ANAIS DO II SiPGEM

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DO CEFET-MG

11 E 12 DE DEZEMBRO DE 2024
BELO HORIZONTE - MG
PPGEM | CEFET-MG

Realização: PPGEM Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Apoio: DEM Departamento de Engenharia Mecânica CEFET-MG; FCM Fundação CEFETMINAS; CEFET-MG

S612a Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do CEFET-MG (2. : 2024 : Belo Horizonte/MG)

Anais do II SiPGEM / CEFET-MG. [recurso eletrônico]. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte: DEM/CEFET-MG, 2024.

107 p.

Disponível em: https://www.sipgem.cefetmg.br/edicoes-anteriores/

e-ISSN: 3085-6957

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica – Congressos. 2. Mecânica Aplicada – Congressos. 3. Máquinas – Congressos. I. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Mecânica. II. Título

CDD 620.1

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária
Bibliotecário: Wagner Moreira de Souza – CRB/6-2623

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFET-MG
Departamento de Engenharia Mecânica - DEM
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM

Direção Geral

Profa. Carla Simone Chamon
Diretora-geral

Prof. Conrado de Souza Rodrigues
Vice-diretor

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação:

Profa. Dra. Laíse Ferraz Correia
Diretora de pesquisa e pós-graduação

Prof. Dr. Claudio Turani Vaz
Diretor Adjunto de Pesquisa e Pós-Graduação

Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Dr. Yukio Shigaki
Coordenador PPGEM

Prof. Dr. Artur Caron Mottin
Prof. Dr. José Leôncio Fonseca de Souza
Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri
Prof. Dr. Wagner Sade

PPGEM | CEFET-MG
BELO HORIZONTE
2024

Comissão Organizadora do II SiPGEM:

Prof. Dr. Artur Caron Mottin
Presidente da comissão

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silva de Lima
Docente PPGEM
Profa. Dra. Ivanilza Felizardo
Docente PPGEM
Profa. Dr. Wagner Sade
Docente PPGEM
Mateus Gabriel Neves Fagundes
Secretário do PPGEM
Eduardo Cassiano Santos David
Representante Discente

Comissão Científica do II SiPGEM:

Prof. Dr. Artur Caron Mottin
Profa. Dra. Cristina Almeida Magalhães
Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silva de Lima
Profa. Dra. Ivanilza Felizardo
Prof. Dr. José Leôncio Fonseca de Souza
Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos
Prof. Dr. Thiago Augusto Araújo Moreira
Prof. Dr. Tiago de Freitas Paulino
Prof. Dr. Wagner Sade
Prof. Dr. Yukio Shigaki

PPGEM | CEFET-MG
BELO HORIZONTE
2024

APRESENTAÇÃO

O Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (SiPGEM) é um evento anual de destaque regional, promovido pelo Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), campus Nova Gameleira. Organizado por uma comissão especial designada pela coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), o SiPGEM tem como objetivo principal divulgar as pesquisas em andamento e fomentar o intercâmbio acadêmico entre docentes e discentes das diversas linhas de pesquisa do programa, incluindo Eficiência Energética e Eficiência em Sistemas e Processos Mecânicos.

Além de promover a disseminação do conhecimento científico, o evento busca incentivar discussões construtivas entre os diferentes grupos de pesquisa, contribuindo para a formação dos pesquisadores em aspectos relacionados à redação de textos científicos e apresentações orais. Para enriquecer o simpósio, foi realizada uma palestra com o Engenheiro Óder Silva de Paula Júnior, Diretor Industrial Sênior da empresa CNH Industrial LTDA (CASE & NEW HOLLAND), titulada "Desafie a Si Mesmo: Comece a Construir os Caminhos Para Uma Carreira de Sucesso".

A comissão organizadora do SiPGEM expressa sua gratidão a todos os participantes, avaliadores e revisores dos trabalhos científicos, bem como à Fundação CEFETMINAS (FCM) pelo apoio financeiro, ao Serviço de Biblioteca, à Diretoria do campus Nova Gameleira, ao Departamento de Engenharia Mecânica e à secretaria do PPGEM, cujo suporte foi fundamental para o sucesso do evento.

Comissão Especial para a organização
do 2° Simpósio da Pós-graduação em
Engenharia Mecânica do CEFET-MG

Realização: PPGEM Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Apoio: DEM Departamento de Engenharia Mecânica CEFET-MG; FCM Fundação CEFETMINAS; CEFET-MG

SUMÁRIO

Artigo	Página
CARACTERIZAÇÃO DA PRESSÃO DO CILINDRO BASEADO EM PARÂMETROS DA TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR *Felipe Augusto de Souza Pereira; Thiago Augusto Araújo Moreira*	8 - 13
ESTUDO DA FORMAÇÃO DO CAVACO NA FURAÇÃO DA LIGA AL-MG-SI 6061 T6 UTILIZANDO FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO COM REVESTIMENTO DE DLC *Luiza Melo Pereira; Paulo Sérgio Martins; Sandro Cardoso Santo*	14 - 21
BRASAGEM DE TUBOS E CONEXÕES ÓLEO-HIDRÁULICAS EM AÇO BAIXO CARBONO COM METAL DE ADIÇÃO X *Alexandre Aurelio Santos Diniz; Ivanilza felizardo*	22 - 26
BALANCEAMENTO DINÂMICO EM ELEMENTOS DE MÁQUINAS ROTATIVOS ATRAVÉS DE MICRO ESFERAS *Raphael Nogueira de Oliveira; Gustavo Paulinelli Guimarães; Thiago Augusto Araujo Moreira*	27 - 33
PREVISÃO DE FALHAS EM MANCAIS DE ROLAMENTO UTILIZANDO APRENDIZADO DE MÁQUINA POR MEIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS: MÓDULO DE UM GÊMEO DIGITAL *Paulo Sérgio Brandão Júnior; Yukio Shigaki*	34 - 38
EFICIÊNCIA DE MOLDE POLIMÉRICO FORMADO POR MANUFATURA ADITIVA TIPO DLP PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS *Eduardo Cassiano Santos David; Artur Caron Mottin*	39 - 44
ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DA REFORMA CATALÍTICA DO ETANOL *Josiel Coelho Gomes de Oliveira; Wagner Sade; Guilherme Benevides Chierici Teixeira; Sidney Nicodemos da Silva; Cleide Barbosa Soares*	45 - 50
CONCEITO BOOSTER NA PRESSÃO DE TRABALHO EM SISTEMAS DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO PARA MÁQUINAS INDUSTRIAIS *Artur Pereira Vilas Boas; José Leôncio Fonseca de Souza*	51 - 55
DETERMINAÇÃO DA MASSA DE UM PCM PARA ARMAZENAMENTO DE FRIO EM SISTEMA DE AR CONDICIONADO *Rodrigo De Carvalho Araujo; André Guimarães Ferreira; Tiago de Freitas Paulino*	56 - 67
MODELAMENTO UNIDIMENSIONAL DE UM SISTEMA LANÇA-CHAMAS UTILIZANDO O SOFTWARE GT-POWER Jonatas Soares Rodrigues; Thiago Augusto Araújo Moreira	68 - 72
INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS POÇO DE ALIMENTAÇÃO DO ESPESSADOR NA HIDRODINÂMICA DA POLPA COM CFD *Leonardo Vinicius Moreira Cortes; José Leôncio Fonseca de Souza*	73 - 77

SUMÁRIO

Artigo	Página
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E PROPOSTA DE AGENDA DE PESQUISA: APLICAÇÃO DE SOFTWARES OPEN SOURCE NO ENSINO DE FLUXOGRAMAS DE ENGENHARIA *Pedro Coelho Silva; André Bücker de Deus; Artur Caron Mottin*	**78 - 88**
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA PÁ EM ROTORES DO TIPO SAVONIUS *Yan Felipe Oliveira Cavalcante; Demétrio Cornilios Zachariadis; José Leôncio Fonseca de Souza*	**89 - 94**
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VEÍCULOS INDUSTRIAIS COM FOCO EM MANUTENÇÃO MECÂNICA *Marcus Vinicius Costa Silva Rosendo; Estevão Farias Termeloglou; André Costa Martins; Alesi Augusto de Paula; Thiago Augusto Araújo Moreira*	**95 - 100**
DETECÇÃO DE KNOCK COM VALIDAÇÃO INSTRUMENTAL PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA *Luan Rene Costa; Fernando Antônio Rodrigues Filho; Thiago Augusto Araujo Moreira*	**101 - 106**

Caracterização da Pressão do Cilindro Baseado em Parâmetros da Taxa de Liberação de Calor

Felipe Augusto de Souza Pereira[1] (0009-0003-0627-2226), Fernando Antônio Rodrigues Filho[1] (0000-0003-1786-4158), Thiago Augusto de Araújo Moreira[1] (0009-0004-0553-5116)

1 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo: O desenvolvimento de motores envolve uma ampla etapa de pesquisa e estudo, sendo essencial conhecer o processo de combustão para a produção de motores com menor emissão de poluentes e consumo de combustível visando minimizar os impactos ao meio ambiente. Este trabalho utiliza um procedimento para análise de parâmetros estratégicos da taxa de liberação de energia de um motor de ignição por centelha, alimentado com gasolina comum tipo C, para caracterizar a curva de pressão no interior do cilindro durante o processo de combustão utilizando uma metodologia baseada na função de Wiebe. É um método de baixo custo que oferece boa relação entre capacidade computacional e resultados e tem a capacidade de auxiliar em estudos relacionados ao processo de combustão de motores. Os resultados obtidos apresentam boa correlação com os dados medidos experimentalmente em dinamômetro de bancada.

Palavras-chave: Calibração, Combustão, Eficiência Energética, Função de Wiebe, Perfil MBF.

Introdução

Os motores a combustão interna evoluíram significativamente nas últimas décadas, principalmente em busca de reduções drásticas na emissão de gases poluentes responsáveis pelo efeito estufa. As legislações estão mais rigorosas com o passar dos anos. A PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) foi criada em 1986 com o intuito de elaborar políticas para reduzir a produção de poluentes no Brasil. As diversas versões implementadas representaram uma redução de 96% no volume de monóxido de carbono desde o início do programa, o que implica na necessidade de motores com desempenho ambiental cada vez melhor [1].

O rápido desenvolvimento da indústria automotiva gerou a necessidade de aplicação de diversas ferramentas computacionais no processo de desenvolvimento de novos motores, sendo a simulação numérica uma ferramenta aplicada para o modelamento da combustão nos motores. Este modelamento pode ser dividido em modelos zero dimensional, quase-dimensional e tridimensional [2]. Os processos envolvidos no funcionamento de um motor, como processo de combustão, calor transferido para as paredes do cilindro, fluxo de calor de entrada e saída na câmara de combustão, etc., podem ser simulados usando os modelos 0-D e 1-D. A combustão é um processo com grande complexidade para simulação, diversos modelos são propostos na literatura, existindo modelos preditivos, mais complexos e trazem consigo uma menor incerteza, a modelos não preditivos, com menor complexidade e consequentemente uma demanda computacional menor, sendo utilizados para análises mais superficiais [3].

O presente trabalho busca utilizar parâmetros estratégicos ligados a taxa de liberação de calor do motor, que foram obtidos experimentalmente, para determinação da pressão interna da câmara de combustão em função do ângulo do virabrequim. Utilizando o software de análise de combustão *Indicom*, obtiveram-se os dados da fração mássica de combustível queimada (MBF), sendo os: MBF10, MBF50 e MBF90, além da pressão máxima na câmara de combustão (P_{max}) e pressão de admissão. Utilizando a função de Wiebe foi possível determinar a taxa de liberação de calor e, em seguida, utilizá-la para determinar os valores de pressão dentro do cilindro do motor. Os resultados obtidos foram comparados com os dados de pressão obtidos experimentalmente.

Metodologia

Os experimentos foram conduzidos em um motor de ignição por centelha FIAT 1.6 16V (HI-TORQUE) com 4 cilindros, as especificações do motor são apresentadas na Tabela:

Tabela 1 – Especificações motor Fiat 1.6 16V (HI-TORQUE)

Posição:	Transversal
Nº de cilindros:	4 em linha
Diâmetro x curso:	80,5 x 78,4 mm
Biela:	133 mm
Taxa de Compressão:	9,5:1
Potência Máxima (ABNT) /Regime:	79,04 kW / 5.500 rpm
Torque Máximo (ABNT) / Regime:	150,92 Nm / 4.500 rpm
Válvulas por cilindro:	4
Alimentação de combustível:	Gasolina
Distribuição Admissão:	
Início	0° apms
Final	34° dpmi
Distribuição Descarga:	
Início	24° apmi
Final	0° dpms

O modelo foi desenvolvido com base nas equações de conservação da massa e da equação de estado (gás ideal) com o objetivo de definir as propriedades dos gases durante o processo de combustão. Considerando que é admitida a mistura de ar seco e vapor de combustível, mistura não queimada, e supondo ainda, as estequiometrias das massas admitidas de ar e combustível através de uma reação de combustão completa, gerando como produto CO_2 e H_2O. Essas considerações referentes a mistura queimada e não queimada permitem calcular as concentrações mássicas e volumétricas de cada substância, a fração molar, a massa molar e os calores específicos a volume e pressão constante da fração queimada e não queimada contida dentro do cilindro. A Tabela 2 apresenta as propriedades dos gases utilizados no modelo, sendo denominados *unburned* os gases não queimados e os *burned* os gases queimados.

Tabela 2 – Propriedades dos gases

	Unburned	Burned	Unidade
Massa molar	33,81	29,97	g/mol
Cv	0,778	0,794	Kj/kg.K
Cp	1,052	1,087	Kj/kg.K

Considerando que o ângulo do virabrequim está diretamente relacionado com o volume deslocado dentro da câmara de combustão V(Θ), é importante obter o volume instantâneo durante o processo, que pode ser calculado através da Equação (1), que foi obtida com a análise geométrica do conjunto pistão e biela [2]:

$$V(\Theta) = V_{cc} + A_c(l + a - s(\Theta)) \quad (1)$$

Onde,

$$s(\Theta) = \text{acos}(\Theta) + (l^2 - a^2 sen^2(\Theta))^{1/2} \quad (2)$$

V_{cc} = Volume da câmara de combustão;

A_c = Área do cilindro;

L = Comprimento da biela;

a = Comprimento da manivela do virabrequim;

s = Posição do pistão;

Θ = Posição angular do virabrequim.

A taxa de liberação bruta de calor do motor não é conhecida e pode ser estimada com razoável incerteza pela função de Wiebe de estágio único, que é frequentemente utilizada para análises de motores e obtenção do perfil de combustão, principalmente para motores de ignição por centelha [4]. Este tipo de modelo, semiempírico que estima o processo de combustão em função do ângulo do virabrequim (*crank-angle*), apresenta uma baixa demanda computacional com relativa precisão [5]. A função Wiebe é utilizada com frequência em estudos de combustíveis alternativos, aplicação de sobre alimentação na combustão e efeitos da variação de geometria, o que mostra sua vasta aplicabilidade [6]. A curva da liberação de calor é caracterizada por um formado de "S" obtida através da Equação (3), que é uma relação entre o ângulo do virabrequim, e os parâmetros da função [7].

$$X_b = 1 \exp[-a\left(\frac{\Theta - \Theta_0}{\Delta\Theta}\right)^{m+1}] \quad (3)$$

X_b representa a fração mássica queimada de combustível, "*a*" é o parâmetro de eficiência da combustão e "*m*" é o parâmetro de forma da função. Para uma combustão com eficiência de conversão do combustível em energia igual a 0,999 o parâmetro de eficiência para a função de Wiebe pode ser considerado igual a 6,908 [7].

Heywood (1988) utilizou a Equação (4) para a analisar a liberação de calor durante a operação de um motor. A partir da pressão e do volume instantâneo do cilindro foi possível determinar a taxa de

liberação de calor da combustão [8]. Considera-se a câmara de combustão como um volume de controle, uma vez que, a equação é aplicada após o fechamento de válvulas e o único fluxo através da fronteira é a injeção de combustível.

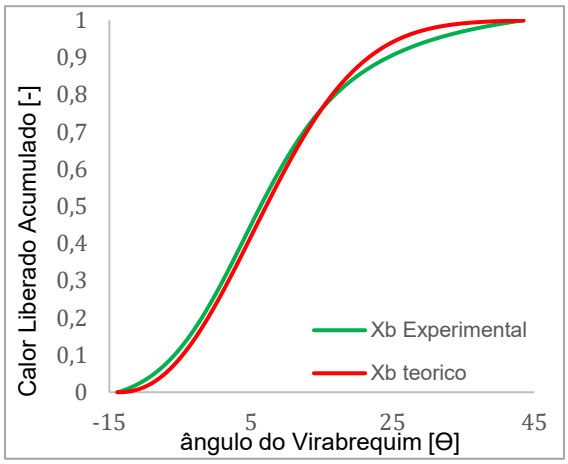
$$\frac{dQ_{ch}}{d_\theta} - \frac{dQ_w}{d_\theta} = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) p \frac{dV}{d_\theta} + \left(\frac{1}{\gamma-1}\right) V \frac{dp}{d_\theta} \qquad (4)$$

Onde, γ equivale a $\frac{Cp}{Cv}$.

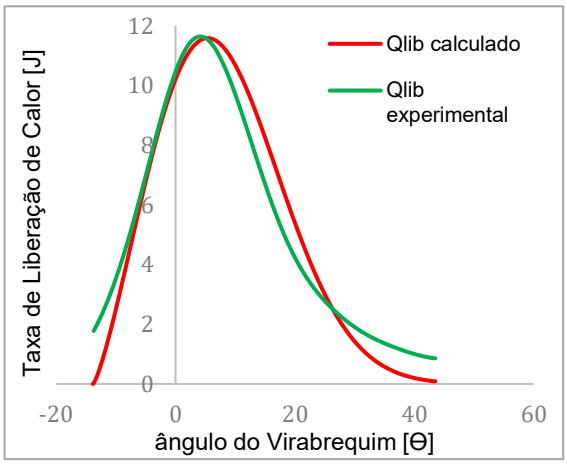
Resultados e Discussão

A função de Wiebe permitiu obter o valor de calor liberado acumulado durante a operação do motor, como apresentado na Figura 1a. A partir dos dados encontrados, foi realizado a derivação do resultado e obtido também a taxa líquida de liberação de calor para o motor operando com mistura estequiométrica, razão de compressão de 9,5:1, lambda 1,00, 20% do torque máximo e gasolina E25, como demonstrado na Figura 1b.

Figura 1: (a) – Calor liberado acumulado para condição de operação. (b) Taxa líquida de liberação (Q_{lib}).



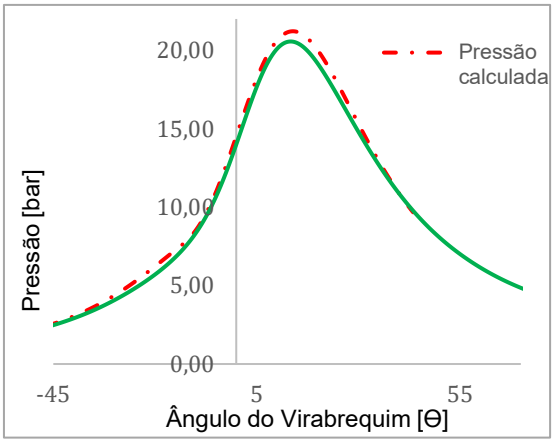
(a)



(b)

Baseado nos resultados obtidos com a função de Wiebe e as propriedades dos gases calculados para a fração queimada e não queimada da mistura dentro do cilindro, foi possível aplicar a Equação (4) e estimar a pressão dentro do cilindro, Figura 2.

Figura 2: Curva de pressão obtida através do modelo X curva de pressão experimental



Conclusão

O método utilizado apresentou resultados satisfatórios na análise de motores a combustão interna do ciclo Otto, com relativa consistência em relação aos dados experimentais. Percebe-se boa correlação da liberação de calor acumulada e a taxa de liberação de calor com os dados experimentais medidos utilizando o *IndiCom*.

A curva de pressão obtida através do modelo apresentou características alinhadas aos dados experimentais. Existe um desvio entre os dois resultados, próximo à pressão máxima, que pode ser justificada pelas aproximações realizadas para estimar as perdas envolvidas no processo. Conclui-se que a metodologia aplicada tem boa capacidade para auxiliar em estudos futuros relacionados ao processo de combustão e à obtenção da pressão interna da câmara de combustão.

Referências

[1] Pereira, Felipe Augusto de S.; Moreira, Thiago Augusto A.; Filho, Fernando Antônio R.; "Evolução do controle de emissão de poluentes e os avanços tecnológicos necessários: uma abordagem histórica", p. 15-19. In: **Anais do I Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do CEFET-MG, SiPGEM**. Belo Horizonte, 2023.

[2] Teixeira A F, Rodrigues Filho F A, Moreira T A A, Barros JEM, Baeta J G C. Hybrid combustion model for engine analysis in real time. **SAE Tech Pap** 2015; 2015 Septe. https://doi.org/10.4271/2015-36-0213.

[3] Beccari, S.; Pipitone, E. A New Simple Function for Combustion and Cyclic Variation Modeling in Supercharged Spark Ignition Engines. **Energies** 2022, 15, 3796. https://doi.org/10.3390/en15103796

[4] Yang, R.; Ran, Z.; Assanis, D. Estimation of Wiebe Function Parameters for Syngas and Anode Off-Gas Combustion in Spark-Ignition Engines. **J. Eng. Gas Turbines Power**. Jul 2023, 145(7): 071004 (8 pages). https://doi-org.ez107.periodicos.capes.gov.br/10.1115/1.4056856

[5] Yeliana, Y.; Cooney, C.; Worm, J.; Michalek, D. J.; Naber, J. B. Estimation of double Wiebe function parameters using least square method for burn durations of ethanol-gasoline blends in spark ignition engine over variable compression ratios and EGR levels. **Applied Thermal Engineering**. Volume 31, Issues 14–15, October 2011, Pages 2213-2220. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.040

[6] Sapra, H.; Godjevac, M.; De Vos, P.; et al. Hydrogen-natural gas combustion in a marine lean-burn SI engine_ A comparitive analysis of Seiliger and double Wiebe function-based zero–dimensional modelling. **Energy Conversion and Management**. Volume 207, 2020, 112494. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112494

[7] Zhu, J.; Du, P.; Zhang, G.; Song, H.; Li, B.; Long, W.; Dong, D. Development and Validation of a Modeling and Calibration Method for Diesel-Like Multistage Combustion Based On a Modified Multi-Wiebe Function. ***ACS Omega*** 2022 7 (14), 11756-11769. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c06858#

[8] HEYWOOD, J. **Internal Combustion Engine Fundamentals** 2E /. New York, N.Y.: Mcgraw-Hill Education, 2019.

ESTUDO DA FORMAÇÃO DO CAVACO NA FURAÇÃO DA LIGA AL-MG-SI 6061 T6 UTILIZANDO FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO COM REVESTIMENTO DE DLC

Luiza Amelia de Melo Pereira [1] (0009-0001-6473-7509), Sandro Cardoso Santos [1] (0000-0002-4628-4788), Paulo Sérgio Martins [2] (0000-0002-8239-7528)

1 (Laboratório de usinagem, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica)

2 (Laboratório de usinagem, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário UNA)

Resumo: As ligas de alumínio vêm sendo aplicadas em várias áreas da indústria pois possuem excelente relação resistência-peso, boa ductilidade, baixa densidade, excelentes condutividades térmica e elétrica e resistência à corrosão. As ligas da classe al-Mg-Si 6061, apresentam características bastante empregadas na indústria aeronáutica, automotiva, química, petroquímica e de embalagens. A literatura sobre usinagem das ligas de alumínio é muito rica, mas limita-se nas investigações que levam em conta os problemas de usinagem, principalmente àqueles relacionados com forças, temperaturas, controle e formação do cavaco e, normalmente, são trabalhos pontuais, em processos específicos, geralmente em apenas uma determinada liga. A formação do cavaco é fator primordial e controlador de todas as variáveis do processo de usinagem e essa formação depende muito das propriedades do material. Neste trabalho, determinou-se experimentalmente as características do cavaco com foco no grau de recalque buscando avaliar sua relação com a microdureza, rugosidade e desvios de forma.

Palavras-chave: Ligas de Alumínio, Propriedades Mecânicas, Condições de Corte, Grau de Recalque.

Introdução

O alumínio é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre e em sua forma natural é combinado com oxigênio e outros elementos. Uma referência do crescimento da produção de alumínio é a sua aplicação na indústria automotiva em que apresenta um crescimento de oito vezes a quantidade de alumínio utilizada por veículos nos últimos anos. As ligas das séries 2xxx, 7xxx e 6xxx são responsáveis pela maior parte das atividades de usinagem nas indústrias aeroespacial e automotiva, pois apresentam elevada relação resistência-peso e podem substituir com vantagem o aço e o ferro fundido na fabricação de peças, além do baixo peso reduzir o impacto ambiental causado pelo consumo de energia (SANTOS Jr. et al., 2016). A densidade do alumínio (da ordem de 2,7 g/cm³) é aproximadamente um terço da densidade do aço. Essa propriedade oferece uma série de vantagens em termos de desempenho, eficiência, custo e facilidade de fabricação em uma variedade de aplicações industriais e comerciais. Outra característica de destaque do alumínio é a sua facilidade de ser reciclado sem que sejam alteradas suas propriedades físicas e químicas e por meio de um processo que utiliza apenas 5% da energia que é utilizada em sua produção (ABAL,

2020). A composição química da liga Al- Mg-Si 6061-T6 apresenta os seguintes elementos químicos dentro das suas respectivas faixas percentuais em peso: 0,40 % a 0,80 % de silício, 0,8 % a 1,2 % de magnésio, 0,15 % a 0,40 % de cobre, e 0,04 % a 0,35 % de cromo. Elementos como o ferro, o manganês, o zinco e o titânio são especificados de acordo com limites máximos toleráveis, respectivamente em 0,7 %, 0,15 %, 0,25 % e 0,15 %.

A furação é um processo de usinagem feita pela da remoção de material em forma de cavaco, responsável por mais de 30 % de todas as operações de usinagem e, por aproximadamente, 40 % das operações nos setores automotivo e aeroespacial. Semelhante a outros processos existentes, a furação envolve fenômenos como deformação plástica, fratura e desgaste. Além disso, também gera calor e, consequentemente, aumenta a temperatura do conjunto peça-ferramenta, o que deve ser observado, pois pode contribuir para o desgaste prematuro da ferramenta e influenciar no acabamento superficial da peça (MARTINS et al., 2024). Por ser tratar de um processo de alta complexidade, a furação pode envolver vários fenômenos como deformação plástica, fratura, impacto, desgaste, dentre outros. Além dos fenômenos mencionados, também estão presentes a geração de calor e as elevadas temperaturas de corte.

No processo de furação em ligas de alumínio, a usinagem a seco tem-se mostrado uma tendência para tornar a manufatura mais “sustentável”, ou seja, com menores impactos ambientais e insalubres. Ao mesmo tempo, as funções realizadas pelo fluido como lubrificação, refrigeração e transporte de cavacos, são inexistentes ou diminuídas, gerando um maior atrito e provocando o aumento da temperatura na região. Na furação de ligas de alumínio a seco, a falta de um meio que favoreça o transporte e a expulsão dos cavacos colabora ainda mais para o aquecimento da região, além de favorecer a adesão de material à ferramenta. A principal característica dos aços rápidos (HSS) é a capacidade de manter altos níveis de dureza a elevadas temperaturas e isso permite que sejam aplicados na fabricação de ferramentas de corte. O aço rápido apresenta menor desempenho quando comparado aos demais materiais, como o metal duro, por exemplo, pois se observa mudanças de propriedades mecânicas em temperaturas superiores a 600°C (MARTINS, 2016). Sendo assim, as brocas só devem ser empregadas com baixas velocidades de corte para evitar o desgaste prematuro (MORENO, 2013). Uma alternativa que traz resultados mais eficientes aos processos de usinagem é a utilização de ferramentas de corte revestidas. A tecnologia dos revestimentos é uma alternativa que pode melhorar o desempenho das ferramentas de corte nas condições de usinagem a seco pois são capazes de impedir o aumento das temperaturas proveniente do atrito e amenizar o desgaste. (CHETAN et al., 2015; RIBEIRO FILHO et al., 2017; PAKTINAT e AMINI, 2018). O carbono semelhante ao diamante (DLC – *Diamond-Like Carbon*) é uma forma metaestável do carbono amorfo que combina as propriedades do diamante e do grafite. Vem sendo estudado há algumas décadas, destacando-se em diversas aplicações e tem mostrado desempenho satisfatório na usinagem a seco de ligas de alumínio devido à capacidade de auto lubrificação, combinando altos níveis de dureza, baixo coeficiente de atrito e boa resistência ao desgaste abrasivo e à corrosão. (SALAH et al., 2016; KOVACı et al., 2018; KUMAR, Ch. et al., 2020; BA, 2022).

A partir do processo de furação da liga Al-Mg-Si 6061 T6 utilizando ferramentas de aço rápido com e sem revestimento de DLC é possível investigar o comportamento do cavaco durante os experimentos. Dentre os parâmetros relativos ao cavaco, o grau de recalque é um dos mais importantes para representar a usinabilidade do material. Um grau de recalque elevado significa que o cavaco sofreu grandes deformações no plano de cisalhamento primário, devido à restrição sofrida para escorregar no plano de cisalhamento secundário e gerando consequentemente um aumento da espessura do cavaco (MACHADO et al., 2011). A ductilidade elevada do alumínio promove cavacos contínuos, geralmente na forma de fita longa, espessos e difíceis de serem

quebrados, sendo que o controle desses cavacos pode se tornar o principal problema na usinagem das ligas de alumínio pois podem se emaranhar na peça prejudicando sua qualidade superficial (DEMIR; GUNDUZ, 2008; KELLY; COTTERELL, 2002; MACHADO et al., 2011).

Os estudos dos níveis de rugosidade influenciam na qualidade do deslizamento, resistência ao desgaste, possibilidade de ajustes, resistência a corrosão e fadiga, aparências dentre outros (SANTOS, 2005). A assimetria (Rsk) descreve a probabilidade de distribuição entre picos e vales no perfil de rugosidade. Esse parâmetro determina se a rugosidade de uma superfície é predominante em picos ou em vales (TO et al., 2018; SEDLAČEK et al., 2017; BARBOSA, 2024). A curtose (Rku ou Sku) refere-se ao achatamento das asperezas, tendo o valor gaussiano igual a três. Uma superfície com curtose abaixo de três significa que os picos e os vales possuem extremidades mais achatadas e, caso contrário, as asperezas são mais pontiagudas (HE et al., 2018; TO et al., 2018).

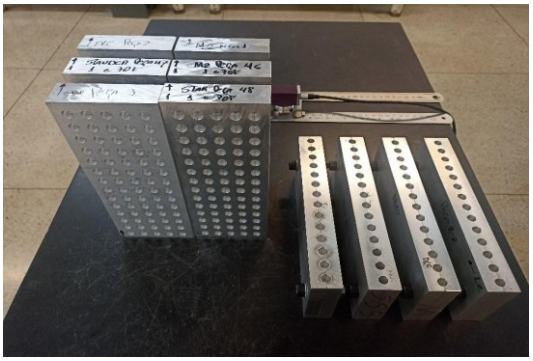
O propósito do artigo é investigar o processo de furação da liga de alumínio Al-Mg-Si 6061 T6 utilizando brocas de aço rápido AISI M2 com e sem revestimento de DLC, avaliando como variáveis de resposta a forma do cavaco, o grau de recalque e a rugosidade dos furos usinados.

Metodologia

Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios de usinagem foram preparados a partir de barras em liga de alumínio 6061 T6 de seção retangular com 25.4mm de espessura, 80mm de largura e 240mm de comprimento, conforme mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Barras de alumínio



Fonte: Elaborado pela Autora

Ensaios de furação com broca com e sem filme DLC

Para cada ensaio estabelecido, de acordo com a ISO 8688, cada conjunto de placas formando o corpo de prova foi enumerado antes de ser utilizado, totalizando 24 corpos de prova sendo divididos em três grupos com 8 corpos de prova para cada grupo. O grupo 1 utilizando ferramentas de aço rápido sem revestimento, grupo 2 com revestimento de DLC Standard e grupo 3 com revestimento de DLC Star (Tabela 1). Para cada corpo de prova, foram usinados 70 furos em cada face da barra, totalizando 140 furos em cada corpo de prova.

Tabela 1 – Plano experimental para realização dos ensaios de usinagem

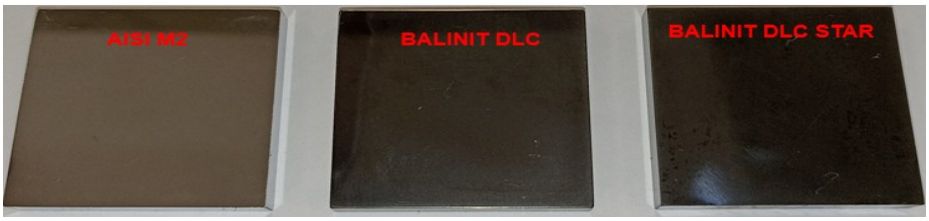
Ensaio	Grupo	Revestimento	Quantidade de corpos de prova
1	1	Sem revestimento	8
2	2	DLC Standard	8
3	3	DLC Star	8

Fonte: Elaborado pela Autora

Os ensaios de usinagem foram realizados no centro de usinagem CNC Romi Discovery 560. A broca foi fixada no mandril hidráulico com pinça de Ø 8 mm, mantendo-se constante a distância de 50 mm entre a ponta da broca e a face de referência do mandril. Antes da realização de cada bloco de teste de furação, foi verificado o batimento radial da ferramenta, o desvio máximo observado foi de 0,01 µm.

As brocas de diâmetro 8mm também em aço rápido AISI M2 fabricadas pela empresa Nipo-tec em Jundiaí, onde tem-se a primeira broca em AISI M2 e sem revestimento (A), a segunda broca com revestimento DLC STANDARD (B) e a terceira broca em revestimento DLC STAR (C). O processo de deposição dos revestimentos DLC STANDARD e DLC STAR nas brocas e placas em aço AISI M2 foram realizados na empresa Oerlikon Balzers em Jundiaí, São Paulo. As placas de aço AISI M2 de dimensões 5 x 30 x 30 mm, apresentados na Figura 2, fabricados pela empresa Nipo-tec em Jundiaí são encontradas, respectivamente, sem revestimento (apenas aço rápido AISI M2), com revestimento de DLC STANDARD e com revestimento de DLC STAR.

Figura 2 – Placas de aço AISI M2 sem revestimento (A), com revestimento DLC STANDARD (B) e com revestimento DLC STAR.

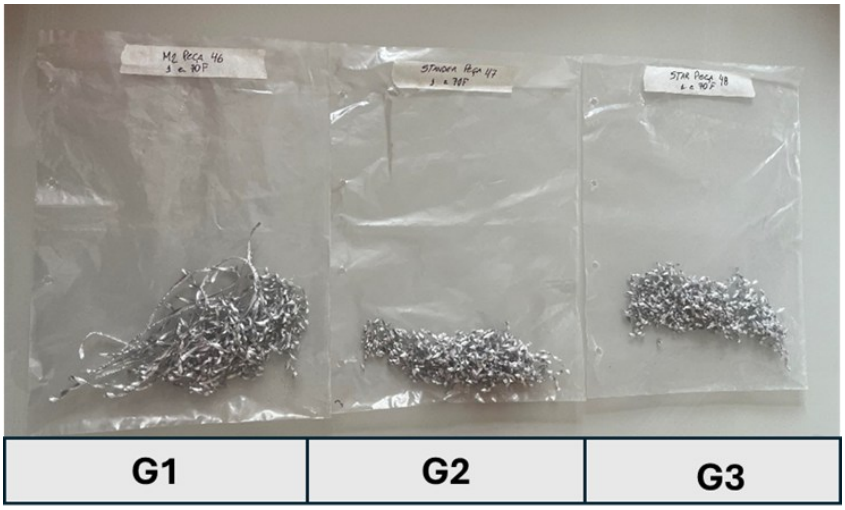


Fonte: Elaborado pela Autora

Análises dos cavacos: morfologia e tipo

Os cavacos oriundos do processo de usinagem foram coletados após algumas etapas durante o processo de furação e separados para análise. Esses cavacos foram separados em três grupos: (G1) cavacos oriundos do processo de furação com brocas sem revestimento; (G2) cavacos oriundos do processo de furação com brocas em revestimento de DLC Standard; (G3) cavacos oriundos do processo de furação com brocas em revestimento de DLC Star. Na Figura 3, é possível observar a forma como os cavacos foram separados em seus respectivos grupos.

Figura 3 – Cavacos separados por grupos G1, G2 e G3



Fonte: Elaborado pela Autora

Foram 16 pacotes de cavaco para cada um dos três grupos, cada pacote partindo de 1 até 70 furos. No total foram armazenados 32 pacotes contendo os cavacos do experimento.

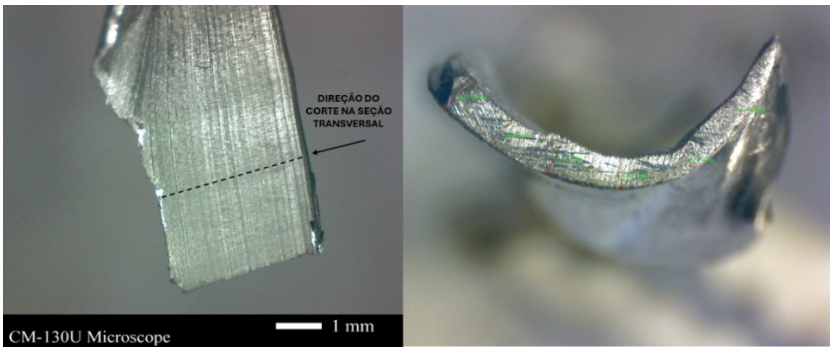
Foram registradas imagens das amostras para analisar o tipo do cavaco e realizado um corte no sentido longitudinal da amostra. Em seguida, a amostra foi embutida em resina termofixa de cura a quente (Baquelite), lixada com lixas de granulometria 220, 320 e 50, polidas com pastas de diamante de grãos 6 µm, 3 µm, e 1 µm e, para finalizar, foi feito um ataque químico com solução Nital a 3% para ser analisado através do MEV.

Para analisar forma, foram registradas imagens dos cavacos para observar o padrão ligado diretamente ao tipo de processo de usinagem utilizado, no caso a furação, além do formato da ferramenta que é uma broca helicoidal.

Grau de recalque

Para calcular a espessura do cavaco, foram separadas três amostras de cada um dos 16 pacotes de cavaco dos grupos G1, G2 e G3 e, utilizando a micro retífica elétrica da marca WESCO WS3113KU, potência de 160W, rotação de 8000-35000/min e equipado com disco de corte que foi utilizado para fazer um corte na seção transversal dos cavacos, de acordo com a Figura 4 e, posteriormente, foi utilizado a lixa para fazer o lixamento nas bordas para tirar a rebarba. Após esse processo, foi feita a medição da espessura (h') do cavaco. Para essa medição foi utilizado a câmera do Micrometer da marca DERMAZOOM com especificações de ampliação real 50 a 300x, iluminação de 8 LED's de luz branca fria que realça problemas e com pontos de foco 2 + 2 com os espaçadores AMPLIX em conjunto com o software DERMAZOOM. A espessura foi expressa por meio da média aritmética calculada a partir dos resultados obtidos nas três amostras para cada pacote de cavaco.

Figura 4 – Corte na seção transversal do cavaco



Fonte: Elaborado pela Autora

É possível calcular o grau de recalque por meio da razão entre a espessura real do cavaco formado (h') e a porção teórica de material removida (h), de acordo com equação (1):

$$Rc = \frac{h'}{h} \tag{1}$$

Como foi calculado a espessura (h'), foi necessário calcular o valor de (h) a partir da equação (2) para obter o valor de Rc.

$$h = f \times_{sin\, X_r} \tag{2}$$

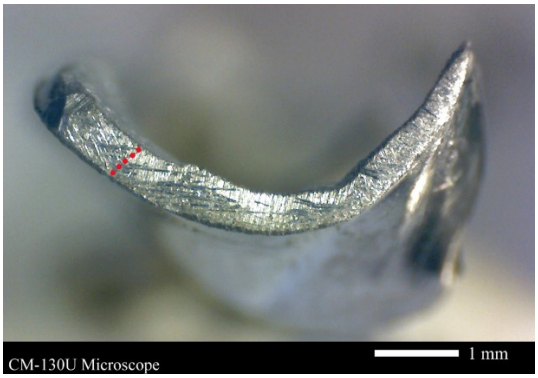
Com esses valores, obteve-se o grau de recalque. Cada pacote de cavaco vai ter um resultado representativo do grau de recalque e, a partir disso, será possível averiguar o comportamento do grau de recalque ao longo da usinagem. Além disso, será possível fazer a comparação entre o grau de recalque obtido em cada um dos grupos G1, G2 e G3.

Microdureza do cavaco

Foram utilizadas três amostras para calcular a microdureza do cavaco e, para essas medições, foi utilizado o Durômetro para Microdureza Vickers HM-210-810-404. O teste é feito por meio da indentação no qual um penetrador de diamante piramidal altamente polido, pontiagudo e de base quadrada com ângulos de face de 136° 0' é forçado sob condições especificadas na superfície do material usando forças de teste na faixa de 9,807 × 10-3 a 9,807 N (1 a 1000 gf) com tempo de aplicação da força de teste variando entre 5 e 7 segundos e tempo de permanência da força de ensaio compreendido entre 13 e 15 segundo. Após a remoção da força de teste, os comprimentos das duas diagonais da área projetada da indentação são medidos para calcular o número de dureza Vickers.

Foram realizadas cinco indentações na seção transversal do cavaco de cada uma das três amostras para obter a média da microdureza, como é representado na Figura 5.

Figura 5 – Indentações na seção transversal do cavaco para avaliar microdureza



Fonte: Elaborado pela Autora

Rugosidade

A rugosidade na parede dos furos foi medida pelo método de contato com o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-310 e, em cada furo foram realizadas 4 medições na superfície interna dos furos no sentido do comprimento interno do furo, em cada face, sendo uma na parte inicial e outra na parte mais profunda do furo. Em seguida, considerou-se um valor médio aritmético dos parâmetros mensurados para todos os furos de prova.

Resultados e Discussão

Espera-se encontrar os valores do grau de recalque e entender quais parâmetros tiveram mais influência nesses resultados. Além disso, analisar como o grau de recalque está influenciando nos parâmetros de assimetria e curtose e qual sua correlação com a microdureza, além de entender como a usinagem a seco está afetando a dureza do material.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). **Têmperas.** Disponível em: http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/. Acesso em 19/04/24

BA, Elhadji Cheikh Talibouya. **Análise da influência do avanço e da velocidade de corte no processo de furação sobre os parâmetros de assimetria (RSK) e curtose (RKU) na caracterização superficial utilizando brocas de aço-rápido com e sem revestimento DLC (Diamond-like-carbon**). 2022.

CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P.V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. **Journal of Cleaner Production**. vol. 100, p. 17-34, 2015.

KELLY, J.F.; COTTERELL, M.G. Minimal lubrication machining of aluminium alloys. Journal of **Materials Processing Technology.** vol. 120, p. 327-334, 2002.

KOVACı, H.; BARAN, Ö.; YETIM, A.F.; BOZKURT, Y.B.; KARA, L.; ÇELIK, A. The friction and wear performance of DLC coatings deposited on plasma nitrided AISI 4140 steel by magnetron sputtering under air and vacuum conditions. **Surface & Coatings Technology**. vol. 349, p. 969-979, 2018.

KUMAR, Ch.S.; MAJUMDER, H.; KHAN, A.; PATEL, S.K. Applicability of DLC and WC/C low friction coatings on Al2O3/TiCN mixed ceramic cutting tools for dry machining of hardened 52100 steel. **Ceramics International**. vol. 46, p. 11889-11897, 2020.

MACHADO, A.R; ABRÃO, A.M; COELHO, R.T; SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

MARTINS, Paulo Sérgio et al. Evaluation of the drilling process in 6061-T6 Al-Mg-Si alloys using AISI M-35 diamond-like carbon coated high-speed steel drill. **Tribology International**, v. 192, p. 109250, 2024.

PAKTINAT, H.; AMINI, S. Numerical and experimental studies of longitudinal and longitudinal-torsional vibrations in drilling of AISI 1045. **Int J Adv Manuf Technol**. vol. 94, p. 2577-2592, 2018.

SALAH, N.; ALSHAHRIE, A.; IQBAL, J.; HASAN, P.M.Z.; ABDEL-WAHAB, M.Sh. Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures. **Tribology International**. vol. 103, p. 274-280, 2016.

SANTOS Jr. M. C. et al. Machining of aluminium alloys: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. vol. 86, p. 3067-3080, 2016.

Brasagem de Tubos e Conexões Óleo-Hidráulicas em Aço Baixo Carbono com Metal de Adição X

Alexandre Aurelio Santos Diniz[1], Ivanilza Felizardo[2]

[1]CEFET-MG, Belo Horizonte (PPGEM, Dep. Eng. Mecânica)
[2]CEFET-MG, Belo Horizonte (PPGEM, Dep. Eng. Mecânica) ORCID ID 0009-0003-6377-2614

Resumo: Tubos hidráulicos são componentes presentes em máquinas agrícolas. Tubos são unidos a conexões, principalmente pelo processo de brasagem. O uso de metal de adição a base de prata onera significativamente o processo de brasagem por indução. O metal de adição X mostrou-se potencial para aplicação alternativa aos metais de adição a base de prata, promovendo juntas brasadas de alta qualidade com custo aproximadamente 44% menor.

***Palavras-chave*:** Brasagem por indução; Tubos hidráulicos; Metal de adição a base Ag.

Introdução

Dentre os vários segmentos da indústria de veículos automotores, destaca-se as máquinas agrícolas (tratores de rodas e de esteiras, cultivadores motorizados, colheitadeiras, plantadeiras, pulverizadores, dentre outros) responsáveis diretamente pela mecanização da agricultura gerando aumento da produtividade e profissionalização da cadeia produtiva do agronegócio. O Sistema óleo-hidráulico presente na máquina agrícola é responsável pela geração, controle e transmissão de energia por meio de fluido (óleo hidráulico) pressurizado, o que proporciona características tais como controle de velocidade e do sentido de deslocamento e alta precisão e força na operação dos implementos agrícolas. Diferentes componentes integram o sistema hidráulico de máquinas agrícolas, em maior quantidade apresentam-se os tubos e conexões hidráulicas, projetados em diferentes geometrias e dimensões. Os tubos hidráulicos são obtidos a partir de conformação mecânica (corte e dobra a frio) de tubos retos em aço baixo carbono. As conexões, flanges e/ou conectores hidráulicos (extremidades com geometria específica) são unidas ao tubo por processo de brasagem.

A brasagem é amplamente utilizada na indústria metal mecânica e consiste na utilização de um metal de adição com ponto de fusão inferior ao ponto de fusão do metal base. Durante o processo de brasagem, apenas o metal de adição funde-se e reage quimicamente com as superfícies dos metais base. Nesta união, para que seja perfeita, é necessário que o líquido formado molhe as superfícies do metal base e seja conduzido por capilaridade para os vazios (folgas geométricas) existentes entre o tubo e as conexões flanges e/ou conectores hidráulicos. Quanto a qualidade, a união por brasagem devem resultar em patamares de resistência mecânica adequada para suportar as cargas e vibrações típicas à aplicação em máquinas agrícolas e ser estanques (isento de vazamento de óleo hidráulico). As propriedades mecânicas da junta brasada dependem diretamente de diversos fatores, dentre eles a natureza do metal de adição, que são ligas ou metais puros apropriados para a brasagem utilizados na forma de arames, varetas, pastas, pós, chapas, fitas e pré-formados.

A tipologia de materiais de metal de adição mais utilizada para brasagem de tubos e conexões hidráulicas em aço baixo carbono são as ligas de prata (Ag) que por ser um metal nobre, onera

demasiadamente o custo de produção. A prata é um dos metais preciosos valorizado no mercado, principalmente por ser utilizado na fabricação de computadores, celulares, eletrodomésticos, painéis solares, ou seja, produtos modernos altamente demandados. As ligas de brasagem geralmente contêm mais de 40% de Ag (em peso), têm desempenhado um papel importante na união de metais. Esta família de liga apresenta baixo ponto de fusão (600–800°C) e ampla compatibilidade metalúrgica com ligas de diferentes metais, levaram ao seu uso em larga escala. No entanto, ligas de brasagem contendo Ag são dispendiosas, a prata pode custar mais de 75 vezes o preço do cobre e aproximadamente 150 vezes maior que o zinco, em peso. Em um mercado cada vez mais competitivo onde se aplica a brasagem, incluindo a indústria automobilística, há uma crescente demanda de esforços para substituir a Ag como elemento de liga em metais de adição.

O objetivo deste trabalho foi estudar materiais alternativos de brasagem para aço baixo carbono aplicados na produção de tubos e conexões óleo-hidráulicos automotivos, preferencialmente com metais de adição isentos de prata (Ag), que oneram significativamente o custo final da brasagem, especificamente os metais de adição das ligas da família X, comparado com ligas convencionais de referência à base de prata-cobre-zinco (Ag-Cu-Zn), pelos processos de brasagem por indução.

Metodologia

O presente trabalho foi planejado e desenvolvido em ambiente industrial visando desta forma a reprodução realística da brasagem por aquecimento indutivo convencional.

Buscou-se uma caracterização devidamente planejada que permitiu analisar a influência das variáveis de processo na qualidade da junta brasada obtida. Foram utilizados metal de adição sólido na forma de arame conformado em anéis, neste resumo chamado de X, combinados com 2 dois diferentes tipos de agentes fluxantes em pasta (A e B), que permitiram registrar valiosas informações, que resultaram na determinação da correta temperatura de brasagem e dos tipos e níveis de defeitos observados nas juntas obtidas em 3 diferentes experimentos realizados.

Resultados e Discussão

Foi verificado a ocorrência do fenômeno de molhabilidade do metal de adição X sem aplicação de agente fluxante em 6 amostras provadas. Foi observado a completa fusão do metal de adição em pequena porção de 5 gramas do metal de adição X sobre um tarugo cilíndrico rígido de aço baixo carbono de composição química e propriedades mecânicas similares aos metais base.

A parametrização do processo de indução foi realizada comparando os parâmetros tempo e potência para o metal de adição X em função dos 2 agentes fluxantes com os parâmetros do metal de adição de referência, BAg 34 + fluxo FH10. Como já era esperado, devido a diferença de 249°C da Tlíquidos entre as ligas X e BAg 34, o tempo de aquecimento indutivo total mais que dobrou. De maneira análoga, quanto a potência, também se observa significativa diferença para a potência de aquecimento, porém a potência de retenção do metal de adição BAg 34 é mesma para a combinação metal de adição X + fluxo A, potencialmente justificado pela similaridade de comportamento protetivos dos fluxos, mesmo com composição química e condições de aplicação diferentes.

No primeiro experimento 5 corpos de prova foram brasados em função dos agentes fluxantes A e B e submetidos a análise macrográfica. As amostras brasadas com o fluxo A apresentaram aprovação de 40%, enquanto corpos de provas brasados com o fluxo B apresentaram aprovação de 80%, sinalizando que este agente fluxante possui maior poder de proteção oxidante durante todo ciclo térmico de fusão, molhabilidade e capilaridade do metal de adição, haja vista que as amostras foram

produzidas em condições iguais alterando somente os parâmetros de brasagem aprovados para cada tipo de agente fluxante.

Uma constatação importante foi a falta de padrão da descontinuidade de enchimento, observando-se a presença de falhas de enchimento no início, meio e fim do comprimento de sobreposição, considerando o sentido de capilaridade a favor da gravidade indicado pela seta vertical. Em todas as amostras reprovadas para o fluxo A, constatou-se variação da folga da junta. A pressão capilar depende da folga, se esta variar pode-se gerar falhas de enchimento como as observadas. Observou-se surgimento de falhas a partir de 0,15 mm de folga. Falhas de grande extensão foram observadas com folgas acima de 0,19 mm. Uma hipótese para o fenômeno de variação da folga da junta sobreposta poderia ser justificada pela combinação de causas, seja na montagem do corpo de prova (alinhamento entre tubo e conexão) no dispositivo de fixação da máquina de indução seja pela potencial movimentação relativa provocada pela súbita dilatação entre os componentes durante o aquecimento indutivo devido ao grande aporte energético em curto intervalo de tempo, característica inerente ao processo de brasagem por indução. Outra importante constatação em amostras brasadas com fluxo A, foi a ocorrência de 80% de falhas de enchimento localizadas no final do comprimento da junta brasada, no plano de apoio do tubo na conexão. Este fenômeno pode estar associado ao aprisionamento de gases presentes na junta e/ou oriundos da evaporação do fluxo. A.

O segundo experimento foi realizado em seis corpos de prova, sendo as diferenças em relação ao experimento 1:

- aplicação exclusiva do agente fluxante A;
- redução em 4 mm do comprimento da junta de sobreposição;
- variação da folga da junta em 3 intervalos;
- alinhamento perpendicular entre tubo e conexão com dispositivo ótico.

Observou-se significativo resultado das amostras brasadas com folga de 0,09 mm, com média de apenas 3,26% de falhas sendo 2 amostras com zero falhas. As amostras brasadas com a menor folga (0,05 mm) obtiveram o pior resultado com 12,34% de falhas e uma amostra reprovada com 23,26% de falhas. A folga de 0,13 mm apresentou variação considerável avaliando os valores individuais de falhas por amostra, com 9,85% de falhas e apresentou reprovação em uma amostra com 20,32% de falhas.

Considerando que todos os corpos de prova do experimento 2 tiveram o alinhamento entre tubo e conexão garantidos por dispositivo ótico, é reforçada a hipótese de potencial movimentação relativa provocada pela súbita dilatação entre os componentes durante o aquecimento indutivo devido ao grande aporte energético em curto intervalo de tempo, característica inerente ao processo de brasagem por indução. Uma evidência que reforça a hipótese de ocorrência de desalinhamento dinâmico durante o ciclo térmico de aquecimento indutivo é a presença de maior quantidade de metal de adição depositado entre o plano de contato da conexão com a extremidade do tubo em um lado da junta em contraste com o lado oposto.

Comparando os experimentos 1 e 2 e considerado que o mesmo ciclo de aquecimento indutivo foi aplicado para ambos os experimentos, com metal base, metal de adição e agente fluxante iguais, pode-se atribuir a significativa diferença de reprovação do experimento 1 em comparação ao experimento 2, a redução do comprimento da junta de sobreposição somada a utilização de dispositivo ótico para alinhamento tubo-conexão na máquina de indução. A influência da variável folga da junta foi pormenorizada, em primeiro momento, pois a folga de junta de 0,09 mm para o

experimento 2 resultou em aprovação em todas as amostras ensaiadas, sendo este valor de folga muito próximo a 0,10 mm, folga de junta dimensionada para o experimento 1. Os 11% de amostras reprovadas no experimento 2 direcionou atenção ao fato que mesmo com comprimento de sobreposição de junta reduzido e principalmente a garantia de alinhamento por tecnologia óptico-digital houve significativas e preocupantes falhas de enchimento, principalmente pela extensão, que trazem risco a estanqueidade da junta brasada. A ocorrência do desalinhamento dinâmico é a provável causa das falhas relatadas, hipótese amplificada neste experimento 2 pois mesmo amostras em condições de alinhamento geométrico da junta (controlado individualmente para cada amostra realizada na pré-brasagem) repetiu-se o fenômeno de desalinhamento com consequente variação de folga.

Como forma de validar a potencial influência do desalinhamento dinâmico à qualidade da junta brasada, optou-se pelo planejamento de experimento 3 que reduziu o grau de liberdade (movimentação relativa) entre tubo e conexão utilizando uma prensa hidráulica específica para calibração de tubos. Optou-se por utilizar o corpo de prova e ciclo térmico de aquecimento indutivo planejados para o experimento 1 constituído pela combinação de metal de adição X + Fluxo A, comprimento de sobreposição de 14 mm e folga de junta de 0,10 mm, suportado pelas seguintes diretrizes:

- Aplicação do agente fluxante A com performance inferior ao B de forma a não influenciar na comparação com o experimento 2 ao qual sempre foi executado com o fluxo A;
- Comprimento de sobreposição de 14 mm e folga de junta sobreposta de 0,10 mm padrão original de dimensionamento pela SAE 520104 aplicados à união de tubos e conexões hidráulicas automotivas, mesma especificações utilizadas à brasagem com metal de adição da família da prata de referência neste trabalho (BAg 34);

A folga da junta sobreposta pós calibração foi controlada com calibre de folga obtendo-se uma média de 0,07 mm, ou seja, uma redução de 0,03 mm, 30% da folga nominal. Observou-se completa eliminação de grau de liberdade entre tubo e conexão, sendo mantida a folga de 0,07 mm uniformemente distribuída por todo perímetro circular de união tubo-conexão que forma a junta de sobreposição. Seis corpos de prova foram calibrados e submetidos a ciclo de aquecimento indutivo seguido de resfriamento. Exame macrográfico, foi realizado. Todas as amostras obtiveram aprovação, com média de falhas de enchimento de 1,76%. Pôde-se confirmar com este experimento que o fenômeno de deslocamento relativo entre tubo-conexão durante o ciclo de aquecimento indutivo contribuiu significante para variação da folga da junta sobreposta, intercorrendo em falhas de enchimento justificadas, sobretudo, pela variação da pressão capilar do metal de adição fundido. Outra importante constatação foi a ausência de falhas de enchimento no final do comprimento da junta, provocadas potencialmente pelo aprisionamento de gases presentes na junta e/ou oriundos da evaporação do fluxo. Infere-se que, mantida a folga da junta sobreposta uniforme durante todo o percurso do metal de adição fundido impulsionado por uma pressão capilar constante favoreceu a ação protetiva e desoxidante do agente fluxante A, com escape completo dos gases resultantes para fora da junta brasada.

Pode-se inferir, que o metal de adição X apresenta alta redução da pressão capilar e fluidez quando exposto a variações de folga de junta quando comparado a liga BAg 34. Comparando-se os resultados deste experimento com experimento 2, é possível indicar o intervalo de 0,05 a 0,09 mm como folga de junta de sobreposição recomendada a brasagem do metal de adição X, com eliminação de grau de liberdade tubo-conexão por calibração de folga de junta por prensa hidráulica.

Conclusão

O metal de adição X apresenta-se como potencial recurso para brasagem de tubos e conexões óleo-hidráulicas em aço baixo carbono, promovendo juntas brasadas de alta qualidade, trazendo como principal vantagem a potencial redução de custo de aproximadamente 44%, da liga de referência a base de prata em relação a liga do metal de adição selecionada. Como desvantagens destacam-se a necessidade de calibração entre tubo e conexão para retirado do grau de liberdade da folga da junta, a necessidade de maior tempo para ciclo de brasagem e maior tempos de limpeza para remoção de óxidos formados pela alta temperatura de indução.

Agradecimentos

Agradecemos a empresa parceira fabricante de tubos hidráulicos pelo profissionalismo dos colaboradores, pelos recursos industriais e laboratoriais disponibilizados. A professora Ivanilza Felizardo, pelo suporte metodológico, científico e motivacional dispensados para realização deste projeto.

Referências

AHN, B. B. Recent Advances in Brazing Fillers for Joining of Dissimilar Materials. **Metals**, Basel, 2021. Disponivel em https://doi.org/10.3390/met11071037

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Brazing filler metals. In Brazing Handbook**. 4™ Edition. Miami: AWS, 1991. p.43-66.

FERNANDES, A. A. **Módulo Brasagem Fundamento, Características, Aplicações e Segurança do Processo de União Intermetálica por Brasagem**. 4 ed. São Paulo: Infosolda, 2011.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

OKIMOTO, P. C. **Brasagem sem fluxo entre aço carbono e cobre com metais de adição convencionais à base de Ag e com revestimento metálico de Sn**. 1999. 192f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OKIMOTO, P. C.; BUSCHINELLI, A. L. A. Um Estudo da Brasagem Livre de Fluxo entre Cobre e Aço Carbono. In XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. **Anais ABS**, São Paulo, vol II, p.519-530. 1996.

ROBERTS, P. **Industrial brazing practice**. 2nd. Boca Raton: CRC Press; 2013.

WAY, M., WILLINGHAM, J., GOODALL, R., Brazing filler metals, **International Materials Reviews**,65:5, 257-285, Sheffield, 2020.

Balanceamento Dinâmico em Elementos de Máquinas Rotativos Através de Micro Esferas

Raphael Nogueira de Oliveira[1], Thiago Augusto de Araújo Moreira[1] (0009-0004-0553-5116), Gustavo Paulinelli Guimarães[3]

1 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

2 PROPEM, Escola de Minas de Ouro Preto - Minas Gerais

Resumo: O presente trabalho visa o balanceamento de um sistema mecânico rotativo naturalmente desbalanceado composto por um garfo que sustenta um pneu acoplado a uma roda girante através da utilização de micro esferas de vidro disponíveis comercialmente introduzidas nesse pneu. Espera se que essas micro esferas ao se acomodarem no interior do pneu compense o desbalanceamento natural desse sistema. Justifica se o trabalho devido a pouca literatura disponível sobre o assunto e a tentativa da comprovação de sua eficácia. Tudo isso visando a diminuição de falhas, desgaste dos elementos de máquinas rotativos e a interação do ser humano, pois o desconforto, stress e a fadiga causada pelas vibrações devem ser um fator de grande relevância na saúde ocupacional de quem está em contato direto no dia a dia com esses equipamentos. Esse trabalho contou com medições de amplitudes de vibrações no eixo de sustentação da roda realizadas através de acelerômetros e de medições de força do eixo de sustentação da roda realizadas sobre um par de células de carga localizadas uma em cada extremidade do eixo. Através destas medições foi possível verificar que a metodologia aplicada neste trabalho não foi capaz de comprovar a eficácia do balanceamento de um sistema roda pneu pela introdução de micro esferas de vidro dentro do pneu, visto que as vibrações observadas no sistema balanceado pelas esferas de vidro encontraram-se bem maiores em comparação com o mesmo sistema balanceado pela forma tradicional através da instalação de chumbo na roda.

Palavra-chave: Vibrações, Balanceamento, Roda, Pneu, Elementos de maquinas rotativos.

Introdução

Os Atualmente os estudos sobre vibrações envolvem a área da engenharia e suas aplicações em projetos de motores, fundações, sistemas rotativos como turbinas, estruturas e a forma como as vibrações as afetam no sentido de crescimento de falhas através do desbalanceamento, gerando fadiga nos equipamentos, desgaste em rolamentos, eixos, mancais, engrenagens e suas fixações. Também servindo como exemplo, acabamentos de peças usinadas são severamente afetados por vibrações em suas máquinas operatrizes (RAO, 2008). Os problemas de falhas já citadas e o desconforto daquele que utiliza um equipamento ou dispositivo roto translacional desbalanceado é também uma preocupação inerente ao ramo do estudo das vibrações diretamente ligado a saúde ocupacional, visto o incomodo ergonômico causado por um sistema desbalanceado. Esse incômodo pode ser amplificado quando a frequência natural do equipamento é coincidente com a frequência

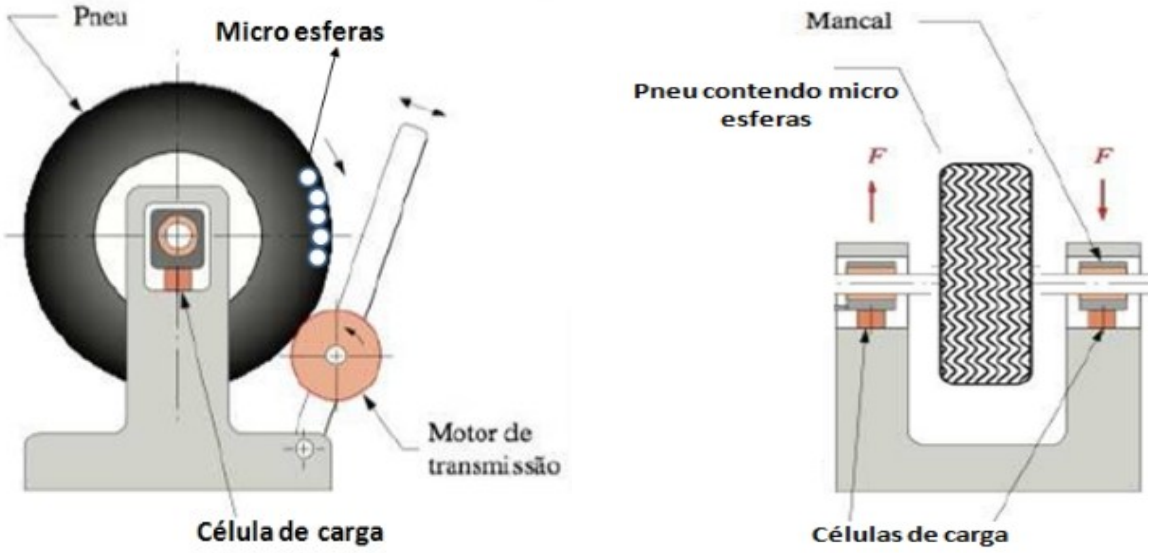
natural de partes do corpo do usuário ocorrendo a chamada ressonância, trazendo malefícios relacionados à saúde, segurança e consequentemente a imagem comercial/econômica do equipamento em questão (RAO, 2008; SOEIRO, 2011). A finalidade do estudo é eliminar ou diminuir os desgastes e consequentemente aumentar a vida útil do equipamento e o conforto do usuário em contato com um sistema rotativo, composto por roda pneu balanceamento através da introdução de micro esferas no interior deste pneu. Baseado nesse contexto e pela falta de referências bibliográficas sobre o assunto tem-se a seguinte problemática:

Como balancear um conjunto roda pneu através da introdução de micro esferas de vidro disponíveis comercialmente no interior deste pneu?

Metodologia

O modelo para a realização dos trabalhos experimentais foi inspirado nas figuras 1 (a) e 1 (b) que demonstram o croqui da montagem do mecanismo para a realização do balanceamento.

Figura 1 (a) e 1 (b): Vistas em perfil e frontal da montagem experimental.



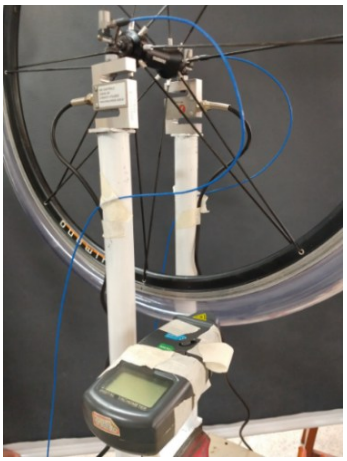
(a) (b)

Fonte: Adaptado de Norton, 2011.

Deste modo o modelo foi construído no *Lab. de acústica, vibrações e sistemas inteligentes (L'AViSI) da Escola de Minas de Ouro Preto* e é representado pelas figuras 2 (a) e 2 (b)

Figura 2 (a) e 2 (b): Montagem do experimento

(a)



(b)

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Nas figuras 2 (a) e 2 (b) é possível observar os componentes utilizados para o experimento como o garfo de sustentação do conjunto roda pneu, células de carga localizadas sob os mancais de sustentação da roda, arduíno interligado a um computador responsável pela transmissão dos sinais advindos das células de carga, acelerômetros localizados sobre o eixo da roda, tacômetro responsável pela medição da velocidade do conjunto roda pneu sem contato direto com a roda feito por meio de um feixe de luz infravermelha, conjunto roda pneu, sendo utilizado primeiramente uma mangueira de cristal de 1 ½", afim de se fazer a observação do comportamento das micro esferas no interior deste "pneu"; posteriormente foram feitos os mesmos ensaios num pneu verdadeiro.

Antes de iniciar as medições, foi necessário a realização do balanceamento do sistema roda pneu, esse balanceamento consiste em instalar uma plaquinha de chumbo em um ponto no aro da roda variando sua posição e massas, de forma que essa plaquinha de chumbo ao se girar a roda várias vezes pare em posições mais aleatórias possíveis depois de cada giro, essa aleatoriedade na posição de parada da plaquinha de chumbo é a garantia do sistema estar balanceado.

As medições foram feitas com o sistema roda pneu **verdadeiro** nas seguintes **condições:**

1. Primeira medição: código (PBC 43g) pneu balanceado por chumbo (massa de 43g) instalado na parte interna e centralizada do aro, sem introdução de esferas neste, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
2. Segunda medição: código (PDV) pneu desbalanceado natural vazio, sem adição de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
3. Terceira medição: código (PDE 20g) pneu desbalanceado com introdução de 20g de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
4. Quarta medição: código (PDE 43g) pneu desbalanceado com introdução de 43g de esferas. (Massa equivalente ao balanceamento por chumbo), com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;

5. Quinta medição: código (PDE 65g) pneu desbalanceado com introdução de 65g de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
6. Sexta medição: código (PDE 85g) pneu desbalanceado com introdução de 85g de esferas, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM.

As medições foram feitas com o sistema roda **mangueira** nas seguintes **condições**:

1. Primeira medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, sem introdução de esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250, 200 RPM;
2. Segunda medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, e adicionada uma massa desbalanceadora conhecida por chumbo instalado na parte interna e centralizada do aro, igual a 15g com introdução de 5g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
3. Terceira medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, e adicionada uma massa desbalanceadora conhecida por chumbo instalado na parte interna e centralizada do aro, igual a 15g com introdução de 10g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
4. Quarta medição: com o sistema balanceado por chumbo (massa de 27g) instalado na parte interna e centralizada do aro, e adicionada uma massa desbalanceadora conhecida por chumbo instalado na parte interna e centralizada do aro, igual a 15g com introdução de 20g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
5. Quinta medição: pneu sem adição de esferas, massa balanceadora e desbalanceadora, ou seja, sistema como desbalanceamento natural, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
6. Sexta medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 10g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
7. Sétima medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 20g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
8. Oitava medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 27g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM. (Massa igual a massa de chumbo capaz de balancear o sistema realizado na primeira medição);
9. Nona medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 35g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM;
10. Décima medição: com o sistema desbalanceado natural com introdução de 45g esferas no pneu, com medições tomadas nas velocidades de 300, 250 e 200 RPM.

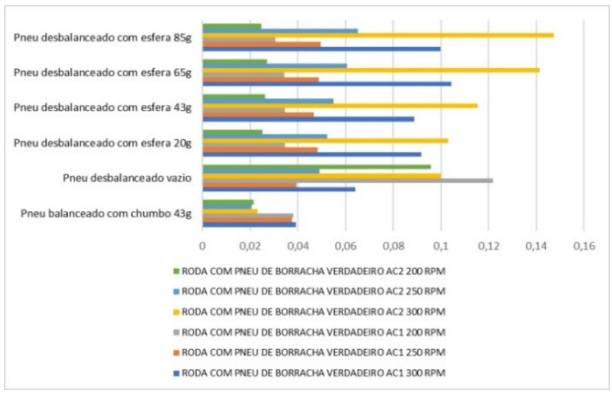
As Célula de carga utilizadas foram da marca MK controle, modelo CSL/ZL-50, capacidade para 50 Kg, erro Combinado: ± 0,03% FS. Os acelerômetros utilizados foram do modelo 352C33 da PCB Piezotronics INC, que apresentam uma sensibilidade de (±5%)100 mV g com faixa de frequência de (±5%) 2 a 10000 Hz.

As amostras dos acelerômetros em cada uma das condições que são demonstrados nos resultados, foram obtidos através do RMS *Root Means Square*, (do inglês; Valor Quadrático Médio). O RMS fornece uma indicação da intensidade global da vibração, levando em consideração a

amplitude e a frequência de todos os componentes presentes no sinal vibratório e consiste em extrair a raiz quadrada da média aritmética elevada ao quadrado de todas as amostras de aceleração, os gráficos comparativos estão em forma de barras, pois apresentavam valores seguindo uma distribuição normal. Foi observado uma grande dispersão nos valores das amostras realizadas através das células de carga, sendo assim, foi aplicado um teste de *Kolmogorov – Smirnov* nestas amostras de forma a se verificar a existência de uma distribuição normal em seus valores, o que não foi constatado, portanto, de forma a diminuir as incertezas o comparativo entre as medições é demonstrado através de um gráfico de caixa, que após plotado é possível observar uma boa precisão nas medições, porém uma boa exatidão não pode ser afirmada. Para a tomada das FFT's, *Fast Fourier Transform* (do inglês; transformada rápida de Fourier), que são responsáveis por transformar as amostras que estavam no domínio do tempo para o domínio da frequência, foram retiradas 3300 amostras de aceleração em cada medição, de forma a minimizar ao máximo a incerteza.

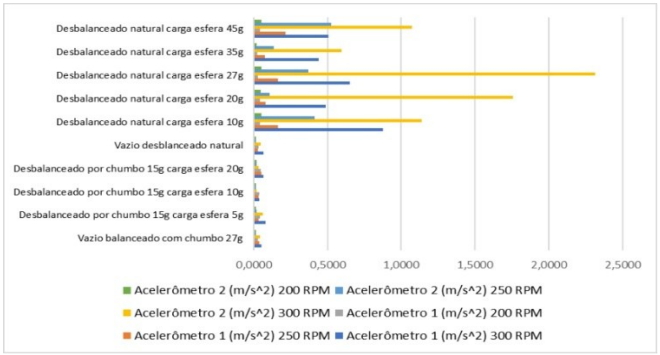
Resultados

Figura 3: Resultados obtidos através dos valores de RMS *Root Means Square*, (do inglês; Valor Quadrático Médio) nos acelerômetros 1 e 2 em seis diferentes condições para pneu de borracha.



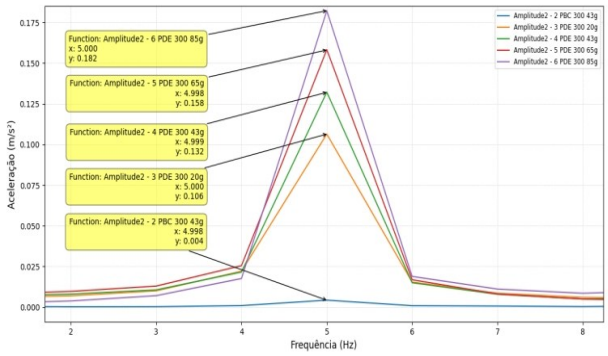
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Figura 4: Resultados obtidos através dos valores de RMS *Root Means Square*, (do inglês; Valor Quadrático Médio) nos acelerômetros 1 e 2 em dez condições para pneu de mangueira.



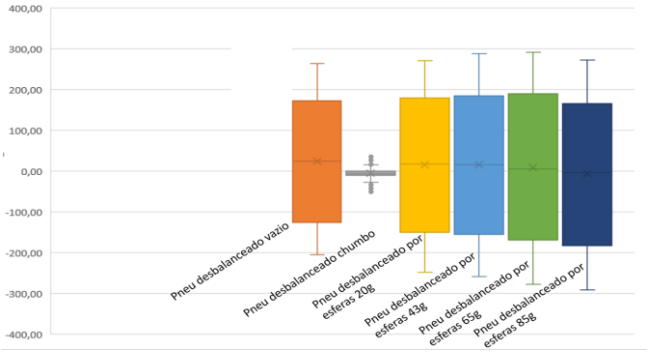
Fonte: Pesquisa direta (2024).

Figura 5: Gráfico comparativo entre as condições PBC 43g x PDE 20, 43, 65 e 85g em uma mesma rotação, obtidos através de FFT's (do inglês: transformada de Fourier) pelos acelerômetros para pneu de borracha.



Fonte: Pesquisa direta (2024)

Figura 6: Comparativo entre seis diferentes condições de balanceamento obtidos através da célula de carga dados em gramas para pneu de borracha.



Fonte; Pesquisa direta (2024).

Discussão

A partir do estudo em questão tem-se que, foi possível através de cada condição estudada, sendo elas: acelerações em RMS (figuras 3, 4); amplitudes das acelerações (figura 5) e pelos valores de força obtidos através das células de carga, (figura 6) fazer um comparativo entre o balanceamento de pneu através da instalação de chumbo e o balanceamento de pneu através da introdução de micro esferas de vidro comercialmente vendidas no interior desse pneu.

Conclusão

Não foi possível afirmar que, a introdução de microesferas de vidro no interior do pneu seja eficiente para realizar o balanceamento de um conjunto roda pneu.

Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas **(ABNT). ISO 2631-1:1997**. Vibrações mecânicas e choque - Avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

Balachandran, B., & Magrab, E. B. (2011). **Vibrações** (2ª ed.). Cengage Learning. ISBN-13: 978-0-534-55206-0. ISBN-10: 0-534-55206-4, 2011.

Cutnell; Kenneth W. Johnson; **Física** tradução André Soares de Azevedo, José Paulo Soares de Azevedo. - 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

Gil, Antônio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. Disponível em: Minha Biblioteca, (7th edição). Grupo GEN, 2022.

Halliday, David, et al. **Fundamentos de Física - Mecânica** - Volume 1. Disponível em: Minha Biblioteca, (12th edição). Grupo GEN, 2022.

Junior, José S. **Introdução às vibrações mecânicas**. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Blucher, 2006.

Lakatos, Eva M. **Técnicas de Pesquisa**. Disponível em: Minha Biblioteca, (9th edição). Grupo GEN, 2021.

Minayo, M. C. de S. **Pesquisa Social: Teoria, Método e Criatividade**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2003.

Nascimento, Luiz Paulo D. **Elaboração de projetos de pesquisa**: Monografia, dissertação, tese e estudo de caso, com base em metodologia científica. Disponível em: Minha Biblioteca, Cengage Learning Brasil, 2012.

Norton, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos.** McGraw Hill Brasil, 2010.

Rao, Singiresu S. **Vibrações mecânicas.** Revisão técnica de José Juliano de Lima Junior. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

Serway, Raymond, A. e John W. Jewett Jr. **Princípios de Física** vol. 1. Disponível em: Minha Biblioteca, Cengage Learning Brasil, 2014.

Soeiro, N. S.; Melo, G. S. V.; Ohana, G. J. Vibrações e o Corpo Humano: uma avaliação ocupacional, **Acústica e vibrações**, Revista da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC ISSN 1983-442X, Santa Maria, RS, no. 43, p. 53-62, dezembro 2011.

Previsão de falhas em Mancais de Rolamento Utilizando Aprendizado de Máquina por Meio de Redes Neurais Artificiais: módulo de um gêmeo digital

Paulo Brandão Júnior[1] (https://orcid.org/0000-0003-0578-5970), Yukio Shigaki[1] (https://orcid.org/0000-0003-0962-3573)

1 Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG.

Resumo: Este trabalho teve como objetivo solucionar o problema da falha prematura dos mancais de rolamento em um redutor de laminador de barras na siderúrgica Gerdau – Usina Barão de Cocais, utilizando técnicas de aprendizado de máquina. O foco foi a construção de um modelo de classificação utilizando redes neurais artificiais (RNA) para predizer falhas no sistema de rolamento, baseado na análise da corrente do motor. O modelo construído apresentou acurácia de 99%, além de níveis de sensibilidade de 0,9871 e especificidade de 0,9942, o que demonstra sua eficácia em identificar anormalidades nas informações. Além disso, o estudo introduziu o conceito de gêmeo digital, propondo sua aplicação futura como ferramenta de monitoramento proativo, permitindo simulação e análise em tempo real. A segunda etapa do estudo utilizou uma nova base de dados que reforçou a hipótese de que falhas nos rolamentos aumentam o torque e, consequentemente, a corrente do motor. O modelo se mostrou eficaz em identificar esse padrão, sendo uma ferramenta eficaz para a manutenção preditiva e a programação de paradas preventivas.

Palavras-chave: Aprendizado de máquina; Eficiência Operacional; Gêmeo digital; Kmeans; RNA.

Introdução:

Produtos laminados possuem grande impacto nos mercados global e brasileiro. Em 2022, o Brasil ocupou a 10ª posição em exportação, com produção de 23,4 milhões de toneladas, das quais 9,8 milhões foram de laminados longos (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2023; INSTITUTO AÇO BRASIL, 2023). A laminação é o processo de conformação mecânica mais utilizado, devido à sua alta capacidade produtiva e controle dimensional. Contudo, os rolamentos, componentes essenciais nesse processo, são também a principal fonte de falhas em máquinas rotativas, podendo indicar anomalias por meio de variações detectáveis por tecnologias preditivas (CERRADA et al., 2018).

A Indústria 4.0 trouxe inovações como IoT, computação em nuvem, inteligência artificial e análise de dados, conectando sistemas fabris e otimizando processos. Essa revolução tecnológica possibilita maior eficiência, manutenção preditiva e redução de custos operacionais, elementos fundamentais para evitar paradas inesperadas em linhas de produção (IBM, 2023; SILVESTRI et al., 2020).

Entre essas inovações, o gêmeo digital (GD) se destaca como uma solução modular e eficiente, capaz de simular sistemas físicos a partir de dados reais, proporcionando controle operacional aprimorado e suporte à manutenção de componentes críticos, como os rolamentos (AIVALIOTIS et al., 2019).

Este trabalho desenvolveu um módulo de GD para laminadores, com foco na análise de dados e no uso de aprendizado de máquina para predição de falhas em rolamentos. Essa abordagem contribui para maior controle operacional, redução de custos e maior confiabilidade no processo de laminação.

Metodologia:

Este trabalho foi desenvolvido junto à siderúrgica Gerdau – Usina Barão de Cocais com o objetivo de sanar um problema referente à falha prematura dos mancais de rolamento de um redutor que compõe um laminador acabador de barras, de um processo de laminação a quente, por intermédio do uso de aprendizado de máquina. Para o desenvolvimento do modelo de aprendizagem foi utilizado o software R, versão 4.4.1 e bibliotecas padrões, assim como as bibliotecas cluster, fpc, factorextra, keras e tensorflow.

O fluxograma da metodologia aplicada está apresentado na Figura 6. Inicialmente os dados de produção foram coletados por meio do software de controle utilizado pela Gerdau BC, denominado *Iba Analyzer*. Um documento que continha os dados de toda a cadeia produtiva foi disponibilizado pela Gerdau, e foi necessário a seleção das informações que correspondiam apenas ao laminador acabador de barras estudado. Os dados foram extraídos no formato txt e devidamente estruturados, como um banco de dados, por meio da utilização do software Excel 2016.

Em seguida a base de dados estruturada foi submetida ao processo de pré-processamento, ao qual valores vazios foram substituídos com a média dos valores dos atributos correspondentes e dados discrepantes foram desprezados para que a análise não apresentasse inconsistência. Esses dados discrepantes foram identificados por meio de variações abruptas nos atributos, correspondendo a informações que possuíam desvio padrão elevado, em relação aos demais dados. Isso ocorreu porque o laminador em alguns momentos estava laminando algum material e em outros momentos não. Devido ao fato, do processo de laminação ser complexo e envolver muitas variáveis, os dados utilizados para construção desse trabalho se referem apenas aos momentos em que o laminador estava funcionando sem carga, ou seja, estava “girando em vazio”.

Após o pré-processamento, a primeira base de dados foi agrupada, utilizando o algoritmo Kmeans, com o propósito de entender os padrões dos dados e estipular preditores que foram utilizados como classificadores na etapa posterior, em que foi construído um modelo de classificação por meio de RNA. Esse modelo de classificação foi submetido a grupos de testes, em que alguns de seus parâmetros foram alterados, com o propósito de se obter um modelo com elevado nível de acurácia.

Após essa etapa, foi coletado uma segunda base de dados, seguindo o mesmo processo de coleta e pré-processamento da primeira base. Esta segunda base de dados, diferente da primeira, correspondia a um período de produção que antecedeu a falha prematura dos rolamentos.

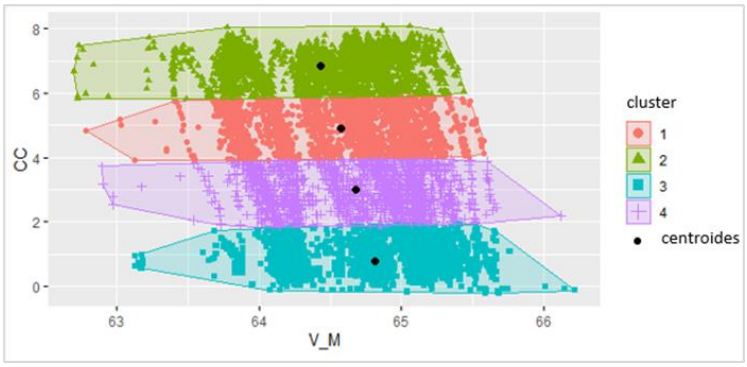
A segunda base de dados foi classificada utilizando o modelo treinado e testado na primeira base. É importante ressaltar que o modelo RNA não foi treinado novamente na segunda base de dados, esse processo se restringiu apenas a primeira base.

Por fim, as informações da classificação foram discutidas e analisadas, com o propósito de identificar se a corrente do motor, que é o atributo de enfoque, pode ser um preditor de falhas para o sistema de rolamento que compunha o redutor do laminador acabador de barras.

Resultados e Discussão:

Em relação ao agrupamento dos dados utilizando Kmeans e o método Hartigan Wong, que está representado na Figura 1, é interessante observar que os patamares, em que os grupos se mantiveram em relação a variável corrente, ficaram bem definidos.

Figura 1 - Agrupamento utilizando Kmeans e o método Hartigan Wong.

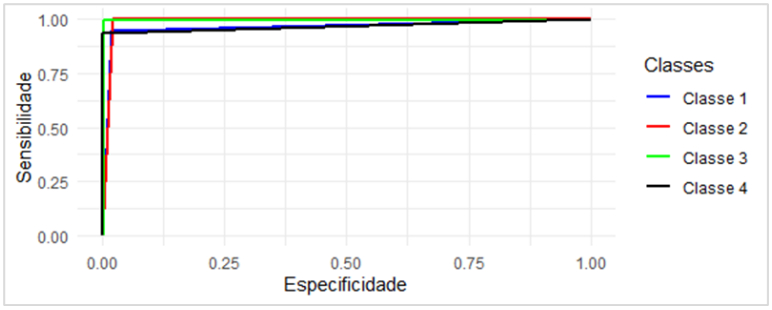


Fonte: (Elaborada pelo autor).

O estudo avaliou diferentes abordagens para otimizar o desempenho de redes neurais artificiais por meio de quatro grupos de testes. No primeiro grupo, ao variar as funções de ativação *softmax* e *sigmoid* na camada de saída, observou-se que, apesar de a *softmax* apresentar melhor desempenho inicial, a *sigmoid* equiparou os níveis de acurácia a partir da décima época e manteve resultados estáveis, sendo escolhida para os testes subsequentes devido à sua superioridade nos testes finais. No segundo grupo, que analisou variações no número de neurônios na camada oculta, modelos com dois e seis neurônios apresentaram curvas de aprendizado similares, enquanto o modelo com oito neurônios obteve o melhor desempenho entre as épocas 20 e 60, até a estabilização geral das curvas. O terceiro grupo comparou métricas de perda (categorical-crossentropy e sparse-categorical-crossentropy), revelando superioridade da primeira até a época 35, com estabilização posterior. Por fim, o quarto grupo testou as funções de otimização Adam e RMSprop, destacando a superioridade da Adam entre as épocas 10 e 70, seguida de equiparação e estabilização entre os modelos.

Após a seleção dos parâmetros, o modelo de classificação por RNA foi configurado com duas camadas de neurônios: uma camada oculta com oito neurônios utilizando a função de ativação *ReLU* e uma camada de saída com cinco neurônios e função de ativação *sigmoid*. A *categorical-crossentropy* foi definida como a função de custo, enquanto o otimizador escolhido foi o algoritmo *Adam*, com a acurácia como métrica de desempenho, alcançando um nível de 0,99 nos testes. As curvas ROC por classe, apresentadas na Figura 2, mostram um comportamento consistente, com alta sensibilidade e especificidade para todas as classes, evidenciado pela elevação rápida no eixo vertical próximo a 1, minimizando falsos positivos. A superposição das curvas sugere desempenho equilibrado entre as classes, sem discrepâncias significativas entre elas.

Figura 2 - Curva ROC por classe.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

Outra métrica de desempenho avaliada foi a matriz de confusão, Quadro 1, que apresenta os níveis de acertos nas classificações, assim como a quantidade de classificações equivocadas. Pode ser observado que houve, aproximadamente, 99% de acertos subdivididos em 24,33% para as classificações dos verdadeiros positivos, quando a classe real foi classificada corretamente e 74,33% para as classificações dos falsos positivos, quando as classes que não deveriam ser classificadas não foram classificadas. Os erros de classificação, de modo geral, foram de 1,34%.

Quadro 1 - Matriz de confusão.

	Referências	
Predição	0	1
0	74,33%	0,67%
1	0,67%	24,33%

Conclusão:

O trabalho explorou conceitos sobre laminação, tecnologias da Indústria 4.0, e a aplicação de gêmeos digitais para manutenção industrial, integrando aprendizado de máquina para predizer falhas no sistema de rolamento de redutores em laminadores. Foi desenvolvido um módulo do gêmeo digital para análise de dados, utilizando redes neurais artificiais (RNA), que alcançou acurácia de 99% e altos níveis de sensibilidade (0,9871) e especificidade (0,9942) ao identificar anomalias na corrente do motor do redutor. O modelo foi testado em uma segunda base de dados, representando o período anterior à falha, confirmando a hipótese de que falhas aumentam o torque e a corrente do motor, com destaque para a classe 2, que indica maiores módulos de corrente. Embora o modelo não identifique o tipo de falha, ele aponta anormalidades, permitindo a programação de manutenções preventivas com maior confiabilidade em relação ao simples monitoramento da corrente. A análise destacou a eficácia do aprendizado de máquina em capturar padrões complexos, com o modelo de RNA se mostrando uma ferramenta robusta para predição de anomalias relacionadas a falhas nos rolamentos. Pesquisas futuras podem otimizar hiperparâmetros, incluir novas variáveis e explorar técnicas adicionais para aprimorar a precisão do sistema.

Referências:

AIVALIOTIS, P.; GEORGOULIAS, K.; CHRYSSOLOURIS, G. **The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing**. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. [S.I.], v. 32, p. 1067-1080, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686173. Acesso em: 30 jun. 2022.

CERRADA, M.; SÁNCHEZ, R. V.; LI, C.; PACHECO, F.; CABRERA, D.; VALENTE DE OLIVEIRA, J.; VÁSQUEZ, R. E. **A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings**. Mechanical Systems and Signal Processing. [S.I.], v. 99, p. 169-196, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.012. Acesso em: 30 jun. 2022.

IBM. **O que é uma rede neural?** (2024). Disponível em: https://www.ibm.com/br-pt/topics/neural-networks. Acesso em: 29 jun. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IAB. **Anuário Estatístico**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2023. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2023/07/AcoBrasil_Anuario_2023.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

SILVESTRI, L.; FORCINA, A.; INTRONA, V.; SANTOLAMAZZA, A.; CESAROTTI, V. **Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review**. Computers in Industry. [S.I.], v. 123, p. 1-16, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335. Acesso em: 05 jul. 2022.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2023**. [S.I.], 2023. Disponível em: https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2023/. Acesso em: 10 jun. 2024.

Eficiência de Molde Polimérico Formado por Manufatura Aditiva Tipo DLP para Injeção de Termoplásticos

Eduardo Cassiano Santos David[1] (0009-0005-3947-6633), Artur Caron Mottin[1] (0000-0001-6793-9926)

1 Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Resumo: A crescente demanda por lançamentos rápidos de produtos impulsionou a evolução do desenvolvimento de produtos, integrando tecnologias CAD/CAM/CNC e a manufatura aditiva (impressão 3D). O CAD evoluiu de simples reprodução de desenhos para criação de modelos 3D realistas, permitindo simulações e análises complexas, enquanto o CAM e CNC automatizaram a manufatura. A impressão 3D revolucionou a criação de geometrias complexas, embora ainda não seja ideal para produção em massa. A injeção de termoplásticos permanece dominante em alta escala de produção, sendo que a fabricação dos moldes metálicos representa o maior custo financeiro e o maior custo logístico. Este estudo propõe a substituição desses moldes metálicos por moldes poliméricos impressos em 3D tipo DLP (*Digital Light Processing*) com resinas fotossensíveis. A pesquisa determinará parâmetros ótimos de impressão dos moldes e injeção das peças, visando a viabilidade técnica desta abordagem para produção de pequenos lotes, peças descontinuadas, equipamentos obsoletos e peças especiais. A solução técnica permitirá a redução de tempo e consequente custo, simplificação logística e maior sustentabilidade, especialmente com o uso de termoplásticos bio baseados e de alta biodegradabilidade com colorante natural, urucum. A viabilidade desta abordagem representa ganhos significativos na agilidade de disponibilidade de novos produtos, na redução dos impactos ambientais da produção e na viabilidade de novos projetos.

Palavras-chave: poli (ácido lático) PLA, *Rapid Tooling, Digital Ligth Processing*, Plástico de engenharia.

Introdução

Os processos de fabricação não evoluem na mesma velocidade em que novos produtos são idealizados. Existe uma distância temporal entre produtos desruptivos e processos de fabricação para sua implantação. Há de se pensar em processos de fabricação desruptivos que acompanhem as novas tecnologias de produtos, o que envolve não só o processo em si, como novos materiais e novos processos. Não há como mudar a sequência natural do desenvolvimento, que envolve a criação do produto e em seguida sua industrialização. O lapso temporal existirá. A evolução da cadeia do processo e suas variações, com o fluxo de informações, é que determinarão esse lapso [1]. O tempo é um fator fundamental na atividade econômica de qualquer setor e qualquer etapa que seja reduzida, aprimorada ou removida no processo, traz vantagens econômicas à sociedade e de consequência ao bem estar humano [2].

Neste sentido, o desenvolvimento de produtos plásticos tem se mostrado mais descentralizados e competitivos em relação a outros materiais e processos, principalmente quando combinado ao seu principal processo de produção, a injeção. Em 1839 o poliestireno foi sintetizado acidentalmente por um apotecário, sem saber do potencial de sua descoberta. Após alguns anos de reprodução do experimento em variadas condições descobriu-se o processo de polimerização que começou a ser explorado comercialmente em 1931 pela empresa I. G. Farben. Nesse meio tempo, outros polímeros foram descobertos e usados para fins diversos. Foram praticamente 100 anos para se viabilizar o material, sua industrialização e suas aplicações. Nos 50 anos seguintes, o mundo estava tomado pelos plásticos que substituíram metais e madeira na produção de artefatos diversos, estimulados pela indústria bélica. Em 1872, um injetor de plástico foi concebido por J. W. Hyatt, mas só após a segunda guerra mundial, nos anos 40, o processo de injeção de plástico ganhou força já com características modernas, devido à busca de materiais mais baratos e processos de produção em massa, superando outros processos como a fundição de metais, estampagem, usinagem ou extrusão. O processo de injeção também é mais eficiente do ponto de vista energético, pois o material fundido pode ser obtido a partir de 100°C.

De 1950 até 2017 9,2 bilhões de toneladas de plásticos foram produzidos [3]. O processo de injeção tradicional traz as mesmas filosofias de processos antigos como a fundição, que requerem modelos, moldes, machos, casa de machos e materiais específicos, com suas peculiaridades. Há basicamente a troca do material fundido, especificidades da formação do produto final e dos equipamentos utilizados para tal. O principal componente do processo de formação de peças poliméricas por injeção é o molde, seja por sua complexidade ou pela íntima relação com as características do produto final. Moldes de injeção de polímeros são capazes de gerar componentes com estreita tolerância e geometrias complexas mantendo a alta capacidade de produção em massa. Os moldes são complexos conjuntos de peças em movimento e sujeitas a altas tensões e temperatura de trabalho. Assim sendo, quanto maior a complexidade do molde maior será seu custo e o seu tempo de disponibilidade para entrar em produção. Moldes metálicos requerem ainda, materiais nobres, que normalmente são aços ligados de alta resistência e dureza, para garantir longa vida da ferramenta de injeção. Estes aços são difíceis de usinar pelo tradicional método subtrativo. Requerem posteriormente mais etapas na sua produção, em parte ou na íntegra, como *try out* de injeção, ajustes de geometria, tratamento superficial de carbo-nitretação, tratamento térmico e acabamento superficial.

Associados a toda essa complexidade há também o impacto ambiental como, rejeito de areia de fundição, uso de carvão, emissão de particulados na atmosfera, mineração de metais e excesso de material requerido para se chegar à forma final desejada de moldes, sejam eles fundidos ou gerados a partir de extrudados ou laminados. Por este impacto ambiental, cita-se o evento denominado "*The Great Smog*", um nevoeiro tóxico com muito particulados, tendo origem nas fábricas altamente dependentes de carvão, que cobriu Londres por cinco dias seguidos em 1952 [4]. O principal processo de fabricação era a fundição, processo ainda muito utilizado para produção de grandes moldes de injeção. O período em questão da tragédia ambiental coincide com o final da segunda revolução industrial e final da segunda guerra mundial.

A utilização de plásticos também tem implicações ambientais, porém numa escala própria. Normalmente, os plásticos são rejeitos do processo de extração de petróleo. O volume de material injetado é bem superior ao volume dispendido na produção do molde, sendo o impacto ambiental do material injetado superior. Mesmo com uma taxa substancialmente alta de reciclagem de polímeros, sua separação é deficiente, misturando tipos diferentes de polímeros, alterando as propriedades conhecidas. Seria necessária uma caracterização individual para cada lote de reciclados para se chegar a um produto de boa qualidade e adequá-lo a uma aplicação. Esse processo de reuso de polímeros reciclados se mostra inviável para peças ligadas à alimentação

humana, como armazenamento de comida, e relacionados com peças destinadas ao tratamento médico, que requerem assepsia ou tecnologia de reciclagem física ou química com alta eficiência de descontaminação [5]. É conveniente o uso de polímero biodegradáveis de origem sustentável para reduzir o impacto ambiental e garantir uma fonte limpa de material primário.

Com subterfúgio de reduzir tempo e custos de produção, a indústria já pratica largamente a fase prototipagem de peças parcialmente funcionais, seja para modelos ou para moldes, através de processos de manufatura aditiva em impressão tridimensional, que se popularizaram com o avanço da microeletrônica e os comandos numéricos computacionais. A descentralização da tecnologia alcançou a individualização [6], na qual qualquer pessoa pode produzir artefatos plásticos em casa para os mais diversos fins. A manufatura aditiva passou a ocupar espaço significativo nesta fase, produzindo peças em escalas maiores e funcionais, usadas em pré-montagens para detecção de interferências dinâmicas, por exemplo. Com a evolução da prática da impressão 3D e dos materiais, peças totalmente funcionais passaram a fazer parte não só da fase de protótipos como de fase de testes físicos. Em casos específicos, podem-se produzir peças para uso final.

A manufatura aditiva não é totalmente capaz em volume produtivo na maior parte dos casos. No entanto, alguns produtos não necessitam mais do que uma centena de unidades anuais, estreitando a aplicação do processo de manufatura aditiva por impressão 3D a uma escala viável.

Existe a possibilidade de se associar as vantagens da impressão 3D com os ciclos rápidos do processo de injeção, a partir dos moldes. Um molde de injeção polimérico formado a partir de impressão 3D. A proposta desta pesquisa, baseada nesta modificação de moldes, vem de encontro com a demanda por lotes de baixa produção. O uso da tecnologia de impressão 3D para pequenas empresas, empresas de tecnologia, peças descontinuadas, peças de equipamentos obsoletos com vida útil remanescente, além de produtos com previsão de lotes pequenos, da ordem de algumas centenas se torna um diferencial competitivo e de viabilidade de produtos com *payback* negativo. O baixo volume de produção permite que os moldes sejam confeccionados em materiais menos nobres, sendo um ponto de transformação desruptiva no processo de injeção. Ferramentas de injeção de material polimérico para injeção de termoplásticos representam um ganho potencial factível para pequenos lotes de produção, sendo denominadas como *Rapid Tooling*.

Esta pesquisa se limita ao estudo de moldes pequenos, geometrias de baixa complexidade, com volume máximo de injeção de 20 gramas, moldes em medidas máximas de 280 x 150 mm da placa porta molde e altura máxima de extração da peça de 75 mm. A peça injetada será um corpo de prova padrão da ASTM D638 [7] e ASTM D790 [8].

Propõem-se, desta maneira, a utilização de moldes de injeção produzidos com material polimérico a partir de processos de manufatura aditiva tipo DLP para injeção de outro polímero. A partir desta proposição, qual será a vida de um molde polimérico e como o processo de impressão 3D pode aprimorar a criação de moldes de injeção? As características qualitativas da peça se manterão equivalentes quando comparadas às peças injetadas em moldes metálicos?

Esta pesquisa objetiva a criação de moldes de injeção de baixo custo e rápida produção, formados por polímeros através do processo de impressão 3D tipo DLP para uso em injetoras convencionais e injeção de polímeros.

Especificamente a pesquisa objetiva definir parâmetros de impressão do 3D para resinas dos moldes e parâmetros de injeção para moldes metálicos e poliméricos, maximizando a vida do

molde. Apontar as diferenças entre peças formadas a partir de cada tecnologia de molde. Verificar a influência de diferentes materiais injetados nas ferramentas. Influencia da adição do *masterbatch* de urucum nas amostras injetadas.

Metodologia

O material fundido selecionado para injeção é o PLA poli (ácido lático). Como características vantajosas sobre outros polímeros, o PLA é considerado o mais promissor dos polímeros biodegradáveis, inclusive para composição de matriz para materiais compostos. Apresenta um melhor acabamento superficial de alto brilho, boa usinabilidade, alta disponibilidade, conhecidas características para o processo de injeção, material de fontes renováveis, propriedades antibacterianas, translucides e temperatura de fusão mais baixa [9]. Estas duas últimas características reforçando o apelo sustentável do ponto de vista energético. Ainda no apelo ecológico, se trata de um termoplástico bio-baseado e biodegradável [10] derivado de um ácido orgânico de origem biológica como, da cana de açúcar, amido de milho, trigo ou leite.

Adicionalmente, será injetado o PLA aditivado com *masterbatch* rico em urucum (*Bixa orellana L.*), PLA-U, colorante obtido pelo processo de agitação mecânica imerso em etanol e gerando um pó de alta concentração. Este material foi desenvolvido por [11] juntando o pigmento natural do Urucum ao poli(etileno glicol) – PEG-U, na proporção de 25% de colorante e 75% de PEG. Na tese, foram estudas composições que variaram de 1%, 5% e 10% em na forma de *masterbatch* para conferir cor ao PLA. Nesta pesquisa, apenas a mistura de maior concentração, 10% de *masterbatch*, será utilizada. Ainda que o PLA seja biodegradável, sua disponibilidade no mercado ocorre em várias cores, com o uso de colorantes químicos não biodegradáveis. Desta maneira, o *masterbatch* de Urucum forma uma combinação sustentável adequada com o PLA para substituir os corantes sintéticos vermelhos e seus tons [11].

Para os moldes de injeção, serão criadas três cavidades, sendo uma metálica de referência, já disponível e funcional na injetora, e duas poliméricas em resina. O molde metálico, construída por manufatura subtrativa em aço inox AISI A420. Para os moldes poliméricos, será usada uma resina BASF ULTRACUR3D® RG3280, fotossensível com 65% de carga cerâmica e características adequadas a esta aplicação de formação por impressão 3D no processo DLP, porém nunca testada com PLA. A resina RG 3280 possui módulo de elasticidade de 10 GPa e perda de rigidez aos 280° C, 100° C a mais da temperatura de injeção do PLA, 168° C.

A tecnologia de impressão 3D pode chegar a uma resolução de 100 ηm no processo multifotônico. O processo DLP se difere dos demais pela sua capacidade de curar uma camada inteira de uma vez em segundos, ao invés de fazer a cura ponto a ponto. Isso significa na prática maior rapidez e acurácia na impressão [12].

Todo o processo de injeção será efetuado em mini injetora I.18.AX. da empresa 4X TECNOLOGIA E INOVACAO LTDA. em escala laboratorial. Os parâmetros de injeção usados para nos ciclos de moldes poliméricos serão definidos durante o processo de injeção no molde metálico e poderão sofrer ajustes na medida em que os corpos de prova forem produzidos e analisados. Entre os ciclos de injeção serão aplicados aspersões de desmoldante, tipo óleo de silicone, para garantir qualidade superficial, extração de peças e evitar travamento do molde.

Serão produzidas mínimo de 30 amostras de cada um dos compostos de PLA 100%, PLA 1% PEG, PLA 5% PEG, PLA 10% PEG, PLA 1% PEG-U, PLA 5% PEG-U e PLA 10% PEG-U no molde metálico. Para o molde polimérico, objetiva-se injetada o máximo número de peças com os compostos PLA 100%, PLA 1% PEG e PLA 1% PEG-U.

As amostras terão controle dimensional aferido para determinar onde se inicia a degradação das ferramentas poliméricas, sua evolução até a perda dos parâmetros dimensionais especificados pela ASTM D638 [7], que é apropriada para caracterização qualitativa em pesquisas e desenvolvimento.

Na sequência as amostras serão mecanicamente ensaiadas por tração para determinar sua resistência em máquina EMIC modelo DL-3000 em temperatura ambiente, com velocidade de 20 mm/minuto, com célula de carga de 500 N e com distância entre garras de 13 mm. O valor de referência serão os valores encontrados por [11] em sua tese.

As metades dos corpos rompidos serão divididos em 2 lotes de 60 partes e encaminhados para testes físico químicos. As peças testadas mecanicamente serão submetidas a análises físico-químicas de DSC (*differential scanning calorimetry*), termogravimetria (decomposição térmica), FTIR (*Fourrier Transform Infra Red* – Espectroscopia infravermelho) e microscopia eletrônica de varredura (determinação da morfologia).

Resultados e Discussão

Até o momento foram injetadas e controladas todas as amostras da ferramenta metálicas e os parâmetros mapeados para serem usados nos moldes poliméricos. Houve variação de décimos de milímetro no controle dimensional entre os compostos e variação de centésimo de milímetro para peças no mesmo lote de composto.

Espera-se que as ferramentas poliméricas não atinjam o lote de 30 peças por composto pelo desgaste acelerado dos canais de injeção.

Agradecimentos

Ao CEFET-MG, à UEMG e FAPEMIG pelo suporte na pesquisa. Agradecimentos ao incondicional apoio do Prof. Dr. Artur Caron Motim, orientador e líder da pesquisa. À Profa. Dra. Carolina Pagnan pioneira no estudo de colorante natural de urucum no PLA. Ao Prof. Dr. Thiago Moreira pelas contribuições didáticas.

Referências

[1] Kazmer, D.O. Injection Mold Design Engineering. **In Injection Mold Design Engineering**, 2nd ed.; Kazmer, D.O., Ed.; Hanser Publishers: Munich, Germany, 2016; pp. I–XXIV. ISBN 978-1-56990-570-8.;

[2] Smith, Adam, 1776. "**An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations**," History of Economic Thought Books, McMaster University Archive for the History of Economic Thought, number smith 1776.;

[3] Environment, U. N. (October 21, 2021). "**Drowning in Plastics – Marine Litter and Plastic Waste Vital Graphics**". UNEP - UN Environment Programme. Retrieved March 21, 2022;

[4] Berend, Ivan T. (2006). An Economic History of Twentieth-Century Europe. [S.l.]: **Cambridge University Press**. p. 312. ISBN 9780521672689;

[5] **Informe Técnico n. 71**, de 11 de fevereiro de 2016. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/alimentos/informes-anexos/71de2016/arquivos/397json-file-1 ;

[6] Smith, Adam, 1776. "**An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations**," History of Economic Thought Books, McMaster University Archive for the History of Economic Thought, number smith 1776.;

[7] **ASTM D638:14**– Stadard test methods for tensile properties of plastics;

[8] **ASTM D270:17**– Stadard test methods for Flexural Properties of unreinforced and Reinforced Plastics and Eletrical Insulating Materials;

[9] A.K. Trivedi, M.K. Gupta, H. Singh. PLA based biocomposites for sustainable products: a review. **Adv. Ind. Eng. Polym**. Res., 6 (2023), pp. 382-395, 10.1016/J.AIEPR.2023.02.002;

[10] Filipe, Wiltgen; Marcelo, Lopes. **Manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa**;

[11] Pagnan, Caroline Salvan P149p **Percepção dos usuários frente a produtos fabricados via impressão 3D em PLA colorido com masterbatch de urucum (*Bixa Orellana L.*).** [manuscrito] / Caroline Salvan Pagnan. – 2018. 157 f.; il. color.; 31 cm.;

[12] Jiang, T.; Yan, B.; Jiang, M.; Xu, B.; Gao, S.; Xu, Y.; Yu, Y.; Ma, T.; Qin, T. Study of Forming Performance and Characterization of DLP3DPrinted Parts. **Materials** 2023, 16, 3847. https://doi.org/10.3390/ ma16103847.

Estado da Arte da Produção de Hidrogênio a Partir da Reforma Catalítica do Etanol

Josiel Coelho Gomes de Oliveira[1] (ORCID 0000-0002-7216-4296), Guilherme Benevides Chierici Teixeira[2] (ORCID 0009-0004-5063-9539), Wagner Sade[3] (ORCID 0000-0001-7457-9068), Sidney Nicodemos da Silva[4] (ORCID 0000-0002-4431-6651); Cleide Barbosa Soares[5] (ORCID 0009-0006-1296-7739)

[1]*(Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM / CEFET-MG)*

[2]*(Departamento de Engenharia Elétrica, CEFET-MG)*

[3]*(Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG)*

[4,5]*(Departamento de Física, CEFET-MG)*

Resumo: A descoberta do hidrogênio gasoso foi fruto de uma série de contribuições científicas ao longo dos séculos. Houve diversos acontecimentos desde o primeiro experimento documentado até a identificação da natureza do gás, que passou a ser conhecido como hidrogênio. O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo e é fundamental na formação de água. Dessa forma, este trabalho busca apresentar o estado da arte da produção de hidrogênio verde por meio da reforma a vapor do etanol, destacando o papel do Brasil como protagonista na economia de hidrogênio sustentável e as principais variáveis que impactam a eficiência desse processo.

Palavras-chave: Economia, Eficiência, Hidrogênio, Reforma a Vapor.

Introdução

O aumento constante da demanda global por energia, combinado à predominância de fontes não renováveis como carvão, petróleo e gás natural, coloca em evidência a urgência de uma transição para fontes de energia limpas e sustentáveis. Essas fontes fósseis são responsáveis por elevadas emissões de dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para a crise climática e a poluição atmosférica. Embora o Brasil seja o sétimo maior emissor de gases de efeito estufa, sua matriz energética é predominantemente renovável, o que oferece uma oportunidade única para alavancar sua posição na transição energética global [1]. Nesse cenário, o hidrogênio tem se destacado como uma solução estratégica e promissora para a descarbonização de setores industriais e de transporte. O hidrogênio foi observado pela primeira vez em 1520 por Paracelsus como um gás ascendente. Boyle descobriu seu caráter inflamável em 1670, enquanto Cavendish, em 1766, identificou-o como um elemento químico. Em 1783, Lavoisier deu-lhe o nome de hidrogênio, consolidando seu estudo [2]. Atualmente, a maior parte do hidrogênio é produzida pela reforma a vapor do gás natural, resultando no chamado hidrogênio cinza. No entanto, esse processo gera, em média, 10 kg de CO_2 para cada 1 kg de H_2 produzido. Alternativas como o hidrogênio azul, que utiliza tecnologias de captura e armazenamento de carbono, CCS, e o hidrogênio verde, produzido via eletrólise alimentada utilizando fontes renováveis, têm ganhado relevância como

opção de menor impacto ambiental. Contudo, o hidrogênio verde enfrenta desafios relacionados ao custo energético e econômico do processo de eletrólise, enquanto o hidrogênio azul produz em média de 1 a 3kg de CO_2 para cada 1kg de H_2 [3]. Assim, a reforma catalítica a vapor do etanol se apresenta como alternativa promissora e sustentável para a produção de hidrogênio, que é considerado verde principalmente com captura de CO_2. Nacionalmente, o etanol é produzido a partir de matéria-prima renovável, a cana-de-açúcar, cujo ciclo de carbono é parcialmente balanceado pela absorção de CO_2 durante o cultivo. Assim, essa rota de produção representa uma alternativa mais limpa e sustentável em relação ao hidrogênio cinza (reforma a vapor do gás natural sem captura de CO_2) e azul (reforma a vapor do gás natural com captura de CO_2). Além disso, a robusta infraestrutura de produção de etanol posiciona o país como um potencial líder na transição para uma economia de baixo carbono. Os principais tipos de reações para a produção de hidrogênio a partir do etanol são a reforma a vapor, SR, a oxidação parcial, POx, e a reforma autotérmica, ATR [4]. Cada método apresenta características distintas que influenciam sua aplicação e eficiência. A reforma a vapor é amplamente utilizada devido ao seu alto rendimento de hidrogênio. Para cada molécula de etanol, são produzidas 6 moléculas de H_2 através da reação Equação 1. Entre suas vantagens estão o alto rendimento e a ausência de necessidade de plantas de oxigênio no local, enquanto sua principal desvantagem é a necessidade de uma fonte de calor externa por ser um processo endotérmico.

$$C_2H_5OH + 3H_2O \leftrightarrow 2CO_2 + 6H_2 \quad (1)$$

Já a oxidação parcial é conduzida em temperaturas superiores às da reforma a vapor ao utilizar uma quantidade limitada de oxigênio para gerar uma combustão incompleta. Por ser um processo exotérmico, sua eficiência pode ser reduzida devido a perdas térmicas durante a operação. A reação é descrita na Equação 2.

$$C_2H_5OH + \frac{3}{2}O_2 \leftrightarrow 2CO_2 + 3H_2 \quad (2)$$

Por fim, a reforma autotérmica utiliza o calor liberado pela oxidação parcial para suprir a demanda energética da reforma a vapor, eliminando a necessidade de fornecimento externo de calor. Essa característica torna o ATR energeticamente mais eficiente, com um balanço térmico mais estável. A reação global é apresentada na Equação 3.

$$C_2H_5OH + 1{,}78H_2O + 0{,}612O_2 \leftrightarrow 2CO_2 + 4{,}78H_2 \quad (3)$$

Apesar do potencial dessas tecnologias, a reforma do etanol enfrenta desafios, como a necessidade de matérias-primas purificadas para evitar o envenenamento dos catalisadores, a redução dos custos de produção e o aumento da eficiência dos catalisadores [5]. Com isso, as pesquisas têm se concentrado no desenvolvimento de materiais catalíticos mais estáveis e de menor custo, bem como na otimização das condições operacionais para maximizar o rendimento de hidrogênio.

Metodologia

Este estudo teve como objetivo revisar o estado da arte sobre a produção de hidrogênio verde a partir da reforma a vapor do etanol. Para isso, a metodologia adotada consistiu em uma criteriosa seleção de fontes de informação, por meio de palavras-chave e estratégias de buscas previamente definidas. Nesse sentido, a revisão foi elaborada com base em artigos científicos, relatórios técnicos, livros e informações de projetos da iniciativa privada e de pesquisa e desenvolvimento (P&D). As fontes foram obtidas a partir de pesquisas, sites institucionais, páginas de empresas do setor de energia e notícias especializadas. Além disso, foram analisados documentos e arquivos

compartilhados por professores com experiência nesse tópico, incluindo artigos técnicos, relatórios e materiais de apoio. Para garantir a relevância e qualidade das informações, os seguintes tópicos guiaram as buscas:

- Produção de hidrogênio a partir da reforma catalítica do etanol;
- Desafios e tendências futuras dessa tecnologia;
- Projetos relevantes da iniciativa privada e de P&D em território brasileiro.

Logo, fontes que não contextualizavam e discutiam diretamente a produção de hidrogênio a partir da reforma do etanol ou que não apresentavam dados técnicos relevantes foram excluídos. As buscas foram realizadas utilizando combinações de termos como reforma a vapor do etanol, produção de hidrogênio verde, desafios da reforma catalítica e projetos de hidrogênio verde. Esses termos foram aplicados tanto em bases científicas quanto em outras fontes confiáveis mencionadas anteriormente. Para extrair as informações, os materiais selecionados foram analisados de forma qualitativa, com foco nos seguintes aspectos:

- Análise do processo de produção de hidrogênio a partir da reforma do etanol: Avaliação detalhada das etapas do processo, considerando a influência de variáveis operacionais, como temperatura, pressão e tipo de catalisador, no rendimento de H_2.
- Barreiras tecnológicas e econômicas: Análise das principais limitações para a produção de hidrogênio verde em larga escala.
- Tendências futuras e inovações tecnológicas: Exploração de novos catalisadores, avanços em eficiência energética e outras soluções tecnológicas.
- Projetos de P&D e iniciativas da indústria: Identificação de projetos relevantes no Brasil, destacando avanços e contribuições para o setor de hidrogênio verde.

Resultados e Discussão

Atualmente, diversas tecnologias são empregadas para a produção de hidrogênio. A reforma a vapor de metano, que é o principal método, gera grandes volumes de gases indesejáveis, enquanto a eletrólise, embora limpa, exige uma quantidade substancial de energia, elevando significativamente os custos de produção. Estudos indicam que avanços em eficiência e redução de custos dos eletrolisadores, bem como acesso a fontes renováveis de baixo custo, são fundamentais para tornar a produção economicamente viável. Além disso, existe um desafio logístico, devido à necessidade de infraestrutura específica para transporte e armazenamento dessa substância.

Em contrapartida, pesquisas com as seguintes temáticas estão sendo gradativamente produzidas, fomentando iniciativas para superar essas limitações:

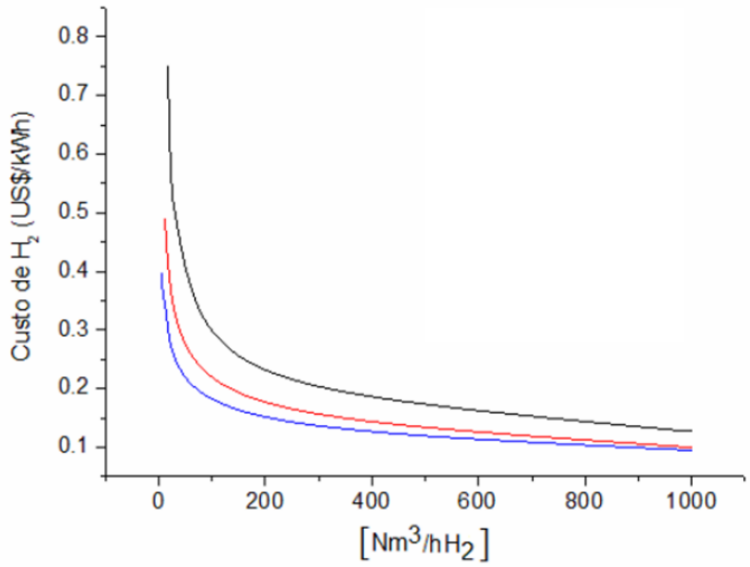
- Integração do hidrogênio com fontes de energia solar, eólica e nuclear.
- Desenvolvimento de catalisadores mais eficientes e duráveis.
- Estudos econômicos e políticas energéticas focadas no mercado de hidrogênio.
- Soluções para transporte e armazenamento seguro e econômico, especialmente para locais remotos ou integrados a redes de energia.

Para superar os obstáculos, o Brasil tem investido em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), impulsionando a cadeia de valor do hidrogênio nacional e posicionando o país como potencial líder no mercado global. Entre os principais projetos, destacam-se [6]:

- Petrobras: Aplicando R$ 90 milhões em uma planta piloto para descarbonizar a geração de energia em uma usina termelétrica.
- Projeto Pecém H2V: Voltado para desenvolver uma cadeia completa de hidrogênio, da produção à aplicação.
- Neoenergia: Investindo R$ 500 milhões para estabelecer um dos primeiros pontos de abastecimento de hidrogênio para veículos no país.

Essas iniciativas, somadas a outros projetos em andamento, acumulam mais de US$ 30 bilhões em investimentos previstos, reforçando a cadeia de valor do hidrogênio no Brasil. A reforma catalítica do etanol, o Brasil se posiciona como um pioneiro devido à sua grande infraestrutura de produção de etanol. O processo utiliza catalisadores, como óxidos de níquel e cobalto, para converter o etanol em hidrogênio e dióxido de carbono. Estudos mostram que esses catalisadores aumentam a eficiência do processo e minimizam subprodutos indesejáveis. Entretanto, a desativação dos catalisadores devido ao acúmulo de carbono permanece um desafio, motivando pesquisas para o desenvolvimento de materiais mais estáveis e econômicos. Uma iniciativa promissora é a estação de abastecimento de hidrogênio renovável a partir de etanol, a ser inaugurada pela Universidade de São Paulo (USP) em 2024 [7]. Essa planta, desenvolvida em parceria com a Raízen, terá capacidade de produzir 100 kg de hidrogênio por dia, utilizando 7 litros de etanol para produzir 1kg de hidrogênio. Esse vetor energético será utilizado para abastecer três ônibus urbanos no campus e um ônibus rodoviário com autonomia de até 450 km. Esse projeto piloto é uma oportunidade única para avaliar a viabilidade técnica e econômica do hidrogênio derivado de etanol em aplicações reais. Além disso, o estudo desenvolvido por BONA (2019) analisou aspectos econômicos, dentre outros, da produção de hidrogênio a partir da reforma catalítica do etanol. Nesse sentido, a produção acadêmica calculou os custos da produção de sistemas de 10 até 100 Nm^3/h de hidrogênio, utilizando o bagaço de cana como fonte de calor. Assim, a relação entre a capacidade de produção do sistema e o custo do H_2 é apresentado na Figura 1. Com isso, esse estudo observou que a utilização do bagaço é uma opção viável para fazer com que o custo do hidrogênio gerado a partir da reforma do etanol seja atrativo e competitivo.

Figura 1 – Custo de H_2 por capacidade de produção do sistema



Fonte: SILVA, 2010.

Conclusão

O hidrogênio se destaca como um recurso energético versátil, com aplicações que abrangem desde a produção de outros combustíveis até a obtenção de calor e a geração de eletricidade. Sua utilização pode ocorrer em motores de combustão interna ou em sistemas eletroquímicos, como células de combustível, reforçando seu papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono [8]. Assim, sua versatilidade o torna como uma solução viável para a descarbonização em setores como a siderurgia e a indústria automobilística.

Além disso, projeções indicam que o consumo global de hidrogênio será mais que sextuplicado até 2070, impulsionado por avanços tecnológicos e pela crescente demanda por soluções energéticas limpas. Para o hidrogênio verde, especificamente, espera-se uma significativa redução de custos, com estimativas apontando que seu custo poderá ser reduzido pela metade até 2050, tornando-o ainda mais competitivo no cenário energético global [9].

Por fim, a infraestrutura robusta de produção de etanol no Brasil associada a reforma catalítica desse álcool representa uma rota promissora para a produção de hidrogênio. Essa sinergia posiciona o Brasil como um potencial líder na economia de hidrogênio verde, alinhando desenvolvimento tecnológico à sustentabilidade ambiental. O país se comprometeu em sua participação este ano na Conferência das Partes no Azerbaijão (a COP29) a uma redução dos gases do efeito estufa de 59% a 67% até 2035. E neste contexto a produção de hidrogênio e basicamente com captura de CO_2 surge como uma das opções de energia.

Referências

[1] OLIVEIRA, M. F., CASTRO, C. F. S., OLIVEIRA, D. M. S., TININIS, A. G., ARAÚJO, D. A., VANIN, L, G. S., *Uma Análise Estatística sobre a Pesquisa Científica e a Projeção Energética do Hidrogênio Verde a Nível Global nos Últimos Cinco Anos*, **Rev. Aracê**, v.6, n.3, p.8062-8080, 2024.

[2] CRUZ, F.E., ***Produção de Hidrogênio em refinarias de petróleo: Avaliação Exergética e Custo de Produção***, Dissertação para obtenção do título de mestre apresenta à Politécnica da universidade de São Paulo, SP, maio. 2010.

[3] MCKINSEY & COMPANY, ***Hidrogênio Verde: Uma Oportunidade de Geração de Riqueza com Sustentabilidade para o Brasil e o Mundo***, [online]. Disponível em: https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo. Acesso em 20/11/2024.

[4] SILVA, M. E., ***Análise experimental da reforma a vapor de etanol: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos***, Tese para obtenção do título de doutor em Engenharia e Ciências Mecânicas apresentada à Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

[5] BONA, J. C., ***Cinética química da reforma a vapor de etanol sobre catalisador de níquel***, Dissertação para obtenção do título de mestre apresentada à UFSC, Joinville, SC, fev. 2019.

[6] EIXOS BRASIL, ***Hidrogênio Verde: Conheça 16 Projetos Promissores em Desenvolvimento no Brasil*** [online]. Disponível em: https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-conheca-16-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/. Acesso em 19/11/2024.

[7] MONTEIRO, L., *USP Inaugura Primeira Planta de Conversão de Hidrogênio a Partir de Etanol do Mundo,* **Jornal Opção**, 9 de novembro de 2024.

[8] BROWN, L. F., *A Comparative Study of Fuels for On-Board Hydrogen Production for Fuel-Cell-Powered Automobiles*, **International Journal of Hydrogen Energy**, N. 26, 2001, p. 381–397.

[9] EPE, ***Nota Técnica: Hidrogênio Azul***, [online]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf. Acesso em 15/11/2024.

Conceito *Booster* na Pressão de Trabalho em Sistemas de Água de Resfriamento para Máquinas Industriais

Artur Pereira Vilas Boas[1] (https://orcid.org/0009-0009-2636-9926), José Leôncio Fonseca de Souza[1] (0000-0003-2319-0540), Cristina Almeida Magalhães[1] (https://orcid.org/0000-0001-6427-5941)

1 Laboratório de Simulações Numéricas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo: O presente trabalho investiga a eficiência energética de um sistema de bombeamento "*booster*" aplicado a circuitos de água gelada em ambiente industrial, comparando-o com um sistema de bombeamento convencional. A pesquisa é motivada pelo alto consumo energético desses sistemas, especialmente em setores que requerem controle térmico rigoroso para manter a qualidade do produto final. Para avaliar a eficácia do conceito *booster*, será realizada uma análise numérica baseada em simulações computacionais, utilizando softwares especializados como AFT Fathom e EES. O estudo incluirá uma revisão bibliográfica para embasar teoricamente o conceito "booster", seguida da implementação e validação do modelo numérico para o conceito convencional. Esse modelo será validado a partir de dados experimentais para garantir sua confiabilidade, permitindo uma análise comparativa entre os dois sistemas (convencional e *booster*) quanto ao consumo energético, estabilidade de pressão e eficiência operacional. Espera-se que o uso de bombas "*booster*" demonstre uma distribuição de pressão mais uniforme e reduza os custos operacionais, proporcionando uma alternativa energeticamente mais eficiente e economicamente viável para a indústria.

Palavras-Chave: Sistemas de tubulação, Bombeamento Cascata, Eficiência Energética, Simulação Numérica, Sistemas com Múltiplas Bombas.

Introdução

O fornecimento e a circulação de água gelada em sistemas industriais são essenciais para o controle térmico de processos e equipamentos, especialmente em setores que manufaturam produtos de polímeros. Nesses sistemas, a estabilidade térmica afeta diretamente a qualidade do produto final e, portanto, o controle de temperatura se torna indispensável. Em indústrias que utilizam água gelada, a eficiência energética é um desafio constante, visto que o consumo de energia elétrica para a operação de bombas de circulação representa uma parcela significativa dos custos operacionais (Annus; Uibo; Koppel, 2014; Cardoso et al., 2017; Oshurbekov et al., 2020). Com a crescente preocupação mundial com a sustentabilidade e a eficiência no uso de recursos energéticos, a otimização desses sistemas se destaca como uma área de interesse, tanto para a indústria quanto para a academia (Cardoso *et al.*, 2017; Kaya *et al.*, 2013).

Atualmente, o setor industrial é um dos maiores consumidores de energia, sendo responsável por uma parte considerável das emissões de gases de efeito estufa. Estima-se que 35% do gasto energético no Brasil, durante o ano de 2023, foi devido ao setor industrial, seguido do setor

residencial com 31% e do comercial com 18%, sendo que os 15% remanescentes pertencem, somados, aos setores rural, serviço público, poder público, iluminação pública e consumo próprio (Empresa de Pesquisa Energética, 2024). Dentro do setor industrial, o uso de sistemas de bombeamento, particularmente em processos que envolvem água gelada, representa um dos principais focos de consumo energético. Entretanto, apesar dos esforços para tornar esses sistemas mais eficientes, há lacunas significativas no desenvolvimento de abordagens que combinem eficiência energética e viabilidade econômica.

Nos últimos anos, estudos têm investigado métodos para melhorar a eficiência dos sistemas de tubulação, com foco em tecnologias de bombeamento que possam distribuir a pressão nesse sistema de maneira mais uniforme, (Annus; Uibo; Koppel, 2014; Liu *et al.*, 2020; Oshurbekov *et al.*, 2020). A partir de pesquisas recentes, podem-se listar as principais frentes de pesquisa que tratam da eficiência energética em sistemas de tubulação.

O uso de inversores de frequência, que são dispositivos eletrônicos que controlam a velocidade e o torque de motores elétricos de corrente alternada (AC) ao ajustar a frequência e a tensão de alimentação fornecida ao motor, é um tema amplamente discutido na literatura (Annus; Uibo; Koppel, 2014; Arun Shankar *et al.*, 2016; Cardoso *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020; Oshurbekov *et al.*, 2020; Pöyhönen, 2021; Pöyhönen *et al.*, 2019). A velocidade do motor está diretamente relacionada ao consumo de energia. Em muitas aplicações de bombeamento, a demanda de fluxo varia ao longo do tempo, e reduzir a velocidade do motor pode levar a economias de energia significativas. Isso porque a relação entre velocidade e potência consumida é cúbica, o que significa que pequenas reduções na velocidade resultam em grandes economias de energia (Çengel; Cimbala, 2014; Coelho, 2010; Fox; Mcdonald; Pritchard, 2014).

Outra linha de pesquisa foca na importância de utilização de bombas mais eficientes projetadas para maximizar a transferência de energia ao fluido, minimizar perdas e garantir durabilidade e baixo custo operacional (Annus; Uibo; Koppel, 2014; Kaya *et al.*, 2013). Essas bombas são caracterizadas por um projeto que equilibra eficiência hidráulica, resistência mecânica e adequação ao propósito de uso, com especial atenção a componentes-chave, como a voluta e o impulsor.

Estudos recentes abordam operações fora do ponto de máxima eficiência, ajustes no diâmetro do rotor, e tratam da importância da seleção correta de motores e das bombas que, independentemente de serem eficientes energeticamente, costumam ser mal selecionadas e, portanto, operam em pontos distantes do ponto de máxima eficiencia específica (Annus; Uibo; Koppel, 2014; Arun Shankar *et al.*, 2016; Cardoso *et al.*, 2017; Kaya *et al.*, 2013).

Investiga-se também, o uso de sistemas com bombas *booster* (ou bombas em cascata) que vem ganhando destaque por sua capacidade de reduzir o consumo energético (Audu, 2021; Oshurbekov *et al.*, 2020). O sistema booster é um sistema de bombeamento adicional ou auxiliar projetado para aumentar a pressão do fluido em uma tubulação enquanto mantem a vazão mássica. Ele é frequentemente utilizado em redes de água, sistemas de distribuição de gás e em aplicações industriais, onde o objetivo é garantir uma pressão de trabalho adequada ao longo de toda a extensão da rede. Essa abordagem ganha relevância principalmente em sistemas que possuem trajetos múltiplos e nos quais os pontos a serem atendidos trabalham sob condições variadas de demanda de carga. Demandas essas provenientes de máquinas, tanques e componentes, os quais são supridos simultaneamente pelo mesmo sistema de tubulações.

O presente trabalho visa investigar a adoção do conceito "*booster*" em sistemas de água de resfriamento de máquinas produtoras de bombonas manufaturadas em polímero (PEAD), a partir

de uma abordagem energética. Pretende-se comparar um sistema "*booster*" a um sistema convencional de bombeamento. Para isso, serão realizadas simulações numéricas nos softwares Microsoft Excel, EES e AFT Fathom 10, de modo a analisar o perfil de pressão e o consumo de energia em diferentes cenários operacionais. Pretende-se responder a questões como: a eficiência energética do sistema "booster" é superior à do sistema convencional? A potência da estação de bombeamento principal pode ser reduzida, com a inclusão das bombas "*booster*"? As irreversibilidades associadas ao conceito "booster" são menores? Qual é o impacto econômico da adoção desse conceito, em termos de custos de capital (CapEx) e operacional (OpEx)?

A hipótese do trabalho é que, aplicando um conceito "booster" de bombeamento, como concepção de design, face a um conceito convencional de bombeamento, no cálculo da pressão de trabalho do sistema, é possível obter um distribuição de pressão mais refinada, melhor distribuída e mais reduzida em bombeamentos de sistemas de água gelada, possibilitando custos de operação muito mais baixos e consequentemente reduzindo gastos financeiros, principalmente no que se diz respeito às bombas centrífugas, que devido a melhor distribuição de pressão pelo sistema na tubulação apresentará potência reduzida.

Este estudo busca não apenas oferecer uma análise comparativa entre os dois conceitos de bombeamento, mas também fornecer subsídios para que indústrias tomem decisões mais informadas sobre a implementação de tecnologias que promovam a eficiência energética, além de contribuir com registros científicos deste tipo de sistema nos cálculos hidráulicos. Com a otimização de sistemas de água gelada, almeja-se contribuir para processos produtivos mais sustentáveis, alinhados às demandas por soluções que equilibrem desempenho econômico e responsabilidade ambiental.

Metodologia

O trabalho é baseado em uma investigação numérica computacional que irá avaliar a diferença de resultados entre a concepção convencional e a concepção "*booster*" de um sistema de bombeamento de água gelada. Tais resultados devem abordar aspectos energéticos de forma a analisar o impacto de uma concepção dessa natureza.

Tendo isso em vista, as etapas a serem seguidas para o desenvolvimento deste trabalho serão:

1. *Revisão bibliográfica;*

Pretende-se utilizar de uma pesquisa bibliográfica focada na seleção e análise dos artigos mais relevantes sobre sistemas de bombeamento "*booster*" voltados para a eficiência energética. Essa etapa inicial visa fichar e organizar os estudos de caso, teorias e abordagens práticas que contribuem diretamente para o entendimento e aplicação do conceito booster em sistemas de bombeamento. Esse levantamento bibliográfico será fundamental para embasar teoricamente o estudo e identificar as melhores práticas e resultados obtidos em pesquisas anteriores, formando uma base sólida para o desenvolvimento e validação do modelo proposto.

2. *Estudo do AFT Fathom ou EES ou Software Similar;*

O próximo passo na metodologia será o estudo aprofundado da ferramenta computacional selecionada, com o objetivo de preparar e implementar o modelo de simulação para análise do sistema de bombeamento booster. Essa etapa envolverá a familiarização com as funcionalidades e parâmetros específicos do software, assegurando que ele seja configurado de forma precisa para

simular as condições operacionais e características hidráulicas do sistema em estudo. A compreensão detalhada dos recursos da ferramenta computacional permitirá otimizar a modelagem dos fluxos, pressões e consumo energético, garantindo que a implementação seja realizada de forma eficaz e alinhada aos objetivos de eficiência energética propostos pela pesquisa.

3. *Implementação do modelo numérico do processo de escoamento do sistema de água gelada para os dois conceitos tratados;*

A fase de implementação do modelo numérico do processo de escoamento para o sistema de água gelada abrangerá a simulação dos dois conceitos de bombeamento abordados: o sistema convencional e o sistema com bombeamento "*booster*". O modelo será desenvolvido com base nas equações de conservação de massa e energia, ajustadas para representar fielmente as condições de operação de cada configuração. A simulação permitirá analisar o comportamento do escoamento, as variações de pressão e a distribuição de energia ao longo do sistema, possibilitando comparações diretas entre os dois conceitos.

4. *Validação do Modelo;*

Na etapa de validação do modelo, o modelo numérico convencional será rigorosamente confrontado com os dados obtidos experimentalmente, assegurando que as simulações reproduzam com precisão o comportamento real do sistema de água gelada. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais permitirá verificar a precisão do modelo e identificar possíveis ajustes para aprimorar sua representatividade. Uma vez que a validação experimental comprove a confiabilidade do modelo numérico convencional, esse resultado dará suporte à hipótese de que o modelo para o conceito *booster* também é confiável, pois ambos se baseiam em princípios físicos e parâmetros similares. Dessa forma, a validação experimental do modelo numérico convencional atuará como um alicerce para validar indiretamente o desempenho simulado do sistema *booster*, garantindo que as conclusões sobre sua eficiência energética sejam fundamentadas e robustas.

5. *Resultados e Discussões;*

Na seção de resultados e discussões, serão apresentados e analisados os dados obtidos a partir das simulações numéricas do sistema de água gelada para os dois conceitos de bombeamento: o sistema convencional e o sistema com *booster*. Os resultados incluirão comparações de desempenho, como consumo energético, variações de pressão e eficiência operacional, proporcionando uma visão detalhada sobre a eficácia de cada abordagem. A análise crítica desses resultados permitirá discutir as vantagens e limitações do sistema *booster* em relação ao sistema convencional, com foco na potencial economia de energia e na estabilidade de pressão ao longo da tubulação. Além disso, serão exploradas as implicações práticas dos achados para aplicações industriais e as oportunidades para aprimoramentos futuros, oferecendo uma base sólida para a tomada de decisões informadas quanto à adoção de sistemas mais eficientes em termos energéticos.

Referências

ANNUS, I.; UIBO, D.; KOPPEL, T. Pumps Energy Consumption Based on New EU Legislation. **Procedia Engineering**, [*S. l.*], vol. 89, p. 517–524, 2014. Available at: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814025880. Accessed on: 9 Nov. 2024.

ARUN SHANKAR, V. K. *et al.* A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. **Applied Energy**, [*S. l.*], vol. 181, p. 495–513, Nov. 2016. Available at: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916311576. Accessed on: 12 Nov. 2024.

AUDU, E. E. The Study of Electrical Energy Consumption in Cascaded Pumps for Pipeline Operations. **Journal of Energy Research and Reviews**, [*S. l.*], , p. 43–59, 6 Apr. 2021. Available at: https://journaljenrr.com/index.php/JENRR/article/view/130. Accessed on: 9 Nov. 2024.

CARDOSO, P. *et al.* ASSESSMENT OF PUMP'S PERFORMANCE IN WATER SUPPLY SYSTEMS – DATA COLLECTED FROM MULTIPLE CASE STUDIES. **European Journal of Sustainable Development**, [*S. l.*], vol. 6, no. 2, 1 May 2017. Available at: https://ecsdev.org/ojs/index.php/ejsd/article/view/482/479. Accessed on: 9 Nov. 2024.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid mechanics: fundamentals and applications**. Third edition. New York: McGraw Hill, 2014.

COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos da Engenharia Hidráulica**. 3. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010(Ingenium).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024. Ano base 2023. Jun. 2024. Available at: https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/#35_Consumo_por_classe_e_subsistema_(GWh). Accessed on: 11 Sep. 2024.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2014.

KAYA, D. *et al.* ENERGY AND EXERGY EFFICIENCIES IN INDUSTRIAL PUMPS. **International Journal of Renewable Energy Resources**, [*S. l.*], vol. 3, p. 27–42, 2013.

LIU, E. *et al.* Research on the steady-state operation optimization technology of oil pipeline. **Energy Science & Engineering**, [*S. l.*], vol. 8, no. 11, p. 4064–4081, Nov. 2020. Available at: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.795. Accessed on: 9 Nov. 2024.

OSHURBEKOV, S. *et al.* Energy Consumption Comparison of a Single Variable-Speed Pump and a System of Two Pumps: Variable-Speed and Fixed-Speed. **Applied Sciences**, [*S. l.*], vol. 10, no. 24, p. 8820, 9 Dec. 2020. Available at: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/8820. Accessed on: 9 Nov. 2024.

PÖYHÖNEN, S. *et al.* Specific speed-based pump flow rate estimator for large-scale and long-term energy efficiency auditing. **Energy Efficiency**, [*S. l.*], vol. 12, no. 5, p. 1279–1291, Jun. 2019. Available at: http://link.springer.com/10.1007/s12053-018-9751-4. Accessed on: 9 Nov. 2024.

PÖYHÖNEN, S. **VARIABLE-SPEED-DRIVE-BASED MONITORING AND DIAGNOSTIC METHODS FOR PUMP, COMPRESSOR, AND FAN SYSTEMS**. 2021. 139 f. Dissertation for the degree of Doctor of Science (Technology) – Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT, Lappeenranta, Finland, 2021.

Determinação da Massa de um PCM para Armazenamento de Frio em Sistema de Ar Condicionado

Rodrigo de Carvalho Araújo [1] (ORCID ID: 0009-0005-2028-5749), André Guimarães Ferreira [1] (ORCID ID: 0000-0002-0694-5369), Tiago Freitas Paulino [1] (ORCID ID: 0000-0002-2446-0373)

1 Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (CEFET/MG, Belo Horizonte)

Resumo: A utilização de Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Material - PCM*) em Sistemas de Armazenamento Térmico de Energia (*Therma Energy Storage - TES*) é uma estratégia promissora para aumentar a eficiência energética de sistemas de ar condicionado. Há poucas análises sobre o uso de PCM em TES para armazenamento de frio em climas quentes, e determinar a massa ideal de PCM no TES é um desafio. Este artigo investiga uma metodologia para determinar a massa em um TES acoplado a um sistema de ar condicionado operando em climas tropicais. O armazenamento no TES considerou três situações: parafina a 5°C e água a 5°C e a 0,1°C. A carga térmica foi estimada entre 5 e 100 TR, com o tempo de atendimento variando entre uma e oito horas. A análise mostrou que a carga térmica é proporcional à massa do TES necessária, e a massa da água como PCM é próxima à da parafina, porém a água a 5°C requer um volume de armazenamento 82,6% maior. O volume é crucial para determinar o tamanho dos reservatórios, influenciando a eficiência e viabilidade dos sistemas.

Palavras-chave: Material de mudança de fase (PCM), reservatório de energia térmica, sistema de ar condicionado, otimização de massa.

Introdução

A crescente necessidade de soluções eficientes e sustentáveis para climatização de ambientes tem direcionado o interesse para o uso de Materiais de Mudança de Fase (PCM) em Sistemas de Armazenamento Térmico de Energia (TES). Esses materiais possuem a capacidade de armazenar e liberar grandes quantidades de energia térmica durante suas transições de fase, proporcionando uma maneira eficaz de melhorar a eficiência energética e o desempenho de sistemas de ar condicionado *(Nazir et al., 2019).*

A implementação de TES carregados durante a noite, quando a temperatura ambiente é mais baixa, possibilita uma operação mais eficiente do sistema de ar condicionado, ao produzir frio em horários de menor demanda energética. Essa estratégia não apenas melhora a performance do sistema ao aproveitar as temperaturas mais amenas, mas também permite desacoplar a produção de frio do consumo energético durante o horário de pico, contribuindo para a redução da sobrecarga no sistema elétrico, especialmente em períodos de temperaturas mais elevadas (López-Navarro *et al.*, 2014).

Apesar do potencial dos PCM em TES para armazenamento de frio, especialmente em regiões de clima quente, a literatura ainda é escassa em análises detalhadas sobre a determinação da massa ideal de PCM para esses sistemas. A determinação precisa dessa massa é crucial para assegurar um desempenho otimizado e a eficiência energética do sistema (Oró *et al.*, 2012).

A crescente demanda por soluções energéticas eficientes tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia térmica. Uma dessas tecnologias, o armazenamento de calor latente (ACL), destaca-se pela sua alta capacidade volumétrica em comparação ao armazenamento de calor sensível (ACS). Essa característica faz com que o ACS seja uma opção mais competitiva e atraente em diversas aplicações, devido à significativa redução no volume de armazenamento necessário. Em particular, o uso de ACS é extremamente vantajoso em contextos em que o volume e o peso são críticos para a eficiência energética, como em aplicações de transporte. A implementação eficaz de ACS nesses cenários pode resultar em melhorias substanciais na eficiência global, contribuindo para um futuro mais sustentável (Selvnes *et al.*, 2021).

