



ANAIIS DO III SiPGEM

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

22 E 23 DE OUTUBRO DE 2025
BELO HORIZONTE - MG
PPGEM | CEFET-MG

Realização:



PPGEM
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG



S612a

Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do CEFET-MG
(3. : 2025 : Belo Horizonte/MG)

Anais do III SiPGEM / CEFET-MG [recurso eletrônico]. Departamento de
Engenharia Mecânica. Belo Horizonte: DEM/CEFET-MG, 2025.

114 p.

Disponível em: <https://www.sipgem.cefetmg.br/edicoes-anteriores/>
e-ISSN: 3085-6957

Realização: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM)
do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG.

Inclui referências

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

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. Artur Caron Mottin – Coordenador PPGEM

Prof. Dr. Thiago Augusto Araújo Moreira – SubCoordendor PPGEM

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Prof. Dr. Yukio Shigaki

APRESENTAÇÃO

Este Volume contém os Resumos Expandidos dos trabalhos apresentados no III Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (SiPGEM).

O SIPGEM é um evento anual de destaque regional, promovido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) 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, o SiPGEM tem como objetivo principal divulgar as pesquisas em andamento e fomentar o intercâmbio acadêmico entre docentes e discentes das duas linhas de pesquisa do programa, 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 também 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 Doutor Toshizaemom Noce, gerente responsável por patentes, parcerias universitárias e projetos inovadores avançados, intitulada “Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação nas Empresas - Stellantis”.

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 3º Simpósio da Pós-graduação em
Engenharia Mecânica do CEFET-MG

Realização:



Apoio:



Comissão Organizadora do III SiPGEM:

Prof. Dr. Yukio Shigaki

Presidente da comissão

Prof. Dra. Cristina Almeida Magalhães

Docente PPGEM

Profa. Dra. Ivanilza Felizardo

Docente PPGEM

Prof. Dr. Artur Caron Mottin

Docente PPGEM

Mateus Gabriel Neves Fagundes

Secretário do PPGEM

Comissão Científica do III 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 Henrique Martins Neto

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Prof. Dr. Thiago Augusto Araújo Moreira

Prof. Dr. Tiago de Freitas Paulino

Prof. Dr. Yukio Shigaki

PPGEM | CEFET-MG

BELO HORIZONTE

2025

SUMÁRIO

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE AR-CONDICIONADO COM CONDENSADOR GEOTÉRMICO, INSTALADO EM BELO HORIZONTE, OPERANDO COM REFRIGERANTES R22 E R1234ZE(E) <i>Antonio Pereira Guimarães Filho; Gustavo de Assis Xavier; Tiago de Freitas Paulino</i>	8 - 12
ANÁLISE ENERGÉTICA, EXERGÉTICA E AMBIENTAL DE CICLOS MODIFICADOS EM BOMBAS DE CALOR DE EXPANSÃO DIRETA COM CO ₂ E ASSISTÊNCIA SOLAR <i>Tiago de Alcantara Lopes, Cleison Henrique de Paula, Willian Moreira Duarte, Ludoff Santini, Tiago de Freitas Paulino</i>	13 - 18
ANÁLISE VIBRACIONAL NO DESGASTE DE FERRAMENTAS DURANTE PROCESSO DE USINAGEM EM LIGAS DE FERRO FUNDIDO <i>Alisson Ramon Gonçalves; Yukio Shigaki; Paulo Sérgio Martins</i>	19 - 24
BOMBAS DE CALOR ASSISTIDAS POR ENERGIA SOLAR OPERANDO COM CO ₂ : REVISÃO SISTEMÁTICA E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS <i>Gustavo Alexandre Fiuza; Everthon Oliveira, Tiago de Freitas Paulino</i>	25 - 29
CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA E MICROESTRUTURAL PARA OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO NOS REVESTIMENTOS DOS CHUTES DE MINÉRIO <i>Nayara Aparecida Lopes Viana; Sandro Cardoso Santos</i>	30 - 33
DESENVOLVIMENTO DE UM CONDUTO DE GASES DE EXAUSTÃO PARA TESTES EM DISPOSITIVOS DE TRATAMENTO DE GASES POLUENTES ADVINDOS DE MOTORES DO CICLO OTTO <i>Raphael Nogueira de Oliveira, Thiago Augusto Araújo Moreira</i>	34 - 40
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM COLETOR FRESNEL PARA USO EM LABORATÓRIO E PROCESSOS TÉRMICOS INDUSTRIAIS <i>Pedro Henrique Caetano O. Teixeira, José Henrique Martins Neto</i>	41 - 46
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MÁQUINAS INJETORAS ATRAVÉS DE ANEL METÁLICO DE CONTENÇÃO TÉRMICA A VÁCUO PARCIAL <i>Hélio Nogueira Lopes Júnior; André Guimarães Ferreira; Lucimar Venâncio Amaral</i>	47 - 53
INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DE MONTAGEM DA VELA DE IGNIÇÃO NA COMBUSTÃO, EMISSÕES E DESGASTE DOS ELETRODOS <i>Matheus Phylipe de Campos Araújo; Fernando Antônio Rodrigues Filho</i>	54 - 58
INFLUÊNCIA DO MATERIAL DA FERRAMENTA DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE ENGRENAGENS NO PROCESSO DE SHAVING <i>Leandro da Silva Braga, Yukio Shigaki, Paulo Sérgio Martins</i>	59 - 66
INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS <i>Guilherme Eduardo Bastos, Yukio Shigaki</i>	67 - 72

SUMÁRIO

INVÓLUCROS PLÁSTICOS PARA DPS: DESENVOLVIMENTO, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA SEGUNDO UL 1449 <i>Victor Gonçalves Souza, Cristina Almeida Magalhães</i>	73 - 77
MODELO MATEMÁTICO COM CÓDIGO DO GT-POWER DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA TURBO ALIMENTADO COM ETANOL E100 <i>Dionata Domingos Martins; Fernando Antônio Rodrigues Filho</i>	78 - 84
OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA ESO APLICADA NA ENGENHARIA MECÂNICA - UMA REVISÃO SISTEMÁTICA PELA METODOLOGIA PRISMA <i>Diogo Alexandre Silva Santos, Cristina Almeida Magalhães</i>	85 - 92
REVISÃO DOS ESTUDOS SOBRE OS EFEITOS DA TEMPERATURA E DA ESTABILIDADE NA OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO POR REFORMA A VAPOR DO ETANOL <i>Josiel Coelho Gomes de Oliveira; Wagner Sade</i>	93 - 99
SELEÇÃO DE RESINA DE BAIXO CUSTO PARA MOLDES POLIMÉRICOS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA TIPO DLP PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS <i>Thiago Van Petten de Vