 sobre a A_T).

A Figura 2 ilustra o processo de otimização geométrica através do método denominado Busca Exaustiva associado ao Design Construtal, no qual o diagrama de árvore representa o conjunto de simulações que serão abordadas no projeto. A fração total das áreas ($\phi_T = \phi_1 + \phi_2$) foi mantida fixa e constante igual a 0.1, e os valores de ϕ_1 e ϕ_2 variaram buscando maximizar a taxa de transferência de calor no sistema. Além disso, H_1/L_1 e H_2/L_2 também foram analisados (variando de 0.3 à 1.0).

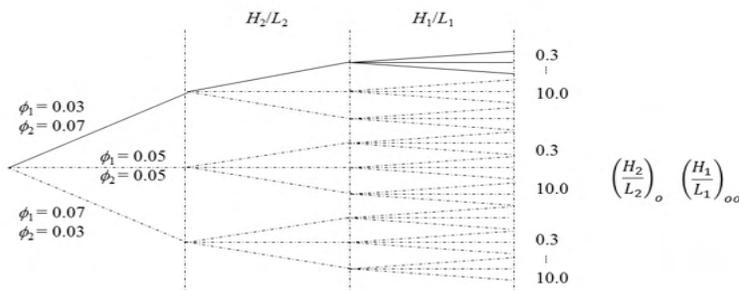


Figura 2: Esquema ilustrando o processo de otimização realizado aplicando o método Design Construtal com mecanismo de Busca Exaustiva no trabalho de Rodrigues (2018).

O processo de otimização foi realizado em duas etapas no presente estudo. No primeiro nível de otimização, o grau de liberdade H_1/L_1 foi variado enquanto manteve-se uma razão H_2/L_2 fixa. Os valores de ϕ_1 e ϕ_2 também foram mantidos constantes. A maior magnitude do número de Nusselt encontrada é o Nu_H uma vez maximizado ($Nu_{H,m}$). A geometria ótima correspondente é a razão (H_1/L_1) uma vez otimizada, $(H_1/L_1)_o$. No segundo nível de otimização, o primeiro nível é repetido para diferentes razões de H_2/L_2 . A partir desse novo conjunto de simulações, a maior magnitude de Nu_H obtida é o número de Nusselt duas vezes maximizado, $Nu_{H,mm}$ e as geometrias ótimas correspondentes são $(H_1/L_1)_{oo}$ e $(H_2/L_2)_o$.

Como pode ser observado pelos trabalhos anteriormente citados, o Design Construtal tem sido aplicado na busca de melhores geometrias para sistemas de escoamentos para diversas finalidades como busca pelo desempenho global máximo minimizando a resistência térmica global. Apesar disso, poucos trabalhos relacionados ao Design Construtal têm sido empregados no estudo de cavidades dirigidas. Nesse sentido, este capítulo tem objetivo de revisar alguns dos principais trabalhos relatados na literatura referente ao uso do Design Construtal e a Busca Exaustiva para a otimização geométrica de aletas inseridas em cavidades dirigidas com escoamentos convectivos.

2 | DISCUSSÃO

Recentemente, alguns trabalhos utilizaram o Design Construtal e a Busca Exaustiva para a otimização geométrica de aletas inseridas em cavidades dirigidas com escoamentos convectivos. A Tabela 1 apresenta as informações de alguns desses trabalhos.

Forma da Aleta	Características do Escoamento	Parâmetros adimensionais estudados	Indicador de Performance	Referência
Aleta retangular	Incompressível, bidimensional, laminar e regime permanente	$Pr = 0.71; Re_H = 10, 100 \text{ e } 1000$	$\overline{Nu_H}$	dos Santos et al., 2013
Aleta retangular	Incompressível, bidimensional, laminar e regime permanente	$Pr = 0.71; Re_H = 10, 50, 100, 200, 500 \text{ e } 1000$	$\overline{Nu_H}$	Aldrighi et al., 2016
Aleta retangular	Incompressível, bidimensional, laminar e regime permanente	$Pr = 0.71; Re_H = 10, 100, 300, 500, 700 \text{ e } 1000; Ra_H = 1000, 10000, 100000 \text{ e } 1000000$	$\overline{Nu_H}$	Lorenzi et al., 2016
Aleta triangular	Incompressível, bidimensional, laminar e regime permanente	$Pr = 0.71; Re_H = 10, 100, 1000; Ra_H = 1000, 10000, 100000 \text{ e } 1000000$	$\overline{Nu_H}$	Razera et al.; 2016
Semi-elíptica	Incompressível, bidimensional, laminar e regime permanente	$Pr = 0.71; Re_H = 10, 100 \text{ e } 1000; Ra_H = 1000, 10000, 100000 \text{ e } 1000000$	$\overline{Nu_H}$	Razera et al., 2018
Aleta retangular	Incompressível, bidimensional, laminar e regime permanente	$Pr = 0.71; Re_H = 10, 100 \text{ e } 1000$	$\overline{Nu_H}$	dos Santos et al., 2019
Aleta ratangular	Incompressível, bidimensional, laminar e regime permanente	$Pr = 6.0; Re_H = 400; Ri = 0.1 \text{ e } 1.0$	$\overline{Nu_H}$ e \tilde{q}	Rodrigues et al., 2020