Muitos materiais de mudança de fase (PCM) estão sendo testados atualmente, cada um com propriedades termofísicas específicas. Na faixa de temperatura útil para ar condicionado (5 a 10°C), segundo Hasnain (1998), as principais opções disponíveis são o armazenamento de gelo, sais hidratados ou parafinas. Este último pode ser mais eficiente em termos de energia do que o armazenamento de gelo, pois a solidificação pode ser realizada com temperaturas de evaporação mais altas, trazendo benefícios no desempenho do resfriador. Além disso, quanto menor a diferença de temperatura em relação ao ambiente, menores são as perdas por transferência de calor (Torregrosa-Jaime *et al.*, 2013).

O objetivo principal deste artigo é determinar a massa adequada de PCM em um TES acoplado a um sistema de ar condicionado, a partir de cargas térmicas pré-definidas. Na análise será avaliada a água, como PCM e como armazenador de calor sensível, e a parafina. A análise é baseada na carga térmica necessária para garantir o conforto térmico, calculada a partir de dados climáticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram selecionadas quatro temperaturas para a análise: o dia com a maior temperatura do ar, o dia com a menor temperatura do ar e dois dias com a maior irradiação solar. Esses dias foram escolhidos para representar as condições de maior e menor demanda de frio.

A compreensão e a resolução dos desafios associados à determinação da massa de PCM em TES podem contribuir significativamente para o desenvolvimento e a operação eficiente de sistemas de ar condicionado, promovendo a redução do consumo energético, especialmente durante os horários de pico, e minimizando o impacto ambiental relacionado à produção de frio.

Metodologia

No intuito de se calcular e comparar a quantidade de massa em quilogramas (kg), em quatro (04) temperaturas ambientes diferentes alternando a carga térmica requerida para um ambiente de escritório com as dimensões pré-definidas, será utilizado um modelo matemático das equações, alterando também o material dentro do TES.

A simulação da quantidade de massa para um modelo matemático do sistema de refrigeração será realizada na linguagem de programação Python utilizando dados termodinâmicos da biblioteca CoolProp.

O método de armazenamento de calor latente oferece uma maior quantidade de armazenamento com uma menor diferença de temperatura entre as fases de carga e descarga do sistema, quando comparado ao calor sensível (De Paula et al., 2020b).

A quantidade de energia armazenada pode ser determinada por (1 e (2 (Akeiber et al., 2016)

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m_{PCM}\, C_{pS}\, \Delta T + m_{PCM}\, a_m\, \Delta H + \int_{T_m}^{T_f} m_{PCM}\, C_{pL}\, \Delta T \qquad (1)$$

$$Q = m_{PCM}\left[C_{pS}\,(T_m - T_i) + a_m\, \Delta H + C_{pL}\,(T_f - T_m)\right] \qquad (2)$$

Onde (am) é o PCM fração derretida, (CpS) é a capacidade térmica específica do PCM no estado sólido, (CpL) é a capacidade térmica específica do PCM no estado líquido, (ΔH) é a diferença de calor latente no estado líquido e sólido, (m_{PCM}) de massa de PCM, (Q) é a quantidade de energia armazenada em PCM, (Tf) é o PCM temperatura final, (Ti) é a quantidade de energia armazenada em, (Tm) é a PCM temperatura de derretimento e (ΔT) é a diferença de temperatura.

Para o desenvolvimento deste estudo, construímos gráficos cujo objetivo principal foi calcular a massa em quilogramas em função da variação da quantidade de energia armazenada em materiais de mudança de fase (PCM). Este cálculo considerou o atendimento a uma demanda de carga térmica de 5 Toneladas de Refrigeração (TR) a 100TR por períodos de tempo de 1 hora, 4 horas e 8 horas.

Os gráficos foram elaborados considerando a possibilidade de alterar os fluidos do sistema de armazenamento térmico (TES). Os fluidos analisados foram: água a 0,1°C (considerou-se que nessa temperatura a água já estaria no seu ponto de fusão), água a 5°C (armazenando na forma de calor sensível) e parafina RT8HC, também a 5°C.

Para uma análise abrangente, o estudo incluiu quatro cenários distintos, cada um representando um dia com diferentes temperaturas médias de 20°C, 25°C, 30°C e 35°C. Isso permitiu avaliar o desempenho do TES sob diversas condições climáticas, garantindo que os resultados fossem robustos e aplicáveis a uma ampla gama de situações. Na Tabela 1 são sumarizadas as variáveis consideradas nesse estudo.

Tabela 1 – Variáveis consideradas nesse estudo.

Materiais de Armazenamento do Frio no TES / Temperatura de Armazenamento	Carga Térmica a ser atendida pelo TES	Tempo a ser atendido pelo TES	Temperatura ambiente (temperatura inicial do TES)
- Água / 0,1°C - Água / 5°C - Parafina RT8HC / 5°C	Variando entre 5 TR e 100 TR	1h, 4h ou 8h	20°C, 25°C, 30°C e 35°C

Fonte: elaborado pelos autores.

Resultados e Discussão

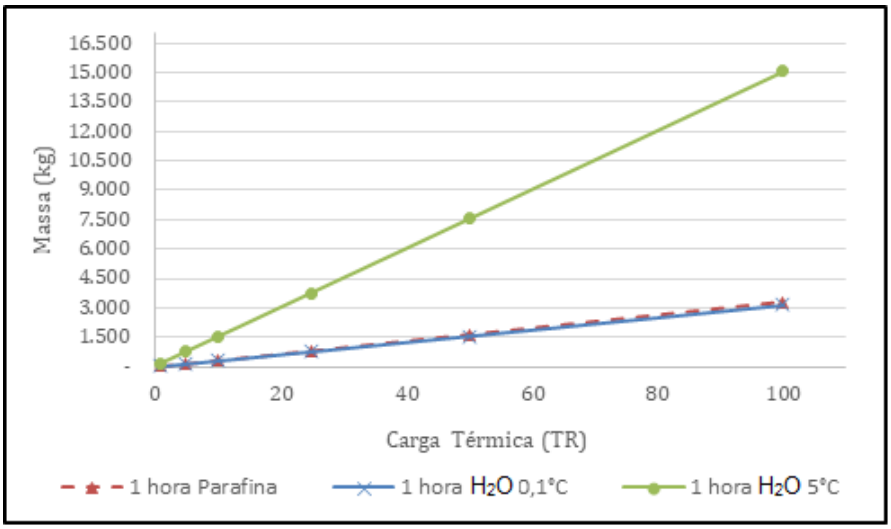
Nesta seção, os resultados das simulações realizadas em Python para o cálculo da massa do (TES) em função da carga térmica do sistema são apresentados. Foram utilizados diversos gráficos para

ilustrar as variáveis apresentadas na Tabela 1, facilitando a análise de suas relações. Os gráficos a seguir fornecem uma visão detalhada das simulações, destacando como a massa do TES varia em função de diferentes cargas térmicas. A visualização dos resultados por meio de gráficos nos permite identificar padrões, tendências e comportamentos específicos, que são cruciais para a compreensão e otimização do desempenho do sistema de armazenamento de energia térmica.

As simulações apresentadas nas Figura 1, Figura 2 e Figura 3 foram realizadas de forma que a energia armazenada no TES fosse a necessária para remoção da carga térmica simulada por um dado período. Os períodos de armazenamento foram de 1 hora (Figura 1), 4 horas (Figura 2) e 8 horas (Figura 3). Nessa simulação considerou-se o cenário de temperatura do ambiente de 20°C e que essa é a temperatura inicial do TES. Observa-se pela análise das figuras que como era esperado quando deseja-se armazenar energia para atendimento a uma demanda maior de horas necessita-se de uma maior quantidade de massa. Verifica-se ainda em todos os cenários analisados que a massa necessária para o armazenamento na parafina a 5°C é similar àquela necessária para água quando essa está sendo utilizada como PCM, apresentado variações de 5,7%. Por sua vez, quando se considera a água e a parafina na temperatura de 5°C, a parafina requer uma quantidade de massa 82,6% menor que a água.

Nas Figuras 1, 2 e 3 pode-se observar que a água, quando comparada à parafina na mesma temperatura, 5°C, apresenta uma massa significativamente maior, de 3 a 4 vezes. À medida que a carga térmica aumenta, as massas de todos os fluidos aumentam proporcionalmente. Notavelmente, a água a 0,1°C demonstra um comportamento muito semelhante ao da parafina. Além disso, a duração do tempo também influencia diretamente na quantidade de massa, com o período de 8 horas, Figura 3, apresenta as maiores quantidades mássicas calculadas.

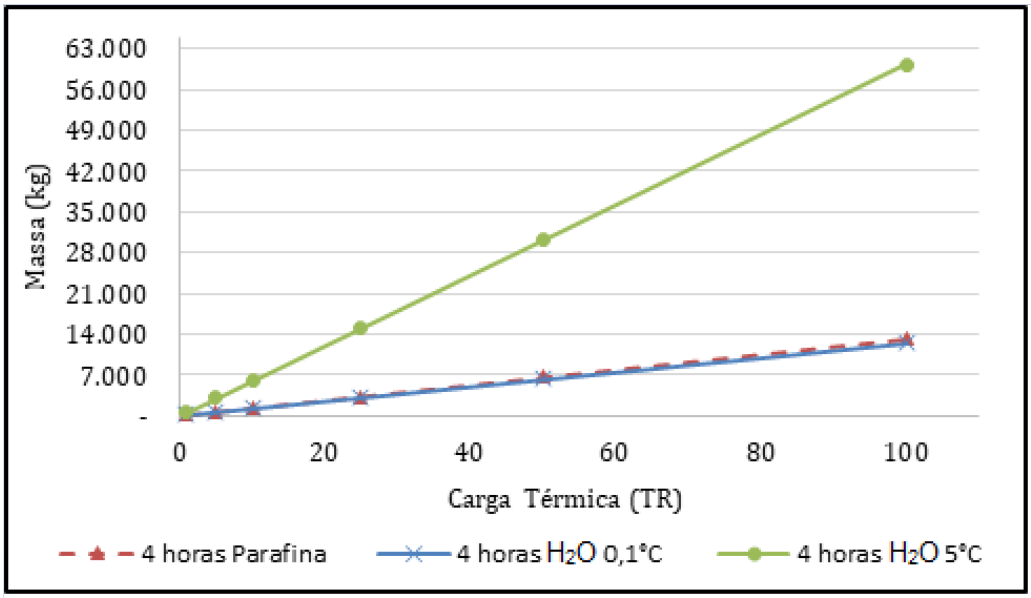
FIGURA 1. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 20°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 2, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 20°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

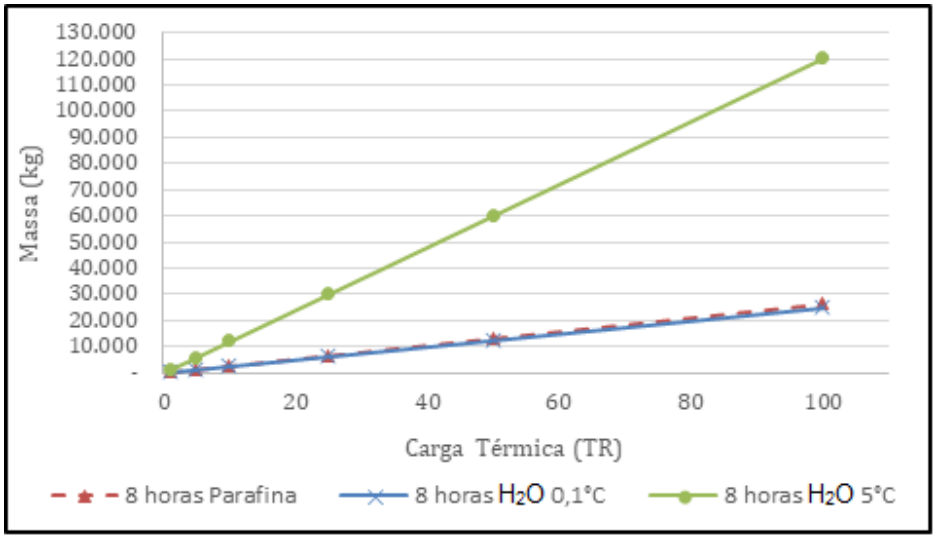
FIGURA 2. Quantidade de massa para 4 horas de utilização do TES, temperatura inicial de 20°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 3, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 20°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

FIGURA 3. Quantidade de massa para 8 horas de utilização do TES, temperatura inicial de 20°C.

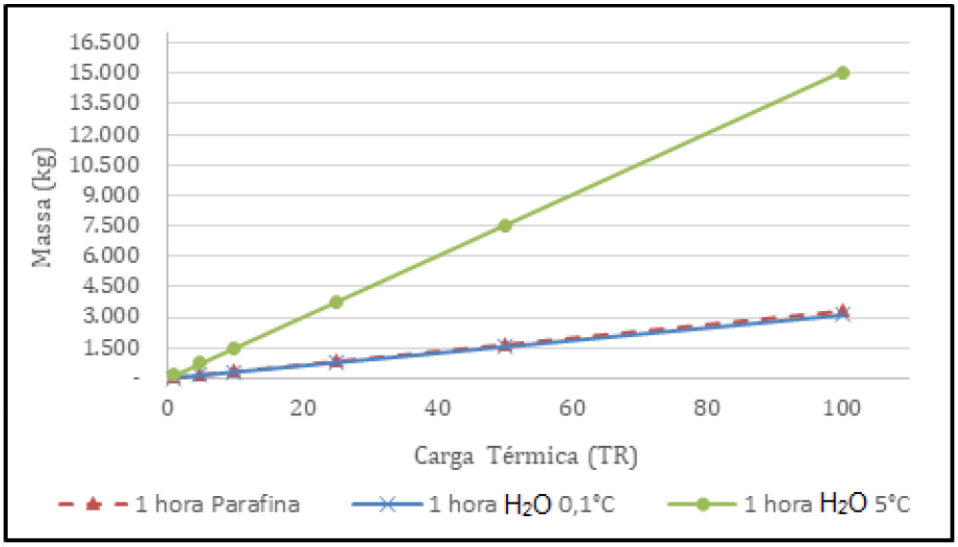


Fonte: elaborado pelos autores.

Considerando o cenário de temperatura do ambiente de 25°C, podem ser observados a seguir os gráficos variando a quantidade de horas.

Nas Figuras 4, 5 e 6 pode-se observar que o comportamento do sistema se repete em relação às Figuras 1, 2 e3. Porém a massa calculada é menor, menos de 10%, em relação aos outros. Considerando o cenário de temperatura do ambiente de 30°C, podem ser observados a seguir os gráficos variando a quantidade de horas.

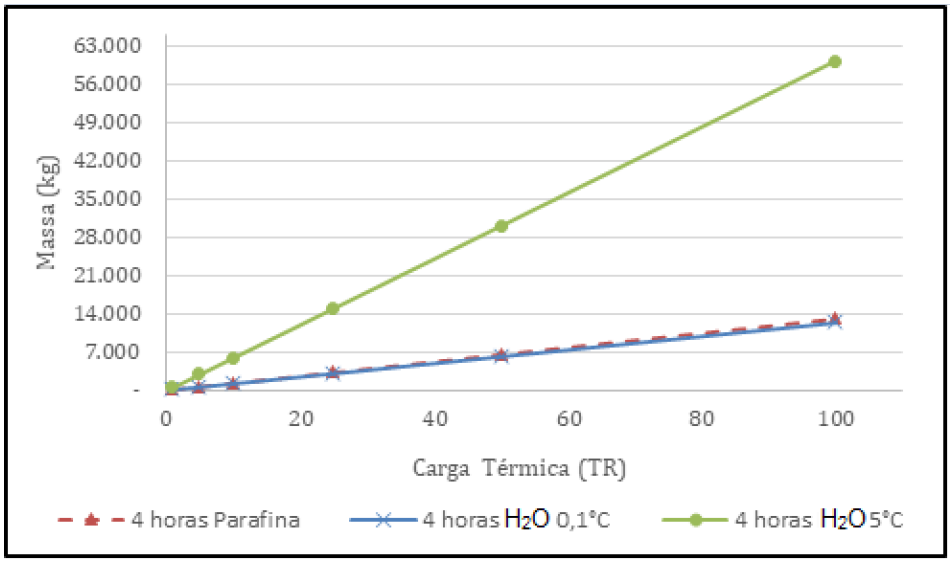
FIGURA 4. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 25°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 5, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 25°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

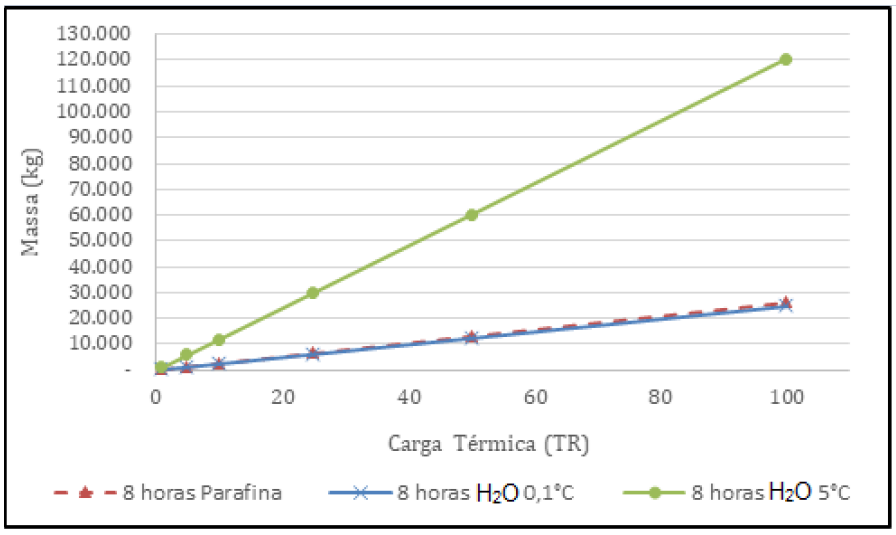
FIGURA 5. Quantidade de massa para 4 horas de utilização do TES, temperatura inicial de 25°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 6, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 25°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

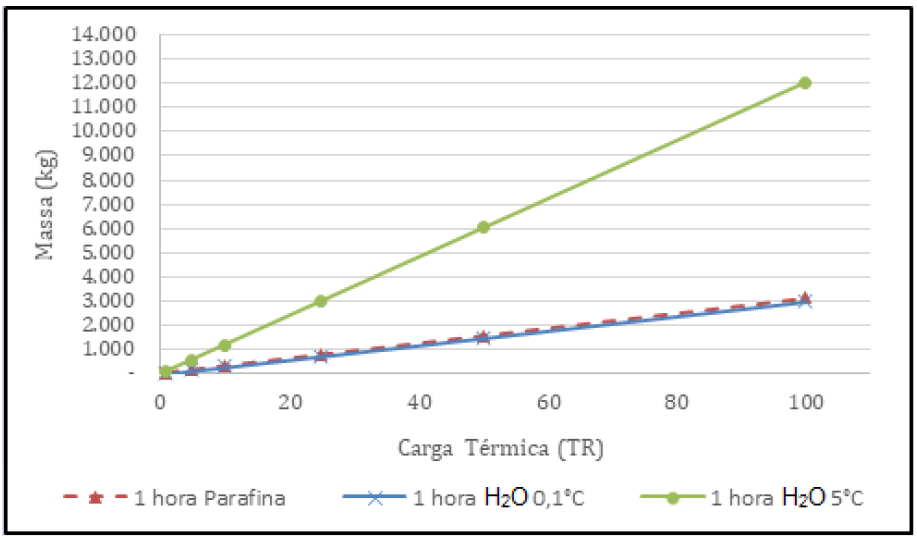
FIGURA 6. Quantidade de massa para 8 horas de utilização do TES, temperatura inicial de 25°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Nas Figuras 7, 8 e 9, pode ser observado que o comportamento do sistema se repete em relação as figuras anteriores. Porém a massa calculada é menor, menos de 10%, em relação aos outros. Considerando o cenário de temperatura do ambiente de 35°C, podem ser observados a seguir os gráficos variando a quantidade de horas.

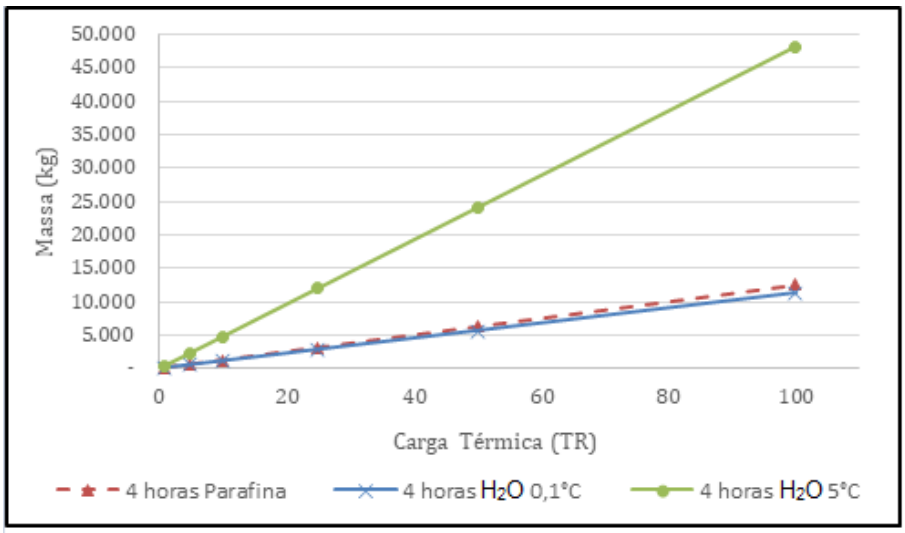
FIGURA 7. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 30°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 8, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 30°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

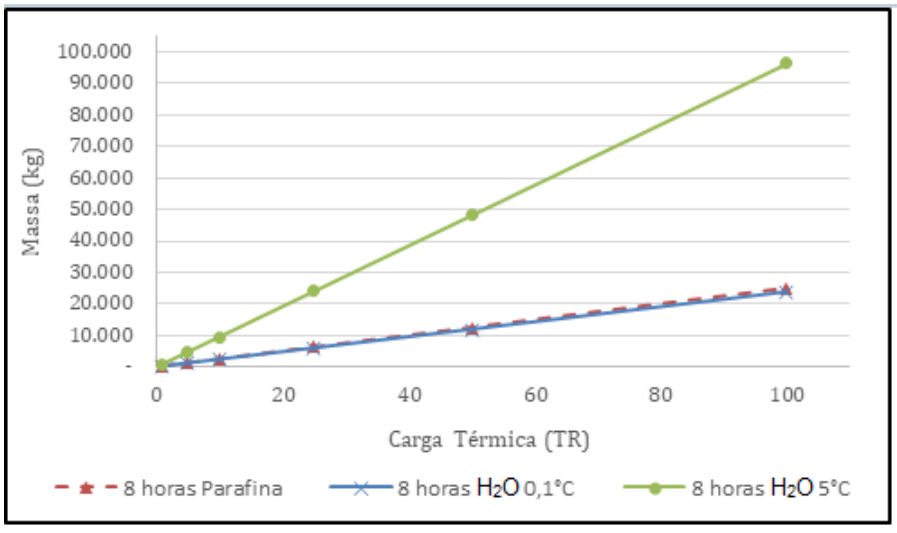
FIGURA 8. Quantidade de massa para 4 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 30°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 9, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 30°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

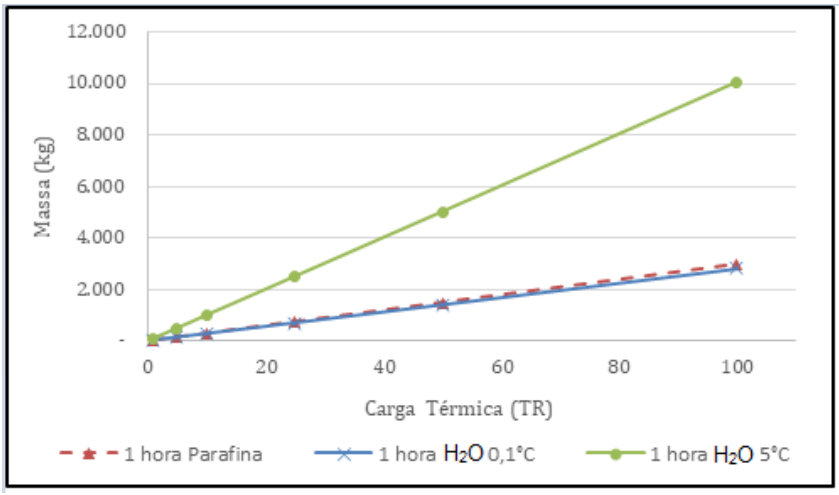
FIGURA 9. Quantidade de massa para 8 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 30°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Nas Figuras 10, 11 e 12, observa-se que o comportamento do sistema se repete em relação as figuras anteriores. Porém a massa calculada é menor, menos de 10%, em relação aos outros. Seria importante descrever no texto de que nelas a temperatura inicial do PCM é maior. Além disso, quando você relata que é necessário uma massa menor poderia incluir que essa necessidade de menor massa deve-se ao fato de maior energia armazenada na forma de sensível em virtude de uma maior diferença de temperatura

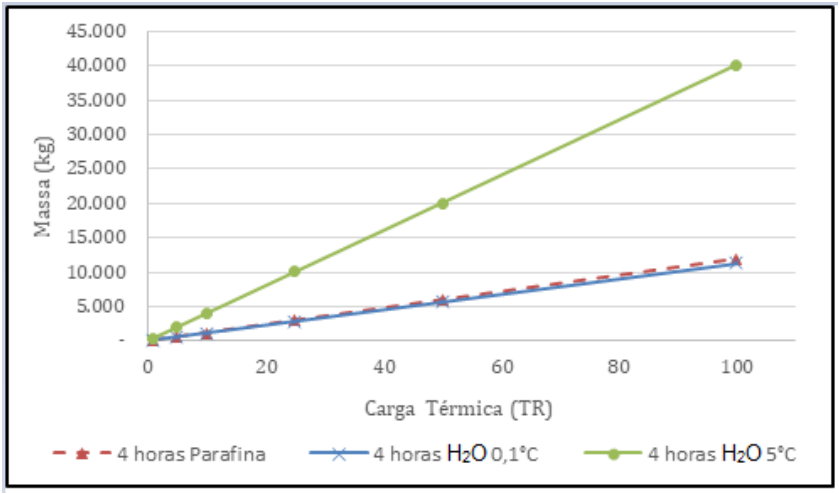
FIGURA 10. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 35°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 11, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 35°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

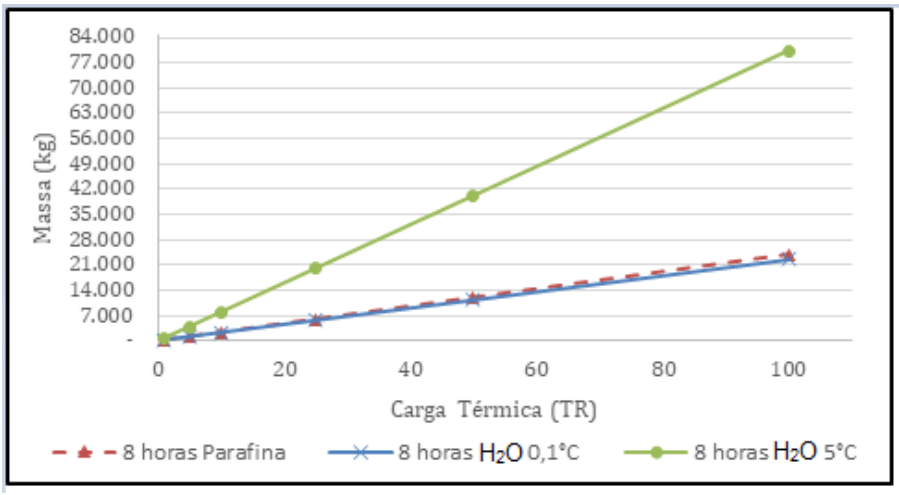
FIGURA 11. Quantidade de massa para 4 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 35°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 12, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 35°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

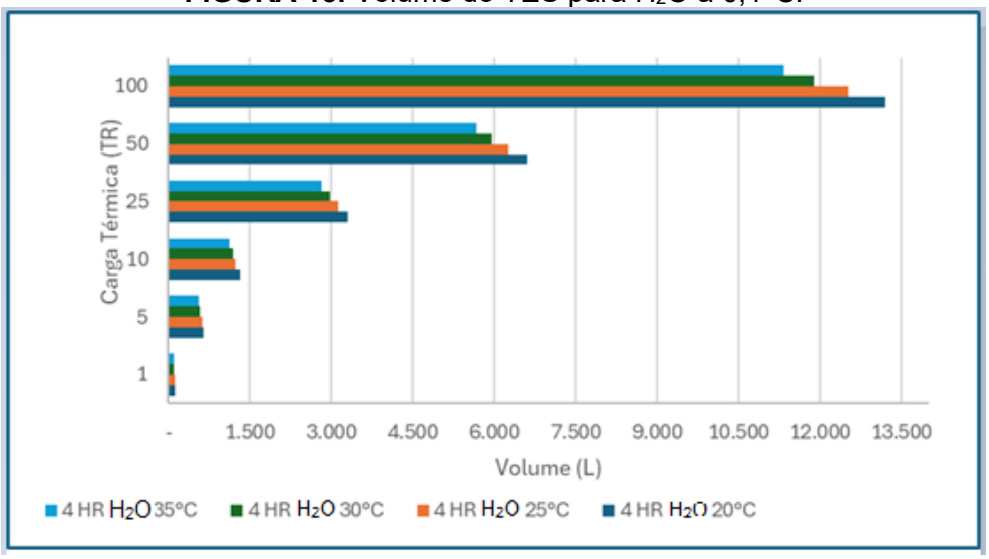
FIGURA 12. Quantidade de massa para 8 hora de utilização do TES, temperatura inicial de 35°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Após apresentar a quantidade de massa calculada para cada cenário, foi necessário entender como essa variação de massa se traduz em volume, mas com um foco direcionado para apenas 4 horas de utilização do TES, como uma alternativa média entre os cenários calculados para variação do PCM considerada inicialmente.
Nas Figuras 13, 14 e 15, observa-se que o volume da água no TES a mesma temperatura da parafina (5°C) é quase 5 vezes maior que a parafina, ainda analisando os gráficos percebe-se que quanto maior a carga térmica, maior o volume, aumentando proporcionalmente.

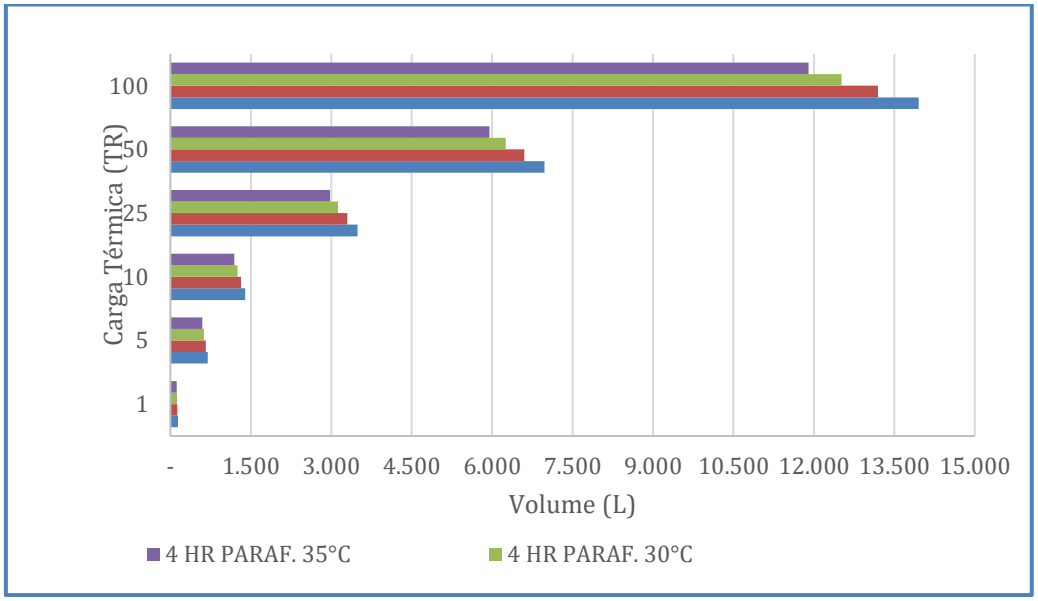
FIGURA 13. Volume do TES para H_2O à 0,1°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 14, pode-se observar que, para Parafina como PCM, é necessário um volume quase igual do que para água com temperatura de 0,1°C, é possível também afirmar que quanto menor a temperatura do dia maior é o volume requerido.

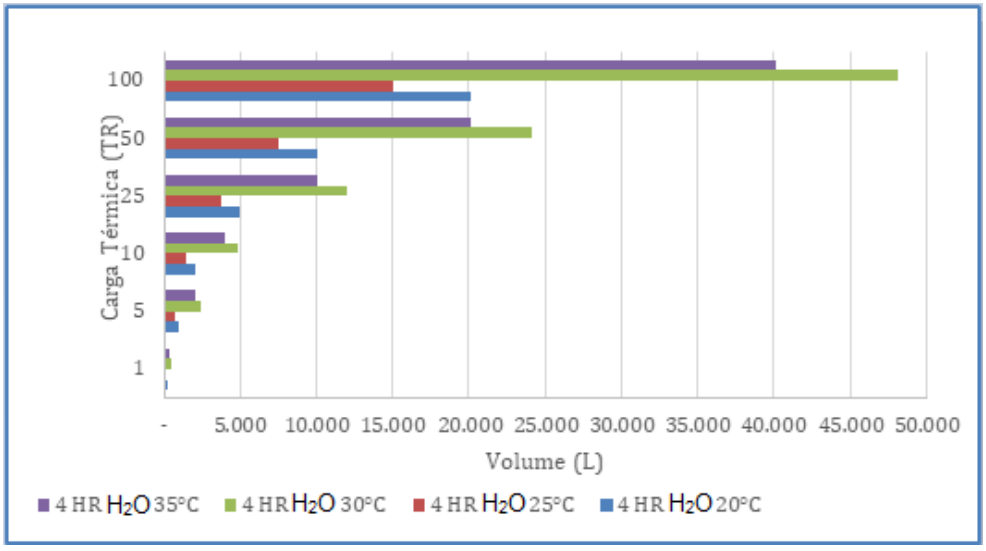
FIGURA 14. Volume do TES para Parafina.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 15, pode-se observar, que para água à 5,0°C os volumes são quase 3 vezes maiores que os volumes dos demais fluidos. É possível também afirmar que para água à 5,0°C o comportamento dos volumes é variado sendo o de temperatura ambiente de 30,0°C, o maior.

FIGURA 15. Volume do TES para H_2O à 5,0°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Conclusão

Os resultados das simulações fornecem uma compreensão detalhada de como a massa e o volume do TES variam em função da carga térmica e da temperatura inicial dos materiais de mudança de fase (PCM). As análises demonstram que, para períodos mais longos de armazenamento de energia térmica, há uma necessidade proporcionalmente maior de massa. Especificamente, para períodos de 1, 4 e 8 horas, observou-se que a massa necessária para o armazenamento é, respectivamente, 4 e 8 vezes maior conforme a duração aumenta.

A parafina apresentou uma vantagem significativa em relação à água como PCM. Quando a temperatura inicial dos PCMs era de 5°C, a massa necessária de parafina foi aproximadamente 82,6% menor que a da água para armazenar a mesma quantidade de energia térmica. Adicionalmente, a água a 0,1°C apresentou um comportamento semelhante ao da parafina, com uma variação de apenas 5,7%.

Além disso, as simulações mostraram que o volume necessário para o armazenamento térmico varia significativamente entre os diferentes PCMs e condições térmicas. Em termos de volume, a água a 5°C requer volumes até 5 vezes maiores em comparação com a parafina, destacando a eficiência volumétrica deste último. Por exemplo, para um período de armazenamento de 4 horas, o volume da água a 5°C foi três vezes maior que o volume da parafina na mesma temperatura.

Acredito ser interessante em outro momento realizar uma análise mais detalhada de Capex e Opex para poder subsidiar o aceite do proprietário ou usuário do sistema TES em comparação com os sistemas atuais.

Referências

Hasnain, S.M., 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. **Energy Convers. Manag.** 39, 1127–1138. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9

López-Navarro, A., Biosca-Taronger, J., Corberán, J.M., Peñalosa, C., Lázaro, A., Dolado, P., Payá, J., 2014. Performance characterization of a PCM storage tank. **Appl. Energy** 119, 151–162. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.041

Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F.J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin, Kannan, A.M., 2019. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: **A review. Int. J. Heat Mass Transf.** 129, 491–523. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126

Oró, E., De Gracia, A., Castell, A., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. **Appl. Energy** 99, 513–533. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058

Selvnes, H., Allouche, Y., Manescu, R.I., Hafner, A., 2021. Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials. **Therm. Sci. Eng. Prog.** 22, 100807. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100807

Torregrosa-Jaime, B., López-Navarro, A., Corberán, J.M., Esteban-Matías, J.C., Klinkner, L., Payá, J., 2013. Experimental analysis of a paraffin-based cold storage tank. **Int. J. Refrig.** 36, 1632–1640. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.05.001

Modelamento Unidimensional de um Sistema Lança-Chamas Utilizando o Software GT-Power

Jônatas Soares Rodrigues[1] (0009-0000-6439-6137), Thiago Augusto Araújo Moreira [1] (0009-0004-0553-5116)

1 Departamento de engenharia mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Resumo: A demanda mundial pela descarbonização exige a redução das emissões do setor de transporte, responsável por cerca de 25% das emissões de CO_2, NO_x e HC. Veículos elétricos e células de combustível são soluções promissoras, mas os motores de combustão interna permanecerão relevantes durante a transição energética, especialmente em países em desenvolvimento. Assim, é essencial aprimorar a eficiência e reduzir as emissões desses motores. Uma estratégia eficaz é o uso de misturas empobrecidas, que reduzem o consumo específico de combustível. Contudo, motores SI convencionais enfrentam dificuldade em iniciar a combustão em condições de mistura pobre. Para superar esse desafio, os sistemas lança-chamas, que intensificam a energia nos estágios iniciais da combustão, apresentam-se como uma alternativa viável. Este trabalho modela, de forma unidimensional, utilizando o software *GT-Power*, um sistema lança-chamas de um motor alimentado com gasolina hidratada. O objetivo é avaliar o potencial de redução no consumo específico e nas emissões com a implementação da pré-câmara de combustão e o uso de misturas empobrecidas. Para isso, foi modelado o motor Fiat 1.6 16V (HI-TORQUE) e o protótipo adaptado desse motor com PC. Além do modelo com o motor original utilizando mistura estequiométrica, será modelado também o motor protótipo com fator λ variando de 1,00, 1,10, 1,20 e 1,30. A construção e a calibração dos modelos foram realizadas com dados experimentais previamente coletados.

Palavras-chave: Pré-câmara, simulação, Descarbonizacão, Mistura empobrecida, motor.

Introdução

Nas últimas décadas, acordos globais, como o Acordo de Paris de 2015, reuniram 195 países para limitar o aquecimento global a menos de 2°C. Para alcançar essa meta, é essencial reduzir as emissões de gases de efeito estufa, com destaque para a descarbonização do setor automobilístico responsável 25% das emissões de gases de efeito estufa, dos quais 10% provêm de carros de passeio e vans (IEA). A frota mundial ultrapassou 1,2 bilhão e deve alcançar 1,7 bilhões até 2030 (Rahnama; Paykani; Reitz, 2017). Apesar do avanço de novas tecnologias, os motores de combustão interna (MCI) continuarão sendo a principal fonte de energia no setor, com 80% dos automóveis de passeio e vans em 2030 ainda movidos a combustão interna (IEA, [*s. d.*]).

Diversos estudos buscam reduzir as emissões de poluentes e aprimorar a eficiência dos MCI's. Para alcançar esse objetivo, uma solução é o uso de misturas ar/combustível empobrecidas, que, embora vantajosas, apresentam variabilidade cíclica devido à lenta combustão, exigindo mais energia para viabilizar a ignição (Desantes et al., 2019; Sakai et al., 1974). Essa deficiência pode ser contornada pela estratificação da carga com um sistema lança-chamas, que utiliza uma pré-câmara de combustão (PC), conhecida como *torch ignition system* (Da Costa et al., 2020; Novella

et al., 2022). A estratificação forma uma mistura rica ao redor da vela de ignição e uma pobre no restante da câmara, reduzindo as emissões de HC, CO_2 e NOx (Sakai et al., 1974).

O desenvolvimento e a análise de sistemas como esses demandam ferramentas que permitam avaliar, com precisão, os impactos na eficiência e nas emissões dos motores. Modelos unidimensionais são essenciais no desenvolvimento de MCI, pois permitem avaliar a eficiência e emissões, além de reduzir tempo e custo no desenvolvimento de novas tecnologias. Utilizando simulações CFD, esses modelos possibilitam analisar a influência de parâmetros e condições operacionais na combustão. Modelos 1D são amplamente usados para definir condições de contorno na modelagem 3D, com erros médios de cerca de 5% (Assis, 2022; López; Nigro, 2010).

Diversos softwares são utilizados para a criação de modelos, destacando-se entre eles o GT-POWER, por sua capacidade de prever condições estacionárias e transitórias de sistemas de motores. Ele fornece resultados detalhados, como eficiência volumétrica, potência, torque, fluxos em todas as passagens, pressão e temperatura dos gases, temperaturas das paredes de tubos e divisores de fluxo, taxas de combustão preditivas para motores diesel de injeção direta (DI) e motores de ignição por centelha (SI), emissões de NO_x e fuligem em motores diesel DI, química de pós-tratamento, transferência de calor, cálculo de ruído em microfone externo e níveis de ruído (GAMMA TECHNOLOGIES, 2016).

Com base nesses recursos, objetivo deste trabalho é o desenvolvimento, a calibração e a validação de um modelo numérico unidimensional no software GT-POWER, visando representar um sistema lança-chamas. O modelo utiliza um motor de ignição por centelha adaptado com pré-câmara e é alimentado por uma mistura homogênea de gasolina E25, fundamentando-se em dados previamente coletados em uma bancada dinamométrica.

Metodologia

Dados experimentais

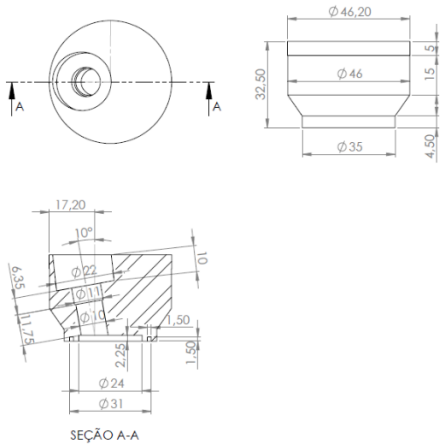
O modelo unidimensional desenvolvido neste trabalho baseou-se no protótipo de um sistema lança-chamas elaborado por Moreira (2014). Os ensaios experimentais foram conduzidos em uma sala de testes equipada com um dinamômetro de bancada W230, do tipo passivo e elétrico, com atuação por corrente parasita. Esse equipamento, fabricado pela TCA/HORIBA, está instalado no laboratório do Centro de Tecnologia da Mobilidade (CTM) da UFMG.

O motor de combustão interna modelado foi o FIAT 1.6 16V (HI-TORQUE), que possui quatro cilindros e 16 válvulas. Cada cilindro possui um diâmetro de 80,5 mm e curso de 78,4 mm. A pré-câmara é construída em aço ABNT 420, com volume de 3,66 cm³, enquanto o volume da câmara principal é de 46,35 cm³. As demais dimensões da pré-câmara estão apresentadas na Figura 1. Para manter a razão de compressão original, foi realizada a usinagem do cabeçote modificado, removendo-se 0,73 mm de sua altura. Essa modificação garantiu a manutenção da relação de compressão em 9,5:1.

Nove pontos de operação foram utilizados para a caracterização do protótipo, combinando três valores de rotação e três níveis de torque. As rotações selecionadas foram 2500, 3500 e 4500 RPM, enquanto os níveis de torque correspondem a 50%, 30% e 20% do torque máximo do motor original. Durante os testes, em cada ponto de operação, foram medidos ou determinados os seguintes parâmetros: dados de desempenho, rotação, pressões nos sistemas de admissão, escape e no

interior do cilindro, concentrações das espécies CO_2, HC e N_2, além das temperaturas dos gases na câmara, da água de refrigeração e dos gases de escapamento.

Figura 1: Geometria interna da pré-câmara



Fonte: Moreira, 2014

Os testes foram divididos em duas etapas. Na primeira, o motor original operou com mistura estequiométrica. Na segunda, os testes com o protótipo equipado com PC foram realizados, variando-se o fator λ para os valores 1,00, 1,10, 1,20 e 1,30 em cada ponto de operação. Em todas as etapas experimentais, foi utilizada gasolina tipo C.

Metodologia numérica

O modelamento no software GT-POWER é realizado por meio da subdivisão de cada parte e componente do motor em blocos. O funcionamento do motor é simulado utilizando equações físicas que descrevem os fenômenos associados às suas operações. A resolução dessas equações é realizada por meio do método de volumes finitos, no qual as grandezas escalares são tratadas como contínuas, enquanto as variáveis vetoriais são calculadas para cada fronteira do domínio. Utilizou-se o método implícito, que não requer interatividade. O cálculo das equações nos subvolumes é realizado de forma escalar, com base nos valores do subvolume anterior, permitindo que um novo valor seja calculado a partir da integração da derivada temporal na direção unidimensional x.

Para isso, o sistema do motor é dividido da seguinte maneira: 1. condições ambientais do ar atmosférico na entrada; 2. válvula borboleta do acelerador; 3. coletor de admissão; 4. eletroinjetores de combustível; 5. pórticos de admissão; 6. válvulas de admissão; 7. Cilindro, onde são definidas as funções de combustão; 8. conjunto bloco e virabrequim, onde são definidos os parâmetros geométricos e de atrito; 9. válvulas de exaustão; 10. pórtico de exaustão; 11. coletor de escape; 12. escapamento.

Modelo de atrito

O modelo de atrito mecânico disponível para uso no GT-POWER é representado pelo objeto de referência **'EngFrictionCF'**. Perdas auxiliares podem ser adicionadas a esse objeto caso não sejam conhecidas previamente (GAMMA TECHNOLOGIES, 2016). Esse modelo baseia-se no modelo de atrito proposto por Chen-Flynn, que correlaciona o atrito das partes móveis com a pressão no interior do cilindro. Na equação, a variável de interesse é a pressão média efetiva de fricção (*Friction Mean Effective Pressure*, FMPE).

Modelo de escoamento

Para resolver o escoamento interno do fluido no motor, o software utiliza as equações de continuidade, quantidade de movimento, energia e o Teorema do Transporte de Reynolds. O GT-Power adota uma análise unidimensional do escoamento na direção *x*, em que as grandezas e propriedades de interesse, como energia interna, densidade, pressão, energia interna específica e área da seção transversal, são representadas. Essas variáveis escalares são consideradas constantes em cada volume de controle, enquanto as variáveis vetoriais, como o fluxo de massa e a velocidade, são calculadas em cada fronteira. O modelamento do escoamento de ar para dentro do motor é realizado com base nos seguintes dados: geometria do sistema de admissão e escape, parâmetros geométricos do motor, coeficiente de descarga e *lift* das válvulas.

Modelos de combustão

A combustão do motor original foi modelada utilizando o modelo não preditivo WiebeSI. Esse modelo faz uso da função de Wiebe, a qual é obtida por meio da diferenciação da função de liberação de energia acumulada. O modelo permite implementar a taxa de queima, calculada a partir da pressão no cilindro. Além desses dados, são necessários os seguintes parâmetros: MBF 50, MBF 10-90, fração de combustível queimado e o expoente Wiebe. Esses valores são obtidos por meio do modelo de *Three Pressure Analysis* (TPA) do GT-POWER. O TPA é uma abordagem que utiliza três pressões medidas: admissão, cilindro e escape. Além dessas pressões, é necessário informar a temperatura no duto de admissão, a fração de EGR, os dados de injeção de combustível e a sincronização da faísca.

Modelos de transferência de calor

O modelo de transferência de calor utiliza a combinação de dois objetos de referência: ‘EngCylHeatTr’ e ‘EngCylTWall’. O primeiro permite a seleção do modelo de transferência de calor desejado, utilizado para calcular os coeficientes de transferência de calor dentro do cilindro. Neste trabalho, adotou-se o modelo ‘WoschiniGT’, que calcula o coeficiente de transferência de calor por convecção em função da pressão, temperatura e da velocidade dos gases no cilindro, além de duas constantes definidas como 3,01426 e 0,50. Esta velocidade é calculada utilizando a pressão e temperatura no início da compressão, o volume deslocado, o volume total do cilindro, a velocidade do pistão e a diferença de pressão no cilindro entre a operação do motor com e sem combustão. Esse cálculo envolve também mais duas constantes, que variam de acordo com os parâmetros de operação do motor. O segundo é utilizado para definir as temperaturas das paredes do cabeçote, pistão e camisas do cilindro, considerando a dificuldade de obtenção desses dados de forma experimental. O manual sugere as seguintes temperaturas: 550 K no cabeçote, 590 K no pistão e 450 K nas camisas do cilindro (GAMMA TECHNOLOGIES, 2016).

Calibração do modelo

Para assegurar a fidelidade do modelo numérico, é indispensável realizar sua calibração com base em dados experimentais. O software disponibiliza ferramentas que podem ser aplicadas às equações de escoamento, transferência de calor e atrito. A calibração é realizada utilizando dados experimentais obtidos para as seguintes condições de operação: 2500 rpm com 30% do torque máximo e 4500 rpm com 50% do torque máximo, ambas com mistura estequiométrica. O objetivo da calibração é minimizar os erros entre os valores medidos de pressão e o parâmetro **MBF 50%**.

Referencias

ASSIS, M**.** ***Simulação numérica 1d do desempenho de um motor monocilíndrico com razão volumétrica de compressão variável operando com e100***. 2022. 123 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – CEFET-MG - Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://sig.cefetmg.br/sigaa/public/programa/defesas. Acesso em: 10 nov. 2024.

BISWAS, S.; QIAO, L. Ignition of ultra-lean premixed H2/air using multiple hot turbulent jets generated by pre-chamber combustion. **Applied Thermal Engineering**, [*S. l.*], v. 132, p. 102–114, mar. 2018. Disponível em: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.073. Acesso em: 19 mar. 2024.

DA COSTA, R. B. R**.** *et al.* Exploring the lean limit operation and fuel consumption improvement of a homogeneous charge pre-chamber torch ignition system in an SI engine fueled with a gasoline-bioethanol blend. **Energy,** [*S. l.*], v. 197, p. 117300, abr. 2020. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431117353000. Acesso em: 19 mar. 2024.

DESANTES, J. M. *et al.* Achieving Ultra-Lean Combustion Using a Pre-Chamber Spark Ignition System in a Rapid Compression-Expansion Machine**. SAE Technical Paper**, n. 2019-01–0236. Warrendale, PA: SAE International, 2 abr. 2019. Disponível em: https://www.sae.org/publications/technical-papers. Acesso em: 29 mar. 2024.

GAMMA TECHNOLOGIES**. Engine Performance Application Manual**. [*S. l.*]: Gamma Technologies, 2016.

IEA. **Cars and Vans - Energy System**. [*s. d.*]. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/transport/cars-and-vans. Acesso em: 31 mar. 2024.

LOPEZ, E.; NIGRO, N. Validation of a 0D/1D computational code for the design of several kind of internal combustion engines. **Latin American applied research**, [*S. l.*], v. 40, p. 175–184, 1 abr. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262649964. Acesso em: 20 nov. 2024.

MOREIRA, T. A. **A.** ***Análise e caracterização de um sistema de ignição por lança chamas operando com carga homogênea*****.** Accepted: 2019-08-14T16:56:45Z, 22 dez. 2014. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9UJT28. Acesso em: 13 nov. 2023.

NOVELLA, R. *et al.* Numerical analysis of the passive pre-chamber ignition concept for light duty applications. **Applied Thermal Engineering,** [*S. l.*], v. 213, p. 118610, ago. 2022. Disponível em: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118610. Acesso em: 19 mar. 2024.

RAHNAMA, P.; PAYKANI, A.; REITZ, R. D. A numerical study of the effects of using hydrogen, reformer gas and nitrogen on combustion, emissions and load limits of a heavy duty natural gas/diesel RCCI engine. **Applied Energy**, [*S. l.*], v. 193, p. 182–198, maio 2017. Disponível em: 10.1016/j.apenergy.2017.02.023. Acesso em: 20 mar. 2024.

SAKAI, Y. *et al.* Combustion Characteristics of the Torch Ignited Engine. *In*: **International stratified charge engine conference**, 1 fev. 1974. [*S. l.*: *s. n.*], 1 fev. 1974. p. 741167. Disponível em: https://www.sae.org/content/741167/. Acesso em: 28 mar. 2024.

Influência de Variações Geométricas Poço de Alimentação do Espessador na Hidrodinâmica da Polpa com CFD

Leonardo Vinicius Moreira Cortes[1] (https://orcid.org/0009-0009-8526-6118), José Leôncio Fonseca Souza[1] (https://orcid.org/0000-0003-2319-0540)

1 *Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Avenida Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte, Minas Gerais 30510-000, Brasil.*

Palavras-chave: Fluidodinâmica computacional; Estrutura adicional; campo de escoamento; desempenho de floculação.

Introdução

A aplicação de espessadores na mineração, especialmente no desaguamento de rejeitos de minério, tem se tornado cada vez mais relevante devido às transformações ocorridas na indústria mineral brasileira nos últimos anos. O aumento significativo das operações de tratamento de rejeitos e empilhamento a seco reflete a necessidade urgente de mitigar os riscos associados às barragens de rejeitos, impulsionada pelos trágicos rompimentos ocorridos no Brasil, como os de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Esses eventos não apenas geraram impactos socioambientais devastadores, mas também pressionaram o setor a adotar tecnologias mais seguras e eficientes para a gestão de rejeitos. Nesse contexto, os espessadores desempenham um papel fundamental, permitindo a separação sólido-líquido necessária para reduzir o teor de água dos rejeitos, possibilitando sua disposição a seco e contribuindo para operações mais sustentáveis e seguras.

Nas operações de processamento mineral, especialmente na produção de minério de ferro e outros minerais, o espessador é essencial para a separação sólido-líquido, tanto na produção do concentrado quanto na disposição do rejeito. A adição de floculante na entrada do espessador promove a floculação das partículas finas, formando agregados que aceleram a sedimentação. Isso resulta em água limpa (transbordo) na parte superior do espessador e sedimento sólido concentrado (concentrado/rejeito) na parte inferior, completando o processo de separação (Chaves et al., 2013).

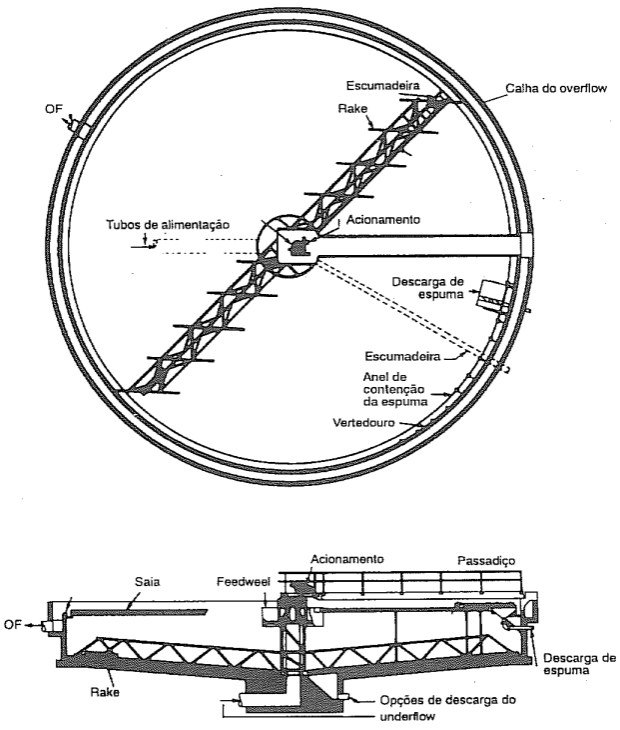
O espessador é um equipamento de grandes dimensões, que influencia diretamente o layout das plantas industriais, e sua otimização pode trazer benefícios significativos para a indústria. Seus diâmetros podem atingir até 100 metros, com alturas que ultrapassam 20 metros, conforme proporções ilustradas na Figura 1. Nesse contexto, pesquisas indicam que o poço de alimentação do espessador é uma das partes mais críticas para o funcionamento eficiente otimização do equipamento (Nguyen et al., 2012). Como mostrado na Figura 2, a principal função do poço de alimentação é dissipar a energia cinética do fluxo de entrada, permitindo que o fluido entre no espessador em regime de escoamento laminar. Além disso, o poço é responsável por coagular as moléculas de floculante e as partículas sólidas, formando agregados grandes, estáveis e densos (Chaves et al., 2013). A eficácia dessas funções é influenciada pelas características do campo de

escoamento interno, que dependem das propriedades do material processado (como polpa de concentrado e rejeito), da velocidade de alimentação e, especialmente, da geometria do poço de alimentação. Portanto, é essencial estudar o comportamento do escoamento em diferentes geometrias do poço (Chaves et al., 2013).
Atualmente, tanto fabricantes de equipamentos (GHESHLAGHI et al., 2013) quanto pesquisadores acadêmicos exploram as características do campo de escoamento no poço de alimentação. O comportamento da floculação com diferentes condições de processo e estruturas é investigado através de modelos físicos em pequena escala, testes piloto e simulações de fluidodinâmica computacional (CFD). No entanto, grande parte dos estudos relevantes são propriedade intelectual dos fabricantes e não são divulgados publicamente por razões estratégicas.

Recentemente, um estudo acadêmico avaliou o impacto de estruturas adicionais no desempenho do poço na entrada do espessador comparando três geometrias conforme figura abaixo, usando modelos físicos e experimentos PIV *Particle Image Velocity* (Wu et al., 2024). As características do campo de escoamento, como distribuição de velocidade e energia, foram analisadas, e o desempenho da floculação foi avaliado com base no tamanho médio das partículas e na dimensão dos agregados. Além disso, a turbidez do transbordo foi comparada para avaliar a eficácia da separação.

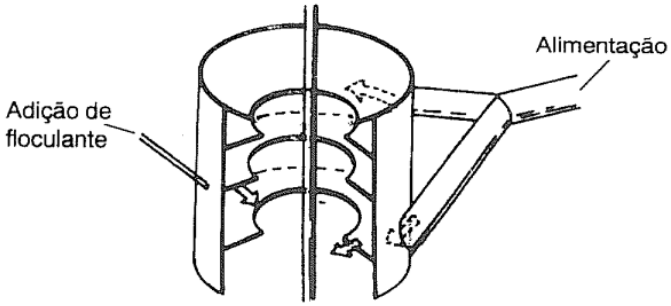
O objetivo desse estudo é validar um modelo CFD para a análise de geometrias de poços de alimentação de espessadores, aproveitando os resultados experimentais recentes (Wu et al., 2024). A validação e os insights obtidos podem guiar pesquisas futuras e a aplicação prática, incluindo a geometrias comerciais. Esses dados são fundamentais para compreender os efeitos complexos das estruturas adicionais no campo de fluxo e para aprimorar a aplicação da floculação na gestão de recursos de rejeito.

Figura 1 – Espessador



(Chaves et al., 2013)

Figura 2 - Poço de alimentação



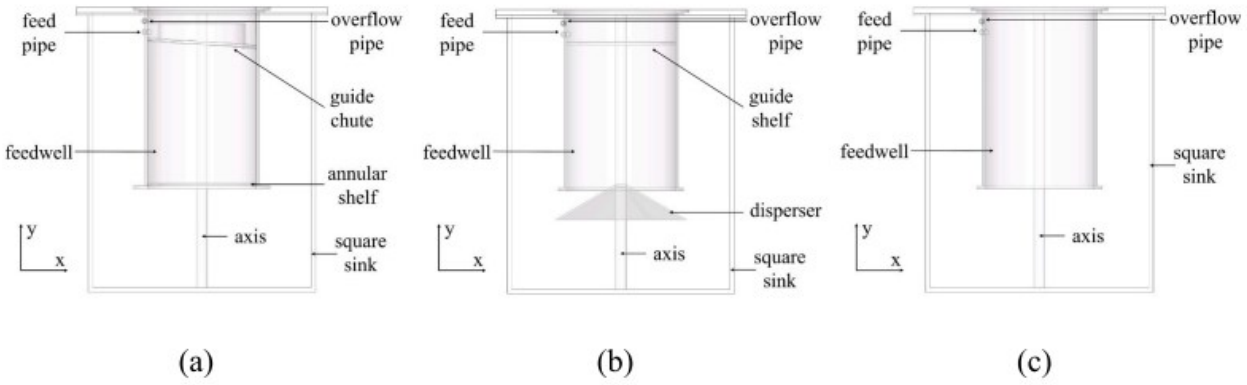
(Chaves et al., 2013)

Metodologia

A metodologia deste trabalho está estruturada em três etapas principais, com o objetivo de compreender o impacto das variações das geometrias do poço de alimentação no desempenho do espessadores e validar o modelo de simulação CFD proposto.

Na primeira etapa, será realizada a modelagem tridimensional em software apropriado das geometrias do poço de alimentação conforme experimento realizado por Wu et al., 2024 e os 3(três) modelos na figura na Figura 3.

Figura 3 - Modelos de poço de alimentação de espessador com diferentes estruturas adicionais: (a) poço de alimentação GC; (b) poço de alimentação GS; (c) poço de alimentação N



(Wu et al., 2024)

A segunda etapa é focada na validação do modelo CFD. Primeiramente, a partir do modelo representativo das geometrias estudadas, ajustam-se os parâmetros de escoamento, turbulência e sedimentação para simular de maneira precisa os fenômenos observados experimentalmente. Em seguida, e os resultados serão obtidos comparados com os dados experimentais. Caso sejam identificadas discrepâncias, ajustes serão feitos nos parâmetros do modelo, e novas simulações serão realizadas até que o modelo seja validado de forma satisfatória.

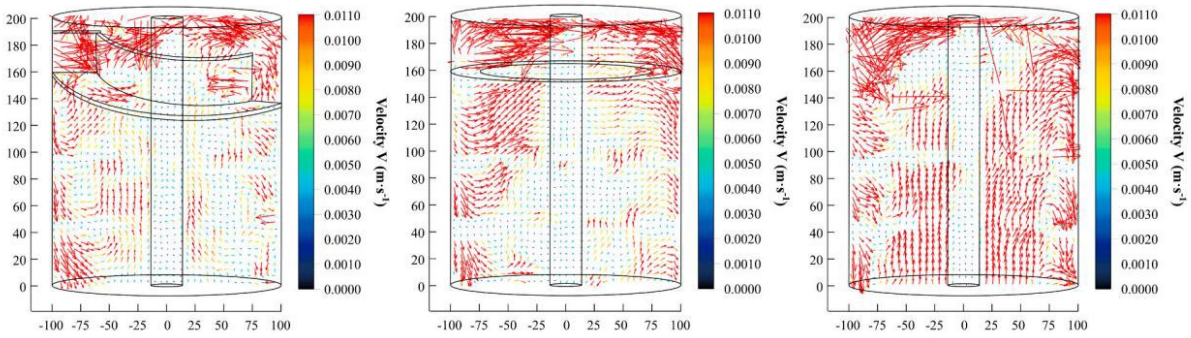
A terceira e última etapa envolve a aplicação dos resultados para a otimização prática. Com base nos dados obtidos e na validação do modelo CFD, serão desenvolvidas recomendações para o design das geometrias do poço de alimentação, buscando aprimorar a eficiência da floculação e a separação sólido-líquido. Além disso, serão avaliadas sugestões de ajustes operacionais nos espessadores para melhorar seu desempenho prático. Também será feita uma análise sobre a aplicabilidade dos resultados para diferentes cenários industriais e configurações de espessadores comerciais.

Em resumo, a metodologia do trabalho abrange a análise teórica e experimental das geometrias do poço de alimentação, a validação e o ajuste do modelo CFD, e a aplicação dos resultados para otimizar o design e as operações dos espessadores.

Resultados Esperados

Espera-se obter resultados da simulação consistentes com o obtido experimentalmente e medir os erros obtidos. Os perfis de velocidade serão comparados qualitativamente com os obtidos experimentalmente conforme diagramas da Figura 4, bem como quantitativamente com relação aos resultados esperados.

Figura 4 - Perfis de velocidade obtidos experimentalmente pelo método PIV.



(a) (b) (c)

(Wu et al., 2024)

Também, espera-se obter insights sobre aprimoramento de projeto e parâmetros operacionais dos espessadores, para dar subsídio para estudos de melhoria de eficiência dos equipamentos.

Referências

CHAVES, Arthur Pinto et al. Espessamento. In: CHAVES, Arthur Pinto et al. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**: Desaguamento, Espessamento e Filtragem. 4. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2013. v. 2, cap. 2, p. 54-158. ISBN 978-85-7975-072-4.

MAJID EBRAHIMZADEH GHESHLAGHI; ATAALLAH SOLTANI GOHARRIZI; ALIREZA AGHAJANI SHAHRIVAR. Simulation of a semi-industrial pilot plant thickener using CFD approach. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 23, n. 1, p. 63–68, 1 jan. 2013.

NGUYEN, T. V.; FARROW, J. B.; SMITH, J.; FAWELL, P. D. Design and development of a novel thickener feedwell using computational fluid dynamics. In: JEWELL, R.; FOURIE, A. B.; PATERSON, A. (Eds.). **Paste 2012: Proceedings of the 15th International Seminar on Paste and Thickened Tailings.** Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2012. p. 105-119.

WU, P. et al. Revealing the influence of additional structure on the flow field characteristics and flocculation performance in thickener feedwell through PIV experiments. **Powder Technology**, v. 439, p. 119748, 1 abr. 2024.

.

Revisão Bibliográfica e Proposta de Agenda de Pesquisa: Aplicação de Softwares *Open Source* no Ensino de Fluxogramas de Engenharia

Pedro Coelho Silva[1] (0000-0003-1385-0971),
André Bücker de Deus[2] (0009-0006-8889-5970),
Artur Caron Mottin[1] (0000-0001-6793-9926)

1 Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

2 Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo: O ensino de engenharia no Brasil, mesmo com os desenvolvimentos nos últimos anos, ainda é muito limitado devido à escassez de recursos. Como solução possível está o uso de aplicações gratuitas e de código livre. Tanto as soluções educacionais apresentadas quanto as soluções *open source* disponíveis ainda estão longe das demandas do mercado de engenharia industrial, em especial os documentos multidisciplinares, como os Fluxogramas de Engenharia. A presente investigação busca detalhar o atual estado do mercado e suas limitações através de uma revisão bibliográfica segundo a metodologia recomendada pela PRISMA. Os resultados confirmaram a limitação das aplicações observadas, mas destacou duas ferramentas *open source* com potencial: as linguagens de programação de sistemas Modelica e SFILES 2.0.

Palavras-chave: P&ID, Pesquisa bibliométrica, Fluxogramas de engenharia, Engenharia industrial.

Introdução

O ensino de engenharia desempenha um papel crucial no suprimento, direta e indiretamente, de diversas demandas dos mercados. Situações desafiadoras, como a pandemia de COVID-19, demandou a adaptação das metodologias frente às restrições e novas tecnologias, agilizando a integração e virtualização do ensino (DE FREITAS *et al.*., 2022; LESSINGER e ABAIDE, 2021). De forma similar, a integração entre a formação acadêmica e as demandas do mercado são importantes para a empregabilidade dos graduados e podem colaborar no desenvolvimento tecnológico do país (DE BARROS *et al.*., 2024).

No Brasil as instituições de ensino enfrentam o grande desafio da falta de recursos, criando um descompasso entre a teoria e prática. A ausência de laboratórios e equipamentos comprometem a experiência e acaba limitando a atuação dos alunos. Essa falta de infraestrutura é agravada pela escassez de investimentos para acesso à softwares e hardware atualizados (ALEXANDRE, MELO e DE SOUSA, 2024; DE FREITAS *et al.*., 2022; LESSINGER e ABAIDE, 2021).

Outro ponto crítico é a dependência de plataformas proprietárias, geralmente atreladas a assinaturas ou custos recorrentes. Mesmo as empresas apresentando gratuidade ou descontos para as instituições de ensino, limitam a autonomia tecnológica e podem exercer a comercialização dos dados dos usuários (DE FREITAS, ARAUJO e HEIDEMANN, 2022).

Assim surge a possibilidade de utilizar sistemas de acesso livre, do inglês *open source*. Essas soluções superam as limitações de recursos, inclusive de dependência de hardware, promovendo uma educação mais crítica e emancipada (DE FREITAS, ARAUJO e HEIDEMANN, 2022; LESSINGER e ABAIDE, 2021). A aplicação dessa metodologia não se limita à redução de custos, mas também incentiva a cultura de compartilhamento e colaboração, conhecimentos não-tangíveis essenciais para preparar os engenheiros para os desafios do mercado de trabalho (LESSINGER e ABAIDE, 2021).

No mercado de projetos industriais, dentre as inúmeras interfaces multidisciplinares, a comunicação e colaboração no desenvolvimento é essencial para o sucesso. Um documento chave, desenvolvido no princípio do projeto são os fluxogramas de engenharia. Esse tipo de diagrama é um desenho esquemático, aplicado em indústrias de processo, para representar os equipamentos e suas interligações com os instrumentos e lógica de controle, segurança e automação (DE MACÊDO e CUNHA, 2023).

Devido aos fatos apresentados, se faz necessário a investigação das capacidades dos softwares aplicados em projetos industriais para desenhos de fluxogramas de engenharia, verificando o alcance dos programas de código livre e gratuitos.

Metodologia

A revisão seguiu as recomendações da *PRISMA* (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*), que define três etapas: Identificação, Seleção e Inclusão. Inicialmente se define os critérios de elegibilidade e características, como o ano, língua e tipo das publicações, além das fontes de dados, definindo a estratégia de busca e eliminação. Em seguida são definidos e aplicados os critérios de exclusão, fazendo o refino da pesquisa. Nesse processo também se faz a coleta e descrição dos dados obtidos, complementado de um estudo de riscos e tendências. Por fim, são obtidos os resultados da investigação e é feita a sua discussão (PAGE *et al.*., 2020). Como a presente investigação corresponde à primeira etapa da pesquisa, ela irá tratar apenas da identificação de novos estudos através de bancos de dados e registros.

O objetivo da presente investigação é identificar áreas de ensino de engenharia que ainda não são atendidas de forma satisfatória por programas de código aberto e/ou de acesso gratuito. Para evitar a tendência na pesquisa, cada termo selecionado para as etapas de filtragem foi aplicado nos artigos filtrados anteriormente. Assim, reduz-se a possibilidade de de alguma publicação ser eliminada erroneamente.

Na análise dos resultados foi aplicada a ferramenta gratuita de acesso a banco de dados e repositórios *Harzing's Publish or Perish* (PoP), versão 8.16.4790 (ADAMS, 2024), e o sítio de suporte a revisões sistemáticas *rayyan* (OUZZANI *et al.*., 2016). O PoP permite fazer a busca e coleta de dados automáticos em diversas plataformas, auxiliando na primeira etapa da pesquisa. Já o *rayyan* auxilia na seleção de artigos através de uma ferramenta de comparação de artigos similares, além de filtros e destaques por palavras chave. O portal fornece o acesso gratuito às funcionalidades manuais e oferece uma assinatura para aplicação de ferramentas de seleção

automática, aplicando algorítmos de inteligência artificiais, que não foram utilizados para a presente investigação.