Tabela 1: Parâmetros adimensionais e indicadores de performance dos principais trabalhos da literatura.

Fonte: Os autores

Um dos trabalhos pioneiros foi o realizado por dos Santos et al. (2013), no qual foi empregado o método Design Construtal para avaliar o efeito de uma única aleta retangular inserida na superfície inferior de uma cavidade dirigida quadrada com transferência de calor por convecção forçada, considerando vários números de Reynolds ($10.0 \leq Re_H \leq 10^3$) e uma magnitude do número de Prandtl ($Pr = 0.71$). Os resultados mostraram uma forte influência da geometria da aleta sobre a transferência de calor entre uma aleta retangular e o escoamento circundante, medido pelo número de Nusselt espacial e temporal nas superfícies das aletas.

Lorenzini et al. (2016) analisaram um problema similar ao estudado por dos Santos et al. (2013), porém com a novidade de levar em consideração escoamento convectivos

mistos, e estudando os efeitos dos números de Reynolds e Rayleigh. O problema abordado apresentava duas restrições que eram a razão entre as áreas da aleta e cavidade mantida fixa e a razão da aleta (H_1/L_1) variando de $0.1 \leq H_1/L_1 \leq 10.0$. Os autores utilizaram o número de Prandtl fixo igual a 0.71. Foram investigadas a influência da geometria da aleta sobre o número de Nusselt. Os resultados mostraram que a geometria da aleta (H_1/L_1) teve forte influência sobre o número de Nusselt. Também foi observado que o efeito da razão H_1/L_1 sobre o número de Nusselt muda consideravelmente para diferentes números de Rayleigh e para as menores magnitudes de números de Reynolds. Por exemplo, foram observadas diferenças de quase 770% no número de Nusselt em escoamentos com o $Ra_H = 10^6$ e o escoamento convectivo forçado com o menor número de Reynolds estudado ($Re_H = 10$).

No trabalho conduzido por Aldrighi et al. (2016), a novidade foi a investigação de três posicionamentos diferentes da aleta inserida na superfície da cavidade, a saber: superfícies inferior, a montante e a jusante. O estudo numérico simulou um escoamento laminar com convecção forçada em uma cavidade dirigida com uma aleta retangular inserida em diferentes superfícies da cavidade. Os autores utilizaram o MVF (Método de Volumes Finitos) para a solução numérica das equações de conservação de massa, conservação da quantidade de movimento e conservação de energia. Foram investigados o efeito da geometria da aleta sobre o número de Nusselt (Nu_H) para os seguintes $Re_H = 10, 50, 100, 200, 500$ e 1000 , mantendo o número de Prandtl fixo ($Pr = 0.71$). Conclui-se que a geometria da aleta tem grande influência sobre o Nu_H para todos os Re_H avaliados. O maior Nu_H foi obtido para aletas na superfície a jusante para $50 \leq Re_H \leq 500$, enquanto para $Re_H = 1000$, a intrusão da aleta na superfície a montante levou ao maior desempenho térmico.