Foram selecionados inicialmente os sistemas de pesquisa de periódicos: CAPES, através do Acesso CAFe (Comunidade Acadêmica Federada); *Crossref*; Google Acadêmico; *Lens.org*; *OpenAlex*; *Scopus*; *Semantic Scholar*; e *Web of Science*. Cada base possui acesso a publicadores, filtros e ferramentas diferentes, apresentando resultados complementares à pesquisa. Foi feita uma pesquisa de teste em cada plataforma, comparando a quantidade de resultados obtidos e depois os dados foram extraídos por uma ferramenta de coleta de dados através da PoP. Apezar de também estar disponível no programa, o portal *PubMed* não foi utilizado por ser um agregador de pesquisas relevantes para a área da medicina, não possuindo publicações relevantes para engenharias. O CAFe, por não estar disponível no PoP e o *Lens.org* e *Web of Science* por exigirem uma licença paga não foram aplicados. O *Crossref* também foi descartado por apresentar uma grande quantidade de publicações não-acadêmicas, como sites e blogs.

O procedimento foi aplicado para obter o panorama atual da área, fazendo uma pesquisa mais ampla. A seleção será obtida através da busca das palavras chave individualmente e selecionar a com o maior resultado. Termos compostos foram pesquisados entre o operador de aspas duplas, garantindo que não foram incluídas pesquisas com as palavras aplicadas de forma independente. Em todos os portais foram aplicados os filtros de datas e, quando disponível, de tipo de publicação. Caso algum resultado apresente mais de mil publicações, a quantidade é limitada pela ferramenta aplicada ao primeiro milhar, de acordo com a classificação aplicada por cada sítio.

Para a etapa de filtragem, foram testados os termos no portal *OpenAlex* e foram aplicados no sistema de filtragem do *rayyan*. Da mesma forma do processo anterior, os termos foram selecionados na ordem de garantir maior resultado possível em cada etapa.

A pesquisa foi realizada no aplicativo PoP, que extraiu dos portais selecionados até mil resultados, na data de 12 de novembro de 2024. O termo principal da pesquisa selecionado foi "*piping and instrumentation diagram*", essa expressão apresentou resultados mais relevantes e em maior quantidade em relação aos seus sinônimos "*engineering diagram*", "*process diagram*", "*fluxogram*" e o acrônimo "P&ID". Além disso, foi aplicado o filtro de data, selecionando apenas publicações dos últimos cinco anos.

Durante a etapa de filtragem inicial foi realizada somente a avaliação quantitativa da pesquisa, excluindo as publicações duplicadas, apresentadas em mais de uma pesquisa, plataforma ou publicador. Também foram eliminadas publicações em língua estrangeira, exceto espanhol e inglês, e tipos de publicações menos relevantes, como livros e publicações não identificadas ou título muito curto.

Na segunda etapa de filtragem foram eliminados os artigos classificados como Artigos de revisão, tanto no título quanto no resumo, incluindo revisões sistemáticas, literárias, compreensivas, de escopo, qualitativa e técnica. Os demais artigos foram reservados para recuperação.

Para a terceira etapa de filtragem foram selecionados os artigos para a leitura do resumo. Nessa etapa foram selecionados os artigos que identificaram os softwares utilizados, incluindo os termos “software” e “CAD”; relacionados à quarta revolução industrial, citando “*industry 4.0*”, “*cyber-physical*” e expressões equivalentes; aplicações e investigações em ambientes educacionais, com os termos “*education*”, “*teaching*” e “*curriculum*”; e aplicações multidisciplinares ou interdisciplinares, incluindo “BIM” ou “*Building information modelling”*.

A partir da leitura dos resumos, foram selecionadas três classificações: artigos de softwares *open source*, aplicações educacionais e multidisciplinares. Além disso foram eliminados os artigos que tratavam de aplicação de inteligência artificial, aprendizado de máquina e correlatos. Dentre os artigos selecionados na última etapa, dois foram eliminados. O primeiro por possuir apenas o título e resumo em inglês, com o restante do texto em língua estrangeira. O segundo por ser de acesso restrito. O terceiro ser de um período anterior. E o último por ser uma tese de doutorado.

Por fim foram selecionados os quatro artigos com maior quantidade de citações, para se fazer uma análise individual. Eles foram revisados com o objetivo de identificar as aplicações de fluxogramas de engenharia que são possíveis serem utilizadas em um ambiente educacional e quais as dificuldades podem ser identificadas.

Para a análise também será utilizado o suporte da plataforma de inteligência artificial *NotebokLM*, da Google. A ferramenta permite a personalização e extração de informação através da disponibilização de documentos de referência (GOOGLE, 2024). Ao fazer perguntas através da ferramenta, é possível fazer uma análise dos artigos de forma individual ou em conjunto, destacando suas semelhanças e diferenças. Para isso foram feitas as perguntas abaixo, primeiro com os todos os artigos selecionados é por fim os cinco com maior avaliação:

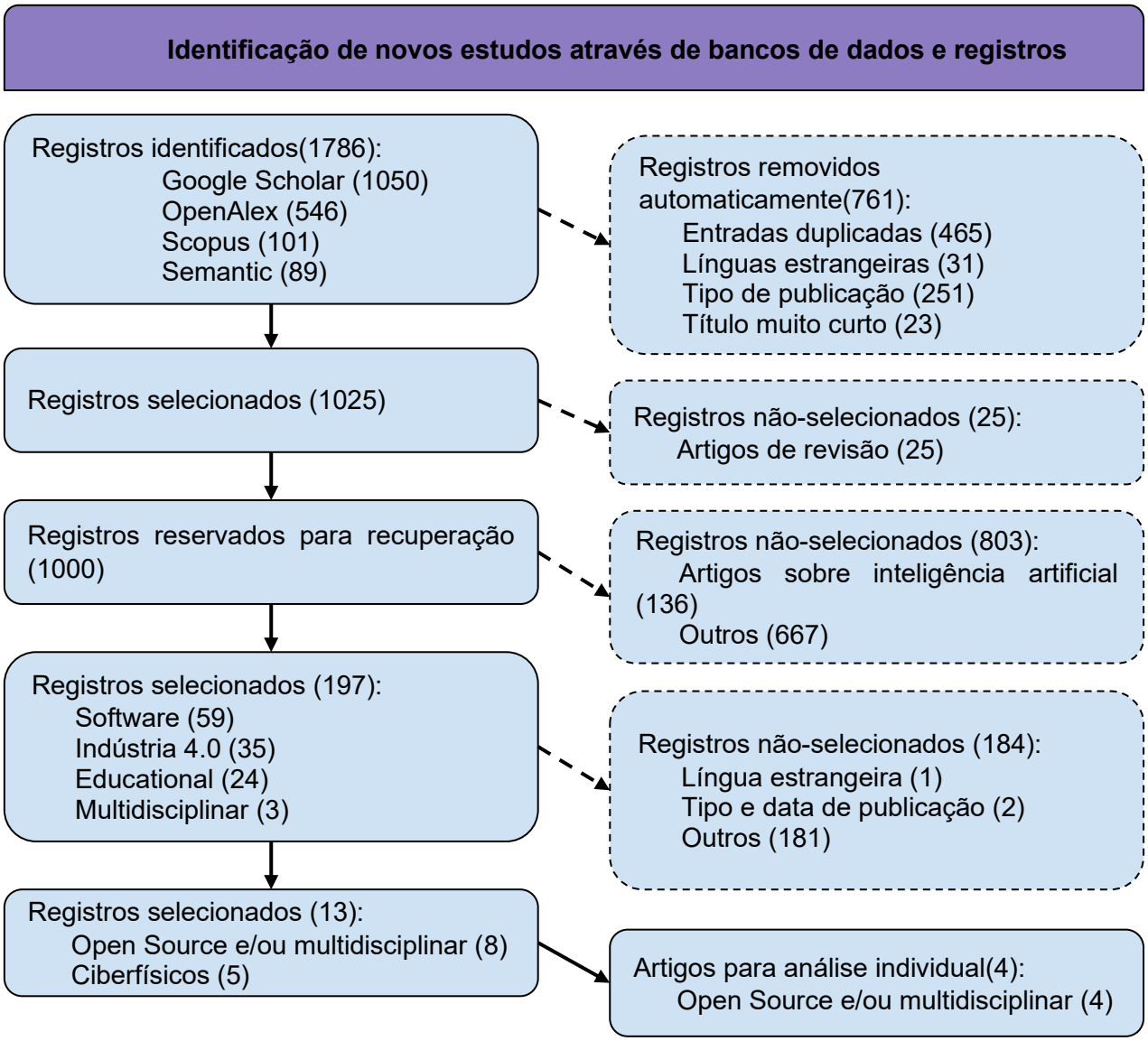
- Resuma o tema principal abordado nos artigos
- Qual a relevância dos artigos para o ensino de engenharia.
- Como as ferramentas demonstradas podem ser aplicadas no ensino de fluxogramas de engenharia?
- Quais as deficiências, limitações e ausências identificadas?

Resultados e discussões

Pesquisa e filtragem de publicações

Na Figura 1 é possível verificar o quantitativo de publicações avaliados em cada etapa. Em tracejado estão as publicações não consideradas em cada etapa. Entre parênteses o quantitativo para cada classificação.

Figura 1 – Fluxograma



Fonte: O autor, 2024.

Análise do processo de filtragem

Apesar do portal *OpenAlex* ter identificado menos da metade de publicações em relação ao *Google Scholar*, a maior parte dos registros reservados para recuperação e etapas seguintes são provenientes dessa plataforma. A diferença principal em relação aos resultados obtidos é que esse sítio fornece a lista de autores, e o resumo completo, sendo referenciada pela ferramenta de identificação de publicações duplicadas do *rayyan*.

Mais da metade das publicações selecionadas (65%), após a primeira etapa de filtragem, apresentam os fluxogramas de engenharia como uma ferramenta de suporte ao desenvolvimento de um projeto, planta ou sistema. Os diagramas são utilizados para representar de forma

simplificada os elementos aplicados. Apesar das imagens geradas seguirem padrões similares, menos de dez publicações identificaram no título e resumo as normas aplicadas para os desenhos. É possível identificar menos de seis por cento (5,8%) das publicações que informaram quais programas foram usados para o desenvolvimento do projeto e gráficos. Por esse motivo foi necessário ampliar a quantidade de filtros para o resultado final em relação ao objetivo inicial, uma vez que apenas sete dos softwares apresentados são de uso gratuito e/ou livre.

Análise dos artigos

A temática principal identificada entre os artigos destacados é a modelagem e simulação de sistemas de engenharia. Os artigos exloram campos em crescente relevância, com sistemas ciberfísicos e realidade virtual. As fontes ainda exploram a aplicação de ferramentas computacionais como Modelica, uma linguagem de programação para simulação de sistemas (TANTAWY, ABDELWAHED e ERRADI, 2022; FRICK, BRAGG_SITTON e RABITI, 2020); Realidade vitrual para treinamento de operadores para indústria química (FRACARO *et al.*., 2021) e SFILES 2.0, uma linguagem de representação textual de fluxogramas (VOGEL *et al.*., 2023).

A maioria das outras fontes demonstra a aplicação da modelagem e simulação em diversos contextos da engenharia. A segurança e resiliência em sistemas ciberfísicos são destaque nas pulicações, com o desenvolvimento de ferramentas e a simulação dela para segurança contra ataques e falhas (TANTAWY, ABDELWAHED e ERRADI, 2022; FRICK, BRAGG-SITTON e RABITI, 2020; SEGOVIA-FERREIRA, 2020). A realidade virtual, virtualização e/ou a simulação podem ser aplicadas para o ensino de indústria 4.0 no ambiente universitário (HUNGLER *et al.*., 2022), industrial (FRACARO *et al.*., 2021) ou construção civil (KAMAL e BAHGAT, 2021; SHARIF *et al.*., 2021).

Além disso, os artigos apontam para algumas deficiências, limitações e ausências nas ferramentas e abortagens atuais. Várias das ferramentas aplicadas podem ser complexas e demandam tempo de aprendizado e adaptação (VOGEL-HEUSER *et al.*., 2022). Os softwares comerciais podem ter alto custo, além de exigir infraestrutura computacional adequada, limitando o acesso a muitas instituições e empresas (TANTAWY, ABDELWAHED e ERRADI, 2022). A dificuldade na representação de aspectos extra-funcionais, como a segurança e confiabilidade (VOGEL-HEUSER *et al.*., 2022).

Por fim, as necessidades de pesquisas futuras pelos autores se destacam: o desenvolvimento de padrão para integração e interoperabilidade entre os diversos softewares para engenharia (VOGEL-HEUSER *et al.*., 2022; VOGEL *et al.*., 2023; KELBERG e LYADOVA, 2020); interfaces mais intuitivas e amigáveis, com a aplicação de recursos educacionais abrangentes (KELBERG e LYADOVA, 2020).

Análise individual dos artigos

O tema mais relevante para a pesquisa, que apresentou artigos com maior número de citações foi unificado entre sistemas de código ou fonte aberta, de uso gratuito ou multidisciplinar, incluindo BIM. Na Tabela 1 é possível verificar a importância de cada artigo, demonstrando o número de citações, quantidade de autores, índices g e h, além da classificação do periódico pelo índice Qualis Capes (CAPES, 2024).

Tabela 1 - Classificação dos artigos

Título	Citações	Autores	Índ. g	Índ. h	Área	Qualis
Towards design guidelines for virtual reality training for the chemical	68	10	1	1	Engenharia II	A2
SFILES 2.0: an extended text-based flowsheet representation	15	4	1	1	Engenharia III	A2
OpenHumidistat: Humidity-controlled experiments for everyone	5	2	1	1	Engenharia IV	A4
The development of a lean six sigma and BIM framework for enhancing off-site manufacturing	5	4	2	1	Engenharia III	A2

Fonte: O autor, 2024.

1. *Towards design guidelines for virtual reality training for the chemical*

O artigo aborda a implementação da realidade virtual no setor industrial, com foco na área química. Entre os pontos destacados, está o custo-benefício dessa tecnologia, uma vez que os gastos com segurança e treinamento em indústrias são elevados. O autor demonstra que a realidade virtual pode simular situações educativas de forma eficiente, sem expor os colaboradores a riscos. Além disso, o uso de softwares ou aplicativos pré-desenvolvidos reduz custos com equipes de treinamento, enquanto a inovação tecnológica motiva os colaboradores (FACARO *et al.*., 2021, p. 2-7).

O trabalho apresenta relevância para a engenharia ao integrar tecnologia e mercado de trabalho, proporcionando uma educação imersiva com situações realistas e seguras. Também demonstra como é possível reduzir custos sem comprometer a eficácia, ligando-se assim diretamente ao cotidiano da engenharia (FACARO *et al.*., 2021, p. 2-3).

Os autores relacionam a aplicação da realidade virtual junto aos fluxogramas, destacando que ambos permitem explorar diferentes caminhos para alcançar um resultado. Assim como fluxogramas oferecem opções para resolver problemas, o ambiente de testes utilizando realidade virtual “VR” possibilita aprimorar cada simulação até atingir o objetivo desejado (FACARO *et al.*., 2021, p. 4).

Entre as limitações apontadas, destacam-se a falta de motivação dos trainees e dificuldades em lidar com cenários não padronizados ou não convencionais. Além disso, o autor menciona a carência de tecnologias imersivas avançadas para esses estudos (FACARO *et al.*., 2021, p.p 7).

2. *SFILES 2.0: an extended text-based flowsheet representation*

O artigo aborda a implementação da notação textual "SFILES 2.0" para representação de fluxogramas, com o objetivo de criar um banco de dados FAIR (encontrável, acessível, interoperável e reutilizável). O autor apresenta a aplicação dessa notação para PFDs e PeIDs, além de um

algoritmo para conversão reversível entre o gráfico do fluxograma e a string SFILES 2.0, disponível em um repositório no *GitHub* (VOGEL *et al.*., 2023, p.2911-2913).
O projeto apresenta relevância para a engenharia ao padronizar fluxogramas em formato textual, facilitando a análise computacional, otimizando processos e melhorando a segurança. Além disso promove o compartilhamento eficiente de informações entre engenheiros, contribuindo para o desenvolvimento de um banco de dados "FAIR" e a expansão do conhecimento na área (VOGEL *et al.*., 2023, p.2912-2913).

A notação é útil para o estudo de fluxogramas, proporcionando uma compreensão mais clara e concisa em comparação às representações gráficas tradicionais. Como se trata de um código aberto, a contribuição da comunidade pode aprimorar seu desenvolvimento e aplicabilidade (VOGEL *et al.*., 2023, p.2913-2914).

Porém, o método apresenta limitações, como a incapacidade de representar completamente unidades com mais de duas entradas e saídas, o que apresenta como consequência a perda de informações. Além disso, há dificuldades no armazenamento de dados operacionais, como pressão, temperatura e dimensões (VOGEL *et al.*., 2023, p.2924-2931).

3. *OpenHumidistat: Humidity-controlled experiments for everyone*

O artigo apresenta o desenvolvimento de um umidostato de baixo custo e código aberto, projetado para aplicações em escala laboratorial. O dispositivo controla a umidade em uma câmara misturando fluxos de ar úmido e seco por meio de válvulas solenoides proporcionais controladas por um microcontrolador *Teensy LC*. O autor detalha o projeto de hardware e firmware, incluindo diagramas de circuitos, lista de materiais e instruções de montagem, validando seu desempenho com um curto tempo de estabilização e ampla faixa de umidade atingível (VELDSCHOLTE e BEER, 2022, p.2-4).

A relevância do projeto para a engenharia está em seu baixo custo e ampla aplicabilidade, especialmente em áreas que lidam com materiais sensíveis à umidade, tornando-o essencial para experimentos. Além disso, sua facilidade de construção e código aberto democratizam o acesso à tecnologia, beneficiando estudantes e entusiastas que podem aprender, contribuir para seu aprimoramento e adaptá-lo a diferentes áreas (VELDSCHOLTE e BEER, 2022, p.3-6).
Apesar dessas vantagens, o artigo não apresenta aplicação direta para fluxogramas e possui limitações no detalhamento técnico, não abordando de forma aprofundada a precisão e reprodutibilidade das medidas de umidade, nem a influência de fatores externos, como temperatura ambiente, no desempenho do dispositivo (VELDSCHOLTE e BEER, 2022, p.17-18).

4. *The development of a lean six sigma and BIM framework for enhancing off-site manufacturing*

O presente artigo aborda a aplicação da metodologia *Lean Six Sigma* (LSS) e da Modelagem de Informação da Construção (BIM) em processos de fabricação fora do local (OSM), com o objetivo de otimizar, reduzir desperdícios nos processos de construção e aumentar a produtividade de forma controlada, além de promover práticas sustentáveis na produção de "SKIDS". Utilizando ferramentas como SIPOC, VOC e VSM, o estudo identificou e eliminou gargalos e desperdícios no processo de OSM. Os resultados foram positivos, concluindo que a integração de LSS e BIM com OSM beneficia a indústria da construção ao promover eficiência, sustentabilidade e satisfação do cliente (MCDERMOTT *et al.*., 2023, p. 51-54, 61-63).

O projeto é relevante para a engenharia, pois alia produção enxuta a resultados eficientes, promovendo benefícios ecológicos. A implementação de ferramentas digitais torna-se atrativa para engenheiros tanto na modelagem e construção quanto na apresentação para clientes. A construção "*off-site*" permite criar fluxogramas que contribuem para o andamento do processo, ajustando caminhos conforme os resultados desejados. Ferramentas como SIPOC, VOC, VSM e BIM, quando combinadas com fluxogramas, otimizam ainda mais a identificação e eliminação de desperdícios, como esperas, retrabalho e movimentos desnecessários. Esses fluxogramas também podem ser usados para ensino, facilitando a visualização das otimizações aplicadas (MCDERMOTT *et al.*., 2023, p. 53-61).

Apesar das vantagens, o estudo limitou-se a experimentações em uma única empresa, resultando em dados restritos. Além disso, a alta complexidade técnica e de engenharia necessária para operar as ferramentas exige contratação ou terceirização de especialistas (MCDERMOTT *et al.*., 2023, p. 64-68).

Conclusão

Apesar dos fluxogramas de engenharia serem uma documentação de desenvolvimento multidisciplinar essencial para o desenvolvimento industriais, sua representação em publicações se limita à sua aplicação. Poucos artigos são voltados ao desenvolvimento e aos programas ou linguagens aplicadas nesses desenhos. Além disso poucos programas de código livre são aplicados nesse tipo de desenvolvimento e ainda com muitas limitações.

Mesmo aplicando os filtros em Português e Espanhol, nenhuma publicação relevante foi identificada nessas línguas utilizando os dados coletados. Para complemento da investigação apresentada, é importante complementar a revisão utilizando portais que permitam a filtragem por origem ou língua. Em complemento é possível utilizar tradutores automáticos para permitir a análise de artigos em línguas em que os pesquisadores não possuírem domínio, mas levando em consideração que é mais provável de ocorrer erros de tradução e interpretação. A inclusão de outras línguas auxiliarão na ampliação do alcance da pesquisa.

Proposta de agenda de pesquisa

Pretendendo ampliar a presente investigação, deve-se realizar uma Revisão sistemática ao longo do próximo ano, complementando os resultados obtidos.

Em paralelo é importante investigar melhor as ferramentas destacadas na pesquisa, em especial as linguagens de programação para sistemas, Modelica e SFILES 2.0, com o objetivo de ampliar suas capacidades e facilitar seu uso, em especial no desenvolvimento de Fluxogramas de Engenharia e na integração de projetos BIM.

Referências

ALEXANDRE, Geronimo Barbosa; MELO, Giuseppe Manoel Dantas; DE SOUSA, Heriliany Iasmim. ENSINO BASEADO EM PROJETOS NA DISCIPLINA DE MÁQUINAS ELÉTRICAS NA GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. 2024.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES). **Plataforma Sucupira**. Disponível em: <https://sucupira-

legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>. Acesso em: 16 nov 2024.

DE BARROS, José Roberto Moreira *et al*.. DESAFIOS E ESTRATÉGIAS NO ENSINO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA: ABORDANDO A DIVERSIDADE DE CONHECIMENTO E HABILIDADES ENTRE ALUNOS NO ENSINO SUPERIOR. **Revista Ilustração**, v. 5, n. 7, p. 59-68, 2024.

DE FREITAS, Marina; ARAUJO, Ives Solano; HEIDEMANN, Leonardo Albuquerque. Cultura livre na educação: uma revisão da literatura sobre o uso de Tecnologias Livres, Ciência Aberta e Recursos Educacionais Abertos no ensino de Física e Engenharia. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 39, n. 2, p. 411-438, 2022.

DE FREITAS, Thiago Victor Albuquerque *et al*.. APLICAÇÃO DA PLATAFORMA TINKERCAD–CIRCUITS PARA O ENSINO DA DISCIPLINA INSTRUMENTAÇÃO EM CURSOS DE ENGENHARIA MECÂNICA. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 42, p. 1-19, 2023.

DE MACÊDO, Thiago César Pimenta; CUNHA, Pedro Henrique Bráz. Agilidade e Foco no cliente através do aumento de colaboração entre a equipe de projeto de engenharia. **Boletim do Gerenciamento**, v. 35, n. 35, p. 51-62, 2023.

FRACARO, Sofia Garcia e *et al.*. **Towards design guidelines for virtual reality training for the chemical industry**. Education for Chemical Engineers, v. 36, p. 12–23, 2021.

FRICK, Konor e BRAGG-SITTON, Shannon e RABITI, Cristian. **Development of the INL Thermal Energy Distribution System (TEDS) in the Modelica Eco-System for Validation and Verification**. v. INL/EXT-20-59195, p. 1–27, 2020.

GOOGLE. **What is NotebookLM - Help**. Disponível em: <https://support.google.com/notebooklm/answer/14273541?hl=en>. Acesso em: 20 nov 2024.
HUNGLER, P. *et al.*. **Design and Development of an Open-Source Virtual Reality Chemical Processing Plant**. Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEA), v. CEEA-ACEG22, n. Paper 101, p. 1–5, 2022.

KAMAL, Hossam e BAHGAT, Mohamed. **IMPLEMENTATION OF AUTODESK REVIT® IN DESIGN OF WATER TREATMENT PLANTS**. WIT transactions on the built environment, v. 205, n. IV, p. 97–104, 2021.

KELBERG, Kristina E. e LYADOV, Nadezhda A. **Analysis of Conceptual Engineering Tools in Designing Infrastructure Development Systems for Assets**. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета Геология Нефтегазовое и горное дело, v. 20, n. 3, p. 253–269, 2020.

LESSINGER, Samuel; ABAIDE, Alzenira da Rosa. Uma Contribuição Didática Ao Ensino De Sistemas De Controle No Contexto Pandêmico. **SEPOC 2021**, 2021.

MCDERMOTT, O *et al.*. **The development of a lean six sigma and BIM framework for enhancing off-site manufacturing**. International Journal of …, v. 15, n. 8, 2023.

OUZZANI, Mourad *et al.*. **Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews**. Systematic Reviews, v. 5, n. 1, Dez 2016. Acesso em: 15 nov 2024.

PAGE, Matthew J *et al.*. **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews**. BMJ, v. 372, n. 71, p. n71, 29 Mar 2021. Acesso em: 15 nov 2024.

POLLAK, Markus *et al.*. **Steady State and Dynamic Simulation of a Small-Scale Hollow Fiber Membrane Humidifier**. Linköping electronic conference proceedings, v. 204, n. 1, p. 531–540, 2023.

SEGOVIA-FERREIRA, Mariana *et al.*. **Switched-Based Resilient Control of Cyber-Physical Systems**. IEEE Access, v. 8, p. 212194–212208, 2020.

SHARIF, Mohammad Mahdi *et al.*. **Using 3D Scanning for Accurate Estimation of Termination Points for Dimensional Quality Assurance in Pipe Spool Fabrication**. International Journal of Industrialized Construction, v. 2, n. 1, p. 54–69, 2021.

VELDSCHOLTE, Lars B. e BEER, De. **OpenHumidistat: Humidity-controlled experiments for everyone**. HardwareX, v. 11, n. e00288, p. 1–18, 2022.

VOGEL, Gabriel *et al.*. **SFILES 2.0: an extended text-based flowsheet representation**. Optimization and Engineering, v. 24, n. 4, p. 2911–2933, 2023.

VOGEL-HEUSER, Birgit *et al.*. **Boosting Extra-Functional Code Reusability in Cyber-Physical Production Systems: The Error Handling Case Study**. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, v. 10, n. 1, p. 60–73, 2022.

Análise da Influência da Espessura da Pá em Rotores do Tipo Savonius

Yan Felipe de Oliveira Cavalcante[1] (0009-0005-1761-8557); José Leôncio Fonseca de Souza[1] (0000-0003-2319-0540)

1 Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/MG, Belo Horizonte, Brasil

Resumo: A crescente preocupação com as mudanças climáticas, a busca pela redução do consumo de combustíveis fósseis e a incerteza sobre a segurança energética têm enfatizado a importância das energias renováveis. Nesse contexto, o aproveitamento energético dos ventos tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos. As turbinas Savonius destacam-se como uma solução viável, especialmente em regiões com ventos de baixa velocidade. Alterando parâmetros geométricos e características aerodinâmicas do rotor, busca-se avaliar o impacto dessas alterações na eficiência da turbina. O objetivo principal deste estudo é analisar a influência de diferentes perfis de pás, variando suas espessuras entre 0,5 mm e 5 mm, na eficiência do rotor Savonius. Para isso, foram realizadas simulações numéricas utilizando o Método dos Volumes Finitos (MVF) no software comercial Ansys Fluent®, adotando o modelo de turbulência Realizable k-ε (RKE). O estudo busca comprovar que o aperfeiçoamento da geometria do rotor Savonius de baixo custo pode aumentar significativamente seu desempenho.

Palavras-chave: Espessura da pá; Método dos Volumes Finitos; Savonius; VAWT.

Introdução

Nos últimos anos, a busca por fontes de energia limpa e renovável tem se intensificado, impulsionada pela crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A energia eólica tem emergido como uma das alternativas mais promissoras para a geração de eletricidade de forma sustentável. A melhoria da eficiência das turbinas eólicas, especialmente em áreas com ventos de baixa velocidade, tem sido um foco constante de pesquisa e desenvolvimento (CAVALCANTE, 2021; BRASIL, 2017).

A relevância da pesquisa está diretamente ligada à necessidade de expandir a geração de energia eólica a partir de fontes renováveis, alinhando-se ao sétimo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que busca garantir o acesso universal à "Energia Acessível e Limpa". A conscientização global sobre as mudanças climáticas tem promovido uma transição nos modelos econômicos, com um entendimento crescente da urgência em reduzir a geração de energia proveniente da queima de combustíveis fósseis. Esse movimento tem priorizado o desenvolvimento de fontes de energia renovável, como a energia eólica, que apresenta um impacto ambiental significativamente menor (ODS BRASIL, 2020; CAVALCANTE, 2021).

As turbinas eólicas são dispositivos que convertem a energia cinética do vento em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica, desempenhando um papel crucial na geração de energia

renovável. Elas são classificadas em duas categorias principais: turbinas de eixo vertical (VAWTs) e turbinas de eixo horizontal (HAWTs). As turbinas de eixo vertical subdividem-se em dois tipos principais: aquelas acionadas pela força de sustentação e aquelas acionadas pela força de arrasto. Um exemplo amplamente reconhecido de turbina de arrasto é a turbina Savonius, concebida por Sigurd Johannes Savonius em 1929. Essa turbina possui uma configuração básica composta por um rotor com dois semicilindros simetricamente dispostos e conectados a um eixo central (DABIRI, 2011; MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009; SAVONIUS, 1929).

A força de arrasto é o fator determinante que impulsiona a rotação dos rotores Savonius. Essa força é gerada devido à diferença de torque entre as superfícies côncavas e convexas das pás do rotor. No entanto, o princípio de funcionamento baseado na força de arrasto impõe uma limitação significativa à eficiência da turbina Savonius, uma vez que a força de arrasto na face convexa resulta em uma perda de torque (AKWA, 2014; SAVONIUS, 1926; FERNANDO e MODI, 1989; MOHAMED, 2011).

Embora as limitações do princípio da força de arrasto impactem negativamente sua eficiência, pesquisas continuam a buscar melhorias no desempenho da turbina Savonius por meio de alterações nos parâmetros de design e aerodinâmicos. Estudos recentes sugerem que diferentes perfis e formatos de pás têm potencial para aprimorar o desempenho da turbina. Contudo, um aspecto frequentemente negligenciado na literatura é a influência da espessura da pá no desempenho geral do sistema (FERNANDO e MODI, 1989; MOHAMED, 2011).

Os avanços na geometria dos rotores Savonius e nos estudos de eficiência são fundamentais para mitigar essas limitações e promover o desenvolvimento de turbinas com melhor desempenho. Os esforços nesse sentido incluem a modificação da geometria das pás e o aperfeiçoamento da interação aerodinâmica, tornando-as mais eficientes em diferentes condições de vento e aplicação (AKWA, VIELMO e PETRY, 2012; CAVALCANTE, 2021; KANG, LIU e YANG, 2014).

Diante dessa lacuna, o presente estudo tem como objetivo analisar numericamente os efeitos aerodinâmicos causados por variações na espessura das pás de uma turbina Savonius tradicional. A geometria das pás de turbinas Savonius desempenha um papel essencial no desempenho aerodinâmico, influenciando diretamente o comportamento do escoamento e variáveis como os coeficientes de arrasto e sustentação. Entre os diversos parâmetros envolvidos, a espessura das pás se destaca por seu impacto significativo em aspectos estruturais e aerodinâmicos, afetando tanto a eficiência da turbina quanto sua robustez operacional (AKWA, VIELMO e PETRY, 2012; CAVALCANTE, 2021; KANG, LIU e YANG, 2014).

O aumento na espessura das pás resulta em maior peso, exigindo um torque inicial mais elevado para superar a inércia e iniciar o movimento. No entanto, essa massa adicional também oferece vantagens, como maior inércia em momentos de ausência de torque ativo, o que ajuda a manter o movimento angular da turbina (AKWA, VIELMO e PETRY, 2012; CAVALCANTE, 2021; KANG, LIU e YANG, 2014).

Por outro lado, a espessura também altera o comportamento do fluxo de ar ao redor da superfície das pás, impactando a estabilidade e eficiência global do sistema. Pás mais espessas podem reduzir o coeficiente de arrasto em certos ângulos, mas também comprometem a geração de torque devido à menor diferença de pressão entre as superfícies côncava e convexa. Em contrapartida, pás mais finas tendem a gerar maior torque em ângulos iniciais, mas apresentam maior resistência ao movimento (KUMAR, SURYA, et al., 2018).

Metodologia

A metodologia adotada neste estudo foi baseada em uma abordagem numérica para investigar a influência da espessura das pás de turbinas Savonius no comportamento do escoamento e no desempenho global. Este estudo se fundamenta no trabalho de Kumar, Surya, et al. (2018), que analisou pás de espessuras distintas, mas sem integrar as pás ao conjunto completo da turbina. A variação das espessuras das pás, optou-se por trabalhar com espessuras de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 3,5 mm, 4 mm e 5 mm. Este intervalo foi escolhido para permitir uma análise mais refinada do impacto de pequenas variações de espessura, especialmente em faixas menores, que não foram exploradas no estudo de Kumar, Surya, et al. (2018). A espessura de 3,5 mm foi mantida para possibilitar a comparação direta e a validação dos resultados.

Para este estudo, foi utilizado o software Fluent©, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) para a resolução das equações de conservação de massa e momento. O modelo de turbulência selecionado foi o Realizable k-ε (RKE), uma versão aprimorada do modelo padrão k-ε, reconhecida por sua precisão na representação de fenômenos com escoamentos complexos, como separações e recirculações típicas de turbinas Savonius. A escolha fundamentou-se na adequação do modelo RKE para escoamentos com vórtices de baixa rotação e em sua boa concordância com dados experimentais obtidos em túnel de vento (FERZIGER e PERIć, 2002; AKWA, 2010; MOHAMED, 2011; ANSYS, 2013; MALISKA, 2017).

As equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e a dissipação de energia cinética turbulenta (ε) estão descritas nas Eq. 1 e Eq. 2 (SHIH, LIOU, *et al.*, 1995; MOHAMED, 2011; ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \qquad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\upsilon\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \qquad \text{Eq. 2}$$

Sendo:

- ρ – Massa específica do ar [kg/m³];
- k – Energia cinética turbulenta [m²/s²];
- ui – Componente de velocidade na direção correspondente [m/s];
- μ – Viscosidade dinâmica do ar atmosférico [N.s/m²];
- σi – Número de Prandtl turbulento para k e ε [adimensional];
- Gk – Termo de geração de energia cinética turbulenta [kg/m.s³];
- Gb – Termo de geração de energia cinética de turbulência devido à flutuabilidade [m²/s²];
- Ym – Contribuição da dilatação flutuante em turbulência [m²/s²];
- Si – Termos de origem definidos pelo usuário para k e ε [-];
- C2 – Constante empírica [adimensional];
- C1ε – Constante empírica [adimensional].

As simulações incluíram ensaios em regime permanente e transiente. No regime permanente (ou estacionário), o rotor foi mantido fixo em diversas posições angulares (0°, 30°, 60°, 90°, 120° e 150°) para determinar as forças e o torque estático. Já no regime transiente, o rotor girou com uma

velocidade angular constante, possibilitando a análise das variáveis dinâmicas da turbina. Durante o regime transiente, grandezas como a velocidade angular do rotor, a distribuição de pressão ao longo das pás e as forças de arrasto e sustentação variaram com o tempo, fornecendo uma descrição mais completa do comportamento do escoamento ao longo do movimento da turbina (FUJISAWA e GOTOH, 1992).

Resultados e Discussão

Com base nos dados e nas análises apresentados no estudo de Kumar, Surya, et al. (2018), é possível projetar algumas expectativas sobre o desempenho global de turbinas Savonius em condições reais de operação, considerando as influências da espessura das pás. Embora o estudo tenha focado na análise individual de pás e desconsiderado as interações entre pás adjacentes, os resultados fornecem indícios importantes para a compreensão do comportamento aerodinâmico e estrutural do conjunto completo.