Razera et al. (2016) avaliaram uma geometria inédita na data de publicação, baseada em uma aleta triangular inserida em sua superfície inferior. Foi estudado os escoamentos convectivos mistos, tendo como foco analisar a influência do tamanho da aleta sobre o coeficiente de transferência de calor, ao mesmo tempo em que se buscou otimizar a geometria da aleta. O método do Design Construtal foi associado à Busca Exaustiva buscando otimizar o problema de escoamentos convectivos com diferentes números de Reynolds e Rayleigh. Foi mostrado que menores valores de razão de áreas (razão entre a área da aleta em relação a área total da cavidade) apresentaram maior desempenho térmico (representado pelo número de Nusselt) e conforme a proporção da área aumentou o desempenho diminuiu. Este comportamento não era esperado intuitivamente, uma vez que a área do trocador de calor diminui com a diminuição da área da fração da aleta. Dessa forma, os resultados mostraram que a liberdade de escoamento de fluido é um aspecto importante neste tipo de problema. Outro resultado interessante deste estudo foi a comparação com o desempenho de uma aleta retangular em condições de escoamento similares. Por exemplo, para $Ra_H = 10^5$, os resultados indicaram que a aleta retangular apresenta performance melhor para número de Reynolds maiores ($Re_H > 2.0 \times 10^2$), enquanto a aleta triangular apresentou melhores resultados para número de Reynolds

menores. De acordo com os autores, isso ilustra que diferentes condições de escoamentos requerem diferentes formas ótimas de maneira a minimizar as imperfeições (resistências) do sistema, conforme indicado pela Lei Construtal.

Razera et al. (2018) realizaram um estudo de otimização geométrica utilizando o Design Construtal para maximizar a taxa de transferência de calor. Foi investigado o comportamento de uma aleta de forma semi-elíptica variando suas dimensões em uma cavidade dirigida com placa infinita e convecção mista. Foi estudado um escoamento incompressível, bidimensional, laminar e no regime permanente. Os autores utilizaram o MVF para a solução numérica das equações de conservação de massa, conservação da quantidade de movimento e conservação de energia. Foram investigados diferentes $Re_H = 10, 10^2$ e 10^3 e números de Rayleigh ($Ra_H = 10^3, 10^4, 10^5$ e 10^6), mantendo $Pr = 0.71$. Os resultados apresentaram configurações ótimas com ganho de 40% na taxa de transferência de calor em relação a outras geometrias. Conclui-se também que as geometrias ótimas são influenciadas pelos Re_H e Ra_H .

Mais recentemente, dos Santos et al. (2019) investigaram o efeito geométrico da aleta retangular inserida em uma cavidade quadrada. O problema foi sujeito a duas restrições (área da cavidade e área da aleta retangular) e dois graus de liberdade (razão altura/comprimento da aleta retangular, H_1/L_1 , e sua posição na superfície a montante da cavidade, $S/A^{1/2}$). A razão (H_1/L_1) foi variada para três valores diferentes de $S/A^{1/2}$ ($S/A^{1/2} = 0.1, 0.5$ e 0.9) representando uma posição inferior, intermediária e superior da aleta. Os resultados mostraram que ambos os graus de liberdade (H_1/L_1 e $S/A^{1/2}$) tiveram forte influência para as maiores magnitudes do número de Reynolds. Além disso, o melhor desempenho térmico é alcançado quando a aleta é colocada perto da superfície superior da cavidade para uma relação intermediária entre a altura e o comprimento da aleta retangular, mais precisamente quando $(S/A^{1/2}) = 0.9$ e $(H_1/L_1) = 2.0$.

Em trabalho recente, Rodrigues et al. (2020) publicaram um estudo visando a otimização geométrica de uma cavidade dirigida com tampa deslizante sob escoamentos convectivos, incompressíveis e laminares em um domínio bidimensional. Até o momento dessa publicação, a avaliação geométrica da transferência de calor por convecção mista com estratificação estável de duas aletas variando concomitantemente não havia sido explorada na literatura. Os indicadores de desempenho foram os adimensionais média espacial do número de Nusselt ($\overline{Nu_H}$) e a taxa de transferência de calor (\dot{q}). Os resultados indicaram que configurações assimétricas para as aletas com diferentes frações de áreas para cada aleta levaram ao melhor desempenho térmico. Além disso, as formas ótimas e o efeito dos graus de liberdade sobre os indicadores de desempenho também foram afetados pelos números de Richardson investigados. Além disso, os resultados indicaram que a escolha do indicador de desempenho apresenta um papel importante na recomendação teórica sobre o projeto de aletas inseridas em uma cavidade dirigida com tampa sob escoamento convectivo misto. Foi demonstrado que as formas geométricas que maximizam o número

de Nusselt não levam necessariamente à maior taxa de transferência de calor, mostrando que esse parâmetro depende do equilíbrio entre o número de Nusselt e a área de troca de calor das aletas. Importante ressaltar que não haviam relatos na literatura de trabalhos investigando a taxa de transferência de calor em conjunto com o número de Nusselt em problemas com as condições especificadas no referido trabalho.

3 | CONCLUSÃO

Tendo em vista os trabalhos acima comentados, observa-se um crescente aumento no estudo de cavidades dirigidas em escoamentos com transferência de calor com convecção. Mais precisamente, o uso do Design Construtal tem sido empregado para análise de geometrias cada vez mais diversas. Apesar disso, ainda há várias lacunas que merecem ser investigadas nessa área, como a avaliação de diferentes números de Reynolds, a investigação de um número maior de aletas com diferentes geometrias e a análise numérica de escoamentos com escoamento turbulento.

REFERÊNCIAS

BEJAN A., ZANE P., **Design in Nature: How the Constructal Law Governs.**

Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization. Doubleday, New York: 2012.

BEJAN A., LORENTE S., **Design with constructal theory.** Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2008.

ALDRIGHI, E. S.; RODRIGUES, P. M.; DO A. RODRIGUEZ, B. D.; ISOLDI, L. A. et al., **Constructal Design of Rectangular Fin Intruded into Different Surfaces of Forced Convective Lid-Driven Cavity Flow.** 43, n. 5-6, p. 418-440, 2016.

BEJAN, A. **Shape and structure, from engineering to nature.** New York: University Press, 2000.

BEJAN, A.; LORENTE, S. **The constructal law and the evolution of design in nature.** *Physics of Life Reviews*, 8, n. 3, p. 209-240, 2011.

BISERNI, C.; ROCHA, L. A. O.; BEJAN, A. **Inverted fins: geometric optimization of the intrusion into a conducting wall.** *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, n. 12, p. 2577-2586, 2004.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A.J. **Transferência de Calor e Massa**, 4ªEd. AMGH EDITORA LTDA, 2012.

CHIANG, T. P.; SHEU, W. H.; HWANG, R. R. **Effect of Reynolds number on the eddy structure in a lid-driven cavity.** *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26, n. 5, p. 557-579, 1998.

DURGAM, S.; VENKATESHAN, S. P.; SUNDARARAJAN, T. **Experimental and numerical investigations on optimal distribution of heat source array under natural and forced convection in a horizontal channel.** *International Journal of Thermal Sciences*, 115, p. 125-138, 2017.

ERTURK, E.; GÖKÇÖL, C. **Fourth-order compact formulation of Navier–Stokes equations and driven cavity flow at high Reynolds numbers.** International Journal for Numerical Methods in Fluids, 50, n. 4, p. 421-436, 2006.

ESTRADA, E. d. S. D.; FAGUNDES, T. M.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D. et al. **Constructal Design Associated to Genetic Algorithm of Asymmetric V-Shaped Pathways.** Journal of Heat Transfer, 137, n. 6, 2015.

FONTANA, É.; CAPELETTO, C. A.; DA SILVA, A.; MARIANI, V. C. **Numerical analysis of mixed convection in partially open cavities heated from below.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 81, p. 829-845, 2015.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, 7ªEd.** Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2014.

KOSEFF, J. R.; STREET, R. L. **The Lid-Driven Cavity Flow: A Synthesis of Qualitative and Quantitative Observations.** Journal of Fluids Engineering, 106, n. 4, p. 390-398, 1984.

LORENZINI, G.; BISERNI, C.; DA SILVA DIAZ ESTRADA, E.; DOMINGUES DOS SANTOS, E. et al. **Genetic Algorithm Applied to Geometric Optimization of Isothermal Y-Shaped Cavities.** Journal of Electronic Packaging, 136, n. 3, 2014.

LORENZINI, G.; MACHADO, B. S.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D. et al. **Constructal Design of Rectangular Fin Intruded Into Mixed Convective Lid-Driven Cavity Flows.** Journal of Heat Transfer, 138, n. 10, 2016.

RAZERA, A. L.; DA FONSECA, R. J. C.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D. et al. **Constructal design of a semi-elliptical fin inserted in a lid-driven square cavity with mixed convection.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 126, p. 81-94, 2018.

RAZERA, A. L.; FAGUNDES, T. M.; SEIBT, F. M.; DA FONSECA, R. J. C. et al. **Constructal Design of a Triangular Fin Inserted in a Cavity with Mixed Convection Lid-Driven Flow.** Defect and Diffusion Forum, 372, p. 188-201, 2017.