Inicialmente, espera-se que pás mais finas, apresentem maior coeficiente de arrasto (“Cd”). No caso das pás mais grossas, observa-se um comportamento oposto. Em ângulos de incidência de 0°, o fluxo permanece mais aderido à superfície convexa, o que reduz a formação de vórtices e, consequentemente, o coeficiente de arrasto. Isso se reflete em uma menor capacidade de geração de torque inicial, indicando que turbinas compostas por pás mais espessas podem apresentar maior dificuldade em iniciar o movimento, especialmente em regimes de vento de baixa intensidade. Contudo, uma vez em movimento, as pás mais grossas oferecem menor resistência ao escoamento e possuem maior inércia rotacional, contribuindo para a manutenção da rotação em condições de escoamento sustentado.

Outra implicação relevante é o impacto da espessura das pás no comportamento do torque negativo. A maior espessura aumenta o raio efetivo da turbina, o que pode intensificar o torque negativo em determinadas posições angulares. Isso representa um desafio para o projeto de turbinas, uma vez que o torque negativo pode reduzir a eficiência global do sistema e comprometer a estabilidade de rotação. Espera-se, portanto, que turbinas com pás grossas requeiram estratégias de otimização da sua geometria.

Conclusão

Os dados apresentados indicam que turbinas com pás mais finas são vantajosas em cenários onde a eficiência aerodinâmica é essencial, enquanto as pás mais grossas demonstram melhor desempenho na geração de torque em condições de escoamento desenvolvido. Assim, a escolha da geometria ideal deve considerar as condições específicas de operação, complementando análises do comportamento do conjunto completo da turbina em funcionamento. Os resultados evidenciaram as implicações da espessura das pás em diferentes ângulos de incidência, ressaltando a complexidade das interações entre características geométricas e o desempenho aerodinâmico. Contudo, a ausência de experimentos com o conjunto completo da turbina Savonius ainda representa uma limitação importante para extrapolar esses achados para condições reais de operação.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha mais sincera gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido para a realização deste trabalho. O

incentivo fornecido foi essencial para viabilizar as etapas da pesquisa e para o desenvolvimento das ideias e análises apresentadas neste estudo.

Referências

AKWA,. **Análise Aerodinâmica De Turbinas Eólicas Savonius Empregando Dinâmica Dos Fluidos Computacionais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 149. 2010.

AKWA, J. V. **Estudo numérico e experimental do escoamento sobre um rotor eólico Savonius em canal aerodinâmico com alta razão de bloqueio**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 173. 2014.

AKWA, J. V.; VIELMO, A.; PETRY,. A review on the performance of Savonius wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16, jun. 2012. 3054-3064. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056>.

ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide**. ANSYS, Inc. Canonsburg, p. 814. 2013.

BRASIL. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, p. 271. 2017.

CAVALCANTE, Y. F. O. **Influência do perfil da borda e da razão de afastamento das pás na eficiência do rotor Savonius**. USP. São Paulo, p. 303. 2021.

DABIRI, J. O. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 3, n. 043104, 19 jul. 2011. 01 - 12. Disponivel em: <https://doi.org/10.1063/1.3608170>.

FERNANDO, M. S. U. K.; MODI, V. J. A numerical analysis of the unsteady flow past a Savonius wind turbine. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 32, n. 3, out. 1989. 303 - 327. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/0167-6105(89)90005-6>.

FERZIGER, ; PERIć, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Berlin: Springer, 2002. 431 p. ISBN 978-3-642-56026-2. Disponivel em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-56026-2>.

FUJISAWA, N.; GOTOH, F. Visualization study of the flow in and around a Savonius rotor. **Experiments in Fluids**, 12, abr. 1992. 407 – 412. Disponivel em: <https://doi.org/10.1007/BF00193888>.

KAMOJI, M.; KEDARE, S. B.; PRABHU, S. V. Experimental investigations on the effect of gap ratio and end tip condition on the static torque in a conventional Savonius rotor. **Advances in Energy Research**, Bombay, p. 275-280, 2006. Disponivel em: <https://drive.google.com/file/d/0B-6vlKAmWv82V19WMFYxa0hqLVE/view>.

KANG, ; LIU, ; YANG,. Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 499-508, maio 2014. ISSN 1364-0321. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.011>.

KUMAR, P. M. et al. Experimental and numerical investigation of novel Savonius wind turbine. **Wind Engineering**, 43, n. 3, 06 jun. 2018. 1-16. Disponivel em: <https://doi.org/10.1177/0309524X18780392>.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 438 p. ISBN 978-85-216-3335-8.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained:** Theory, Design And Application. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2009. 705 p. ISBN 978-0-470-01500-1. Disponivel em: <http://ee.tlu.edu.vn/Portals/0/2018/NLG/Sach_Tieng_Anh.pdf>.

MOHAMED, H. A. **Design Optimization of Savonius and Wells Turbines**. Otto Von Guericke University Magdeburg. Magdeburgo, p. 198. 2011.

ODS BRASIL. Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. **ODS Brasil**, 2020. Disponivel em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 12 out. 2020.

SAVONIUS,. **The Wing Rotor in Theory and Practice**. Helsingfors: Savonius & CO., 1926. Disponivel em: <https://www.prh.fi/stc/attachments/innogalleria/savonius_kirja.pdf>.

SAVONIUS,. **Rotor Adapted to be driven by wind or flowing water**. United States Patent Office. Helsinque, p. 08. 1929. (1,697,574).

SHIH, T. et al. A new k-ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. **Computers & Fluids**, v. 24, n. 3, p. 227-238, mar. 1995. ISSN 0045-7930. Disponivel em: <https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T>.

Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Veículos Industriais com Foco em Manutenção Mecânica

Marcus Vinicius Costa Silva Rosendo[1] (0009-0005-0453-8232), Estevão Farias Termeloglou[2] (0009-0000-5639-545X), André Costa Martins[3], Alesi Augusto de Paula[1] (0000-0002-8043-1956), Thiago Augusto Araújo Moreira[4](00009-0004-0553-5116)

1 Departamento de Engenharia Elétrica, CEFET-MG
2 Departamento de Engenharia Eletrônica, PUC-MG
3 INJETEC Automação Eletrônica
4 (Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para veículos industriais, com foco em empilhadeiras, visando aprimorar a segurança, eficiência e gestão operacional no ambiente fabril. O sistema proposto utiliza uma combinação de sensores e dispositivos de localização, integrados por meio de uma plataforma IoT (Internet das Coisas), que permite o acompanhamento em tempo real das condições de operação e localização das empilhadeiras. Foram implementadas funcionalidades para monitoramento da velocidade, detecção de colisões e registro de atividades, permitindo a coleta e análise de dados essenciais para o controle de manutenção e prevenção de acidentes. Além disso, o sistema oferece uma interface de visualização acessível aos gestores, proporcionando um controle detalhado das horas de trabalho e estado de desgaste dos veículos. Os resultados mostram que o sistema pode contribuir para a redução de falhas operacionais e otimização do tempo de uso das empilhadeiras, auxiliando na tomada de decisões estratégicas e aumentando a produtividade. A implementação deste sistema destaca-se por sua relevância em setores logísticos e industriais, oferecendo uma solução escalável e adaptável para o monitoramento de diversos tipos de veículos industriais.

Palavras-chave: Empilhadeira, Manutenção, Monitoramento.

Introdução

A crescente demanda por eficiência operacional nas indústrias e centros logísticos tem impulsionado a adoção de tecnologias de monitoramento e gestão de ativos. Entre os veículos industriais, as empilhadeiras desempenham um papel crucial no transporte e na organização de cargas, operando em ambientes onde a segurança, a precisão e a produtividade são essenciais. Contudo, o uso intensivo e a falta de visibilidade sobre o estado e a utilização desses veículos podem resultar em elevados custos de manutenção, acidentes e perda de produtividade.
Diante desse cenário, a aplicação de sistemas de monitoramento se torna uma ferramenta estratégica para garantir uma operação segura e eficiente. Sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) e tecnologias de sensoriamento permitem o acompanhamento em tempo real das condições operacionais dos veículos, possibilitando ações preventivas e corretivas mais eficazes. Com isso, o monitoramento de empilhadeiras torna-se uma solução prática e escalável para a gestão integrada de frotas industriais.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento para empilhadeiras, que coleta e processa dados sobre a utilização e as condições operacionais dos veículos. Através de sensores e uma plataforma de monitoramento, é possível rastrear variáveis como localização, velocidade, identificação dos operadores e eventos críticos, como colisões. Ao proporcionar uma interface de análise em tempo real, o sistema visa auxiliar os gestores na tomada de decisões fundamentadas, otimizando o uso dos recursos e aumentando a segurança no ambiente fabril.

Ao longo deste trabalho, serão apresentados o processo de desenvolvimento do sistema, as tecnologias utilizadas e os resultados obtidos, destacando-se os benefícios da sua aplicação em cenários industriais. A proposta visa contribuir com a literatura e prática no setor, oferecendo uma abordagem que combina inovação tecnológica e gestão operacional para veículos industriais.

Metodologia

A solução proposta por este trabalho é monitorar e fornecer o controle de manutenção para a frota de empilhadeiras de uma prestadora de serviços em uma multinacional do setor de refratários na Grande Belo Horizonte, além de monitorar as rotas, picos de velocidade, horas trabalhadas e horímetro dos últimos 30 dias de cada empilhadeira [1].

Para o desenvolvimento do produto, foram coletadas informações e necessidades do cliente, definindo os requisitos básicos. Em seguida, ocorreu a fase de simulação, desenvolvimento e prototipagem, explorando alternativas de design por meio de brainstorm e análise de viabilidade. O conceito final, escolhido por critérios de funcionalidade, custo e produção, utilizou o rastreador Suntech ST4503 4G. Este rastreador conta com funções essenciais como contabilização de horímetro, geolocalização, comunicação TCP e UDP, 4G e entrada RS232 para dispositivos externos.

Foi desenvolvido um hardware complementar para medir temperatura, velocidade, pressão e identificação do operador, conectado à entrada RS232 do rastreador. Modelos CAD e protótipos físicos foram criados, utilizando Arduino para testar a viabilidade do projeto com o microcontrolador ATMEGA 328p-au. Após confirmar a capacidade de processamento, prosseguiu-se com a simulação de circuitos no LTSpice e desenvolvimento de layout no KiCAD 7 [3], [4], [5].

A fase final envolveu em realizar testes funcionais e de desempenho, incluindo avaliações de durabilidade. As iterações no design e nos testes asseguraram a melhoria contínua do produto. Após os ajustes finais, o protótipo foi implementado em condição real de uso a fins de obter resultados práticos. Nas Figuras 1 e 2 são apresentados o Software de monitoramento e o Hardware desenvolvido.

Figura 1 - Software de Monitoramento SMARTLOGGER.

Figura 2 – Hardware Instalado nas Empilhadeiras.

Contabilização de Horímetro e Horas Efetivas

A contabilização do Horímetro foi realizada utilizando o rastreador Suntech ST4305 4G. Este possui a funcionalidade de contabilização do horímetro a partir do momento em que a ignição da empilhadeira é acionada. O horímetro registra o tempo, em que o motor está em operação, fornecendo um valor acumulado em minutos, sendo necessário converter o valor de minutos para horas dividindo por sessenta (60) o valor registrado.

As horas efetivas trabalhadas é uma relação entre o tempo de ociosidade da empilhadeira e o tempo total de ignição ligada e pode determinada ser determinada através da equação 1. Estas informações estão disponíveis no rastreador como horímetro da viagem e tempo de ociosidade. Integrando os horímetros das viagens e o tempo de ociosidade, em um período definido, obtém-se a relação percentual do tempo em que a empilhadeira não estava desempenhando a função designada.

$$H_{ef}(\%) = \left(1 - \left(\frac{\sum_0^t IdleTime}{\sum_0^t TripHmeter}\right) \cdot \frac{1}{3600}\right) \cdot 100\% \qquad (1)$$

onde:

- IdleTime é o tempo de ociosidade por viagem medido em segundos;
- TripHmeter é o tempo total de cada viagem medido em segundo.

Medição de Velocidade e Temperatura

A medição de velocidade foi realizada de duas maneiras:

- Nas empilhadeiras sem sensor de velocidade, instalou-se um sensor indutivo no eixo do diferencial dianteiro;
- Nas empilhadeiras com sensores de velocidade (sensor TOSS) instalados na transmissão e original de fábrica, a leitura foi realizada diretamente a partir do sinal fornecido por esse sensor.

Nas empilhadeiras que já possuem o sensor TOSS instalado na transmissão apresentam uma frequência de chaveamento elevada, devido à alta contagem de dentes na engrenagem de transmissão, totalizando 640 dentes. Para empilhadeiras que não possuem um sensor de velocidade de fábrica, é instalado um sensor de velocidade no diferencial traseiro. Nesses casos, a quantidade de dentes na engrenagem varia entre 35 e 44 dentes, proporcionando uma alternativa

viável para o monitoramento de velocidade, ainda que com uma frequência de chaveamento menor em comparação com o sensor TOSS.

Para medir a temperatura do fluído de arrefecimento dos motores das empilhadeiras utilizou-se o sensor de temperatura da fabricante MTE Thonson, código 4053. Em série com o sensor de temperatura, adicionou-se um resistor de 560 Ω e um resistor de 2700 Ω, formando um divisor de tensão que garante que a tensão no pino de entrada analógica do microcontrolador Atmega 328p-AU esteja dentro do limite de 5V, conforme especificado no datasheet. Dessa forma, a variação de temperatura é convertida em uma variação de tensão dentro da faixa de 0 a 5V, que o microcontrolador consegue ler e associar a uma faixa de temperatura, como de 0 a 125 ºC [6].

Amostragem Observada

Foram instalados 99 rastreadores Suntech ST4305-4G e 3 hardwares nas empilhadeiras do prestador de serviço. Com este total de 99 rastreadores e 3 hardwares realizou-se uma análise qualitativa acerca das medições propostas neste projeto. Para fins de análises de resultados, os dados analisados foram referentes ao mês de outubro de 2024, pois a instalação dos rastreadores foi morosa e gradativa e a montagem dos três hardwares foi demorada.

Resultados e Discussão

Os horímetros são registrados sob a condição de pós chave ligado (ignição ligada) e enviado a cada 3 minutos na String STT. Cruzando as informações de data, hora da comunicação e horímetro, consultou-se estas informações no banco de dados a fim de realizar o levantamento dos horímetros acumulados desde a instalação dos rastreadores e os horímetros registrados para o mês de outubro de 2024 para as 99 empilhadeiras e desenvolvido um painel gerencial no powerBi. Este painel gerencial é apresentado na Figura 3.

As horas efetivas são contabilizadas a partir das informações dos horímetros de cada viagem e do tempo de ociosidade a cada viagem. Relacionando estas duas informações obtém-se o percentual de efetividade produtiva para cada empilhadeira e os resultados são apresentados na Figura 4.

Figura 3 - Horímetro das 99 empilhadeiras em out/2024.

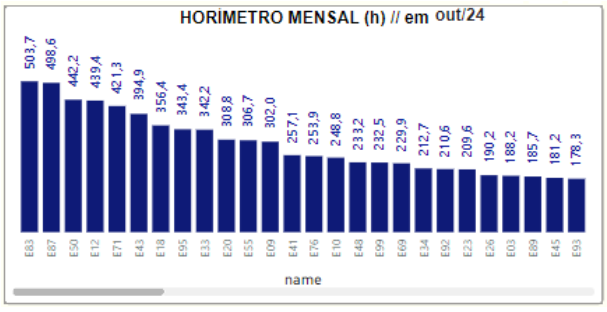
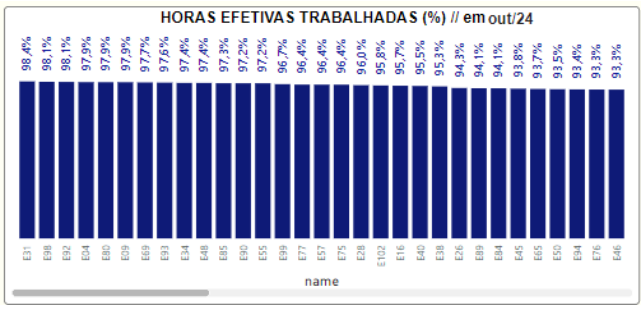


Figura 4 - Horas Efetivas das 99 empilhadeiras em out/2024.

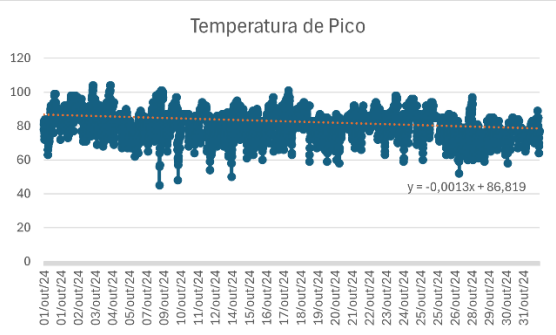


As medições de temperatura foram realizadas utilizando um sensor posicionado para captar variações térmicas ao longo do período de observação. Os valores registrados permitiram a análise do comportamento térmico e a identificação dos picos indesejados de temperatura que podem ocasionar a quebra dos motores das empilhadeiras. Os resultados das medições de temperatura foram inseridos no Excel e plotado um gráfico representado através da Figura 5.

Os dados coletados na empilhadeira E95, mostram a variação de temperatura em função do tempo e no período analisado a temperatura média foi de 82,65°C, com um desvio padrão de 7,29°C, indicando uma baixa variabilidade de 8,82%.

Observou-se ainda a frequência em que as temperaturas atingiram valores críticos acima de 95ºC. No intervalo analisado, foram coletadas 3141 amostras de temperatura para a empilhadeira E95 e em 175 amostras esta empilhadeira atingiu temperaturas acima de 95ºC.

Figura 5 - Gráfico das temperaturas registradas na empilhadeira E95 no mês de out/2024



Com as informações coletadas por este sistema, a gestão da manutenção é realizada com base na evolução temporal dos horímetros com a finalidade de realizar as paradas para as manutenções preventivas programadas de troca de óleo de motor, transmissão e outros componentes.

Outra informação importante para gestão da manutenção são os picos de temperatura que cada empilhadeira atinge. Este dado permite ao gestor de manutenção identificar o momento em que uma temperatura crítica foi registrada e solicitar uma parada preditiva para averiguar o motivo deste evento e realizar a devida manutenção preditiva que pode ser por exemplo limpar a colmeia do radiador com um soprador, permitindo um maior fluxo de vento no trocador de calor.

Conclusão

Os objetivos inicialmente propostos foram alcançados, resultando em um sistema capaz de monitorar os dados de operação de empilhadeiras em tempo real. Utilizando dispositivos como rastreadores, sensores de temperatura e velocidade, integrados ao Traccar, foi possível criar uma solução que atenda às necessidades de controle e manutenção preventiva desses veículos.

O sistema demonstrou potencial para otimizar a gestão de frotas industriais, contribuindo para a identificar equipamentos sobre utilizados e subutilizados, permitindo otimizar custos operacionais, aumento da segurança dos operadores e pedestres presentes no ambiente fabril. Estes benefícios obtêm-se a partir da coleta de dados sobre o uso dos veículos e das condições de operação. As medições e análises realizadas validaram a eficácia dos dispositivos integrados e evidenciaram os benefícios que este produto proporciona.

Por fim, este projeto representa um passo significativo rumo à modernização da logística industrial, alinhando-se a tendências amplamente discutidas na literatura sobre monitoramento e automação de frotas industriais. Além disso, a melhoria contínua das interfaces de análise de dados é essencial para maximizar a eficiência operacional e a segurança dos operadores. Dessa forma, este sistema atende às demandas atuais com uma base sólida para o desenvolvimento de soluções cada vez mais conectadas no contexto da Indústria 4.0.

Referências

[1] MENEZES, Natália Barroso; SILVA, Tamara Kraus da; SOUSA, Victoria Maturano Rodrigues de. **Gestão da manutenção preventiva de empilhadeiras em uma empresa de pequeno porte utilizando uma ferramenta IoT integrada a um software**. 2021.

[2] PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio Aquino Nascif. **Manutenção: função estratégica**. Qualitymark, 2009.

[3] BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Vol. 1 e 2. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

[4] AGUIRRE, Luiz Antonio. **Fundamentos de instrumentação**. São Paulo: Pearson, 2013.

[5] GAVADE, MR SHITAL N.; PATIL, R. N. **Communication Protocol Rs232 Implementation On Fpga**. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, v. 2, n. 12, p. 1-9, 2015.

[6] YING, L. I. U. et al. **The study of temperature calibration method for NTC thermistor**. In: 2020 IEEE 4th International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST). IEEE, 2020. p. 50-53.

Detecção de *Knock* com Validação Instrumental para Motores de Combustão Interna

Luan Rene Costa[1] (0009-0003-7574-1962), Thiago Augusto Araújo Moreira[1] (0009-0004-0553-5116), Fernando Antônio Rodrigues Filho[1] (0000-0003-1786-4158)

1 Centro Federal De Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG); Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Resumo: Os motores de combustão interna podem apresentar um fenômeno de combustão anormal, conhecido como *knock*, que ocorre antes do momento da centelha gerada pela vela de ignição. Esse fenômeno é prejudicial ao motor, pois causa altas pressões e temperaturas que podem danificar componentes internos, reduzir a eficiência do motor e aumentar as emissões de poluentes. A detecção de detonação será obtida utilizando um sensor KS, que é um transdutor piezoelétrico, viabilizando o projeto com componentes de baixo custo comparado aos sistemas utilizados atualmente para detecção de *knock*. Este transdutor converte as variações de vibrações causadas pela detonação em sinais elétricos. Os sinais analógicos produzidos são então convertidos em dados digitais por um conversor analógico-digital com alta taxa de aquisição, com resolução de 12 bits (4095 níveis). Essa alta velocidade de leituras permite uma detecção mais adequada das variações a cada 0,1º graus do eixo virabrequim a 3500 rotações por minuto. Os dados digitais serão processados pelo microcontrolador ESP32 S3, que é capaz de realizar leituras abaixo de 4 microssegundos. Esse processamento em tempo real é crucial para detectar rapidamente os eventos de detonação. A comunicação entre o microcontrolador e o computador será realizada através de uma interface USB Serial. Durante o monitoramento, serão coletados dados em uma janela de 4 segundos, que fornecem uma quantidade significativa de informações sobre o comportamento do motor. Espera-se verificar todas as variações de vibrações geradas e criar gráficos para análise das formas de vibrações no tempo e na frequência, comparando com os demais dados da literatura.

Palavras-chave: combustão anormal, knock, microcontrolador, transdutor, vibrações.

Introdução

A preocupação crescente com o meio ambiente leva ao surgimento de um novo mercado voltado para produtos mais eficientes e com menor potencial de poluição. Neste contexto, os consumidores estão cada vez mais conscientes e exigentes em relação aos fatores de sustentabilidade na sua tomada de decisão. De acordo com a Agência Internacional de Energia (*IEA - International Energy Agency*), estima-se que em 2050, aproximadamente 58% dos veículos de transporte de pessoas ainda utilizarão motores de combustão interna, sendo que 85% destes serão veículos híbridos

(Wang et al., 2017). Este dado demonstra a importância de aperfeiçoar os motores de combustão interna, especialmente em países com matrizes energéticas limpas e renováveis, onde veículos elétricos e híbridos são opções viáveis e sustentáveis.

Em motores de combustão interna, ondas de choque ocorrem no interior do cilindro, causadas pelas altas taxas de liberação de calor. As ondas colidem e reverberam no interior do cilindro ressoando a estrutura do motor e provocando um ruído, que origina o termo *knock* (GALLONI; FONTANA; STACCONE, 2014; KONIG; SHEPPARD, 1990).

Com a construção do controlador para detecção de *knock*, será possível favorecer o estudo e novos projetos que possam se utilizar do equipamento para análise de combustões, como, por exemplo, identificar misturas de diferentes aditivos e/ou combustíveis para reduzir a propensão de surgimento de combustões anormais no interior da câmara de combustão. Existem diversos estudos que utilizam um motor CFR (*Cooperative Fuel Research*) para detecção de *knock* junto a um transdutor de pressão alocado no interior da câmara de combustão, o que restringe o acesso ao estudo, devido ao alto custo de implementação do projeto e dificuldade de acesso à tecnologia. O estudo será realizado em um motor 250s da chevrolet, com implemento de um sistema de injeção eletrônica que possibilita geração de *knock* controlada para detecção e fins estudantis. Teste em outros motores com sistemas de injeção eletrônica nativos de fábrica, fazem uma correção dos parâmetros assim que surge um *knock*, dificultando a análise para fins de estudos das combustões geradas.

Tabela 1 – Ficha técnica motor 250s

MOTOR 250S	
Característica	**Especificação**
Tipo de Motor	6 cilindros em linha, aspirado
Cilindrada Total	4.093 cm³ (250 polegadas cúbicas)
Diâmetro dos Cilindros	98,4 mm
Curso dos Pistões	88,9 mm
Taxa de Compressão	7,8:1
Potência Máxima	140 cv a 3.800 rpm
Torque Máximo	29 kgfm a 2.000 rpm
Sistema de Alimentação	Carburador
Tipo de Combustível	Gasolina
Sequência de Ignição	1-5-3-6-2-4
Sistema de Arrefecimento	Líquido
Comando de Válvulas	Único, no bloco
Número de Válvulas	2 por cilindro (12 válvulas no total)
Peso do Motor	Aprox. 220 kg
Lubrificação	Cárter úmido

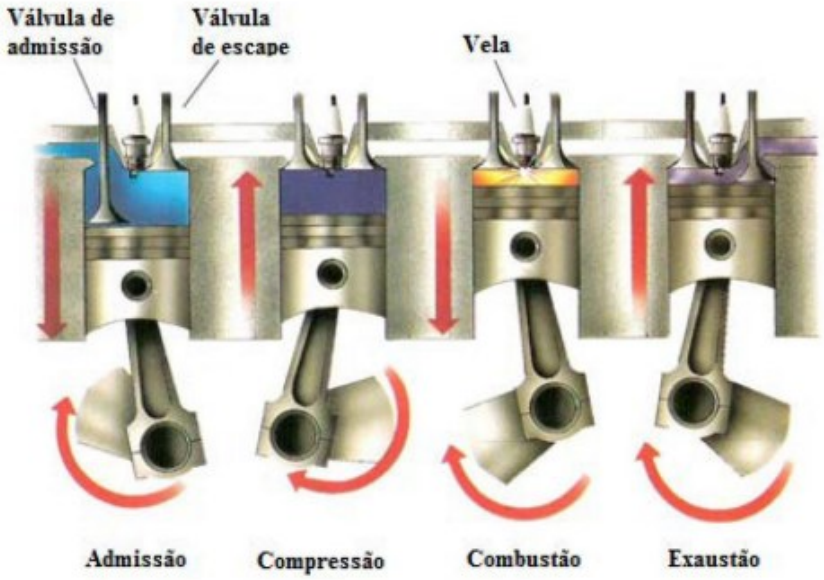
No motor Chevrolet 250s será instalado um sensor de detonação que converterá as vibrações em sinais de tensão. Este sinal será lido por uma entrada analógica do microcontrolador e convertido para um sinal digital de até 12 bits (0 a 4095). O código desenvolvido irá acumular dados durante 4 segundos, com leituras a cada 3,2 microssegundos. Este intervalo entre as leituras corresponde a aproximadamente 0,1º do virabrequim com o motor a 3500 RPM. Os dados coletados serão analisados e utilizados para realizar uma transformada de Fourier, permitindo a análise dos sinais no domínio da frequência, uma técnica essencial para a detecção e estudo das características do *knock*.

Este estudo propõe o desenvolvimento de um controlador capaz de detectar combustões anormais, conhecidas como *knock*, em motores de combustão interna por centelha. A detecção e mitigação do *knock* são cruciais para aumentar a eficiência, reduzir emissões e proteger o motor de danos. Com o aumento da busca por desempenho e menor consumo de combustível, os motores sobrealimentados geram uma maior pressão e densidade de ar na câmara de combustão, favorecendo o surgimento espontâneo de *knock* em diversas posições no interior da câmara (GALLONI; FONTANA; STACCONE, 2014; KONIG; SHEPPARD, 1990). Essas combustões anormais podem ocorrer antes da ignição pela vela, resultando em um aumento de pressão antes do Ponto Morto Superior (PMS) e potencialmente causando danos severos ao motor. Além disso, o *knock* que ocorre próximo ao momento da combustão normal pode resultar em uma explosão contrária à direção da combustão normal, reduzindo o desempenho do motor.

Metodologia

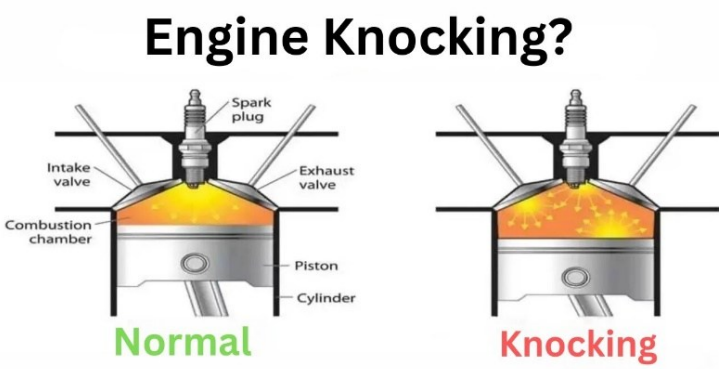
As combustões anormais "*knock*" podem ocorrer em motores de combustão interna à ignição por centelha, e podem ser causadas por baixa octanagem do combustível, por carbonização na câmara de combustão, altas taxas de compressão, temperatura elevada e avanço de ignição exagerado. Este fenômeno é bastante prejudicial, podendo ocasionar danos ao motor e aumento de emissão de poluentes. O *knock* ocorre antes da ignição por centelha gerada pela vela de ignição. A Figura 1 exibe as etapas de um motor de 4 tempos, destacando que o *knock* ocorre na etapa de compressão ou combustão, pois pode ocorrer durante o aumento de pressão ou no mesmo momento da propagação da explosão gerada pela ignição por centelha, mas vindo de outra região da câmara de combustão, criando uma colisão entre as duas ondas conforme figura 2.

Figura 1 – Etapas de um motor de 4 tempos



Fonte: Rodrigues, 2014

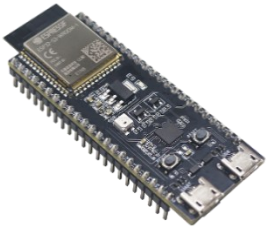
Figura 2 – Combustão normal e anormal



Fonte: https://www.researchgate.net/publication/331487370_Knock_Model_Evaluation-Gas_Engine

O estudo deste fenômeno é importante para aumento de eficiência e redução de emissão de poluentes. A captura destes dados de vibração em altas rotações é de extrema dificuldade devido à alta velocidade de aquisição de dados. No estudo estão sendo capturados 1.250.000 dados no intervalo de 4 segundos, obtendo o tempo entre cada leitura de 3,2 microssegundos. Esse alto processamento de dados dificulta as opções de microcontroladores disponíveis no mercado. Alguns especificidades são os empecilhos na escolha do microcontrolador, o primeiro item que restringe a escolha é a velocidade do conversor analógico digital, que precisa funcionar de forma contínua e ser capaz de fazer essas conversões em alta velocidade para não gerar atrasos na aquisição dados, o próximo requisito na escolha do controlador é possiblidade da utilização da técnica de DMA (Direct Memory Access), possibilitando que periféricos, tais como, o conversor analógico digital, possam ter acesso direto a memória sem a necessidade de utilização do processador principal do controlador. Microcontroladores de alto desempenho geralmente são construídos e utilizados para funções específicas, e os modelos de mercado com desempenho suficiente para processamento dos dados de aquisição de *knock* são poucos e todos possuem baixo espaço de armazenamento. A utilização do ESP32 S3 ilustrado na Figura 3 foi devido à junção de várias características importantes.

Figura 3 – Controlador ESP32 S3

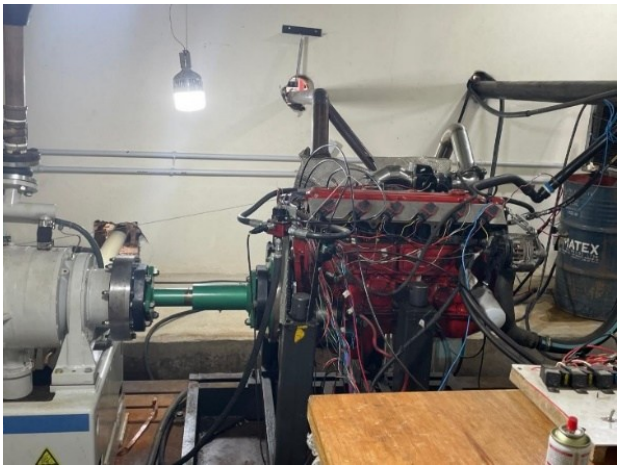


Fonte: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32s3/hw-reference/esp32s3/user-guide-devkitc-1.html

O motor utilizado para testes é o 250s Chevrolet ilustrado na Figura 4, que não possui injeção eletrônica de fábrica, sendo necessária a inclusão de um kit Fueltech FT550 de injeção eletrônica programável. Através deste sistema será possível gerar combustões anormais para fins de detecção. No bloco do motor foi inserido um sensor de detonação, que transforma variações de

vibrações em sinais elétricos. Estes sinais serão enviados para uma entrada analógica do microcontrolador e convertidos em sinais digitais de 12 bits. O motor será mantido em 3500 rotações por minuto e cada dado adquirido será de aproximadamente 0,1º do virabrequim.

Figura 4 – Motor 250s Chevrolet



Fonte: Próprio autor

Após os 4 segundos de dados acumulados, eles começam a ser enviados para o computador com uma velocidade de envio bastante inferior à de aquisição, utilizando uma comunicação serial e velocidade de 250.000 bits por segundo. Este processo demora cerca de 13 minutos, e gera um arquivo do tipo CSV com duas colunas de dados, a primeira do valor convertido transmitido pelo sensor e a segunda com o tempo entre cada leitura. Com os dados em formato de tabela, será feita a transformação dos valores no domínio do tempo para o domínio da frequência, através de uma transformada rápida de Fourier. Com os dados no domínio da frequência é possível identificar as características do sinal referente ao *knock*.

Tabela 2 – Exemplo de como os dados serão recebidos em CSV

3222	3.21
3222	3.21
3223	3.21
3154	3.21
3132	3.21
3189	3.21
3133	3.21
3115	3.21
3114	3.21

Fonte: Próprio autor

Conclusão

Com os dados adquiridos e tratados, será possível distinguir as combustões normais das anormais, proporcionando um enorme avanço na área de pesquisa, pois além de evidenciar fenômenos de *knock*, vários outros projetos podem ser desenvolvidos utilizando o protótipo desenvolvido, utilizando o sensor de vibração ou qualquer outro tipo de sensor.

Referências

BAÊTA, J. G. C. **Metodologia experimental para a maximização do desempenho de um motor multicombustível turboalimentado sem prejuízo à eficiência energética global.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)—Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

BARES, P. et al. A new knock event definition for knock detection and control optimization. **Applied Thermal Engineering**, v. 131, p. 80–88, 2018.

BRECQ, G.; BELLETTRE, J.; TAZEROUT, M. A new indicator for knock detection in gas SI engines. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 42, n. 5, p. 523–532, maio 2003

DOUAUD, A. M.; EYZAT, P. **Four-Octane-Number Method for Predicting the AntiKnock Behavior of Fuels and Engines**. SAE Technical Paper. Anais...SAE International, 1 fev. 1978.Disponível em: <https://doi.org/10.4271/780080>

ELMQVIST, C. et al. **Optimizing Engine Concepts by Using a Simple Model for Knock Prediction.** 27 out. 2003.Disponível em: < https://www.sae.org/content/2003-01-3123/>

PANZANI, G. et al. Engine knock detection: An eigenpressure approach. **IFACPapersOnLine**, v. 52, n. 5, p. 267–272, 2019.

ZHUANG, Y.; QIAN, Y.; HONG, G. The effect of ethanol direct injection on knock mitigation in a gasoline port injection engine. **Fuel**, v. 210, n. August, p. 187–197, 2017.

WANG, Z.; LIU, H.; REITZ, R. D. Knocking combustion in spark-ignition engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 61, p. 78–112, 2017.

Editoração e Projeto Gráfico
Artur Caron Mottin