RODRIGUES, P. M. **Estudo Numérico e Avaliação Geométrica da Transferência de Calor por Convecção Mista em uma Cavidade Dirigida com duas Aletas Inseridas.** (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 2018.

RODRIGUES, P. M.; BISERNI, C.; DE ESCOBAR, C. C.; ROCHA, L. A. O. et al. **Geometric optimization of a lid-driven cavity with two rectangular intrusions under mixed convection heat transfer: A numerical investigation motivated by constructal design.** International Communications in Heat and Mass Transfer, 117, p. 104759, 2020.

SANTOS, E. D.; MACHADO, B. N.; ZANELLA, M. M.; GOMES, M. d. N. et al. **Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design.** Defect and Diffusion Forum, 348, p. 232-244, 2014.

SANTOS, E. D. d.; RODRIGUES, P. M.; ISOLDI, L. A.; PROLO FILHO, J. F. et al. **Geometrical evaluation of rectangular fin mounted in lateral surface of lid-driven cavity forced convective flows.** Revista de Engenharia Térmica; Vol 18, No 2, 2019.

SELIMEFENDIGIL, F.; ÖZTOP, H. F. **Mixed convection of nanofluids in a three dimensional cavity with two adiabatic inner rotating cylinders.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 117, p. 331-343, 2018.

SHANKAR, P. N.; DESHPANDE, M. D. **Fluid Mechanics in the Driven Cavity.** Annual Review of Fluid Mechanics, 32, n. 1, p. 93-136, 2000.

VIEIRA, R. S.; PETRY, A. P.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A. et al. **Numerical evaluation of a solar chimney geometry for different ground temperatures by means of constructal design.** Renewable Energy, 109, p. 222-234, 2017.

XIE, G.; SONG, Y.; ASADI, M.; LORENZINI, G. **Optimization of Pin-Fins for a Heat Exchanger by Entropy Generation Minimization and Constructal Law.** Journal of Heat Transfer, 137, n. 6, 2015.

SOBRE O ORGANIZADOR

GILBERTO JOÃO PAVANI - Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1991), especialização em Análise de Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1994), licenciatura em Informática pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (1996), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Unisinos (2001), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2003) e doutorado em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (em andamento). Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS). Tem experiência em informática, engenharia mecânica, segurança do trabalho, materiais compósitos e poliméricos e participando dos grupos de pesquisa Programas Especiais em Saúde (IPA/RS) e Pesquisa em Polímeros Avançados (IFRS), além de ter publicado vários artigos científicos e livros na área de Engenharia Mecânica.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análise dos Modos e Efeitos de Falha - FMEA 29

Análise estatística 124, 125, 131, 135

C

Calha 7, 15

Cinemática 42, 43, 90, 91, 92

Circuito integrado 138, 142, 143, 144, 145, 146, 147

Confiabilidade 14, 25, 28, 40, 41

Criticidade 1, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 32, 36, 66

D

Desenho 151

E

Estrutura 7, 23, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 134, 135, 150

F

Ferramenta da qualidade 22

Floating Production Storage and Offloading - FPSO 111, 112

I

Impulsor 91, 92, 93, 94, 95

Indústria têxtil 16

Interface gráfica 80

M

Manutenção 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 52, 53, 54, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 112

Manutenção corretiva 1, 3, 4, 5, 8, 11, 18, 19, 39

Manutenção preventiva 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 18, 19, 38, 61

Mecanismo 10, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 50, 71, 74, 75, 76, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 152

Mecanismo de quatro barras 80

Medição fiscal 110, 111, 112, 113, 114, 118

Monitoramento da integridade estrutural 125

O

Ondas de Lamb 124, 125, 126, 129

P

Petróleo 43, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 119, 120, 121, 123

Placa eletrônica 61

Plano de manutenção 4, 5, 7, 12, 13, 22, 28, 30, 35, 37, 40, 54, 63, 64

Pré-resfriamento 98

Q

Qualidade 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 29, 33, 40, 41, 99, 101, 122

R

Rendimento térmico 98

Requisitos metrológicos 110, 111

T

Tempo Médio de Reparo - MTTR 17, 24

Tempo Médio entre Falhas - MTBF 17, 22

Triceratops 68, 69, 77

U

Ultracongelamento 98, 102, 107, 108

V

Ventilador 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 65, 66

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED MECHANICAL ENGINEERING


Ano 2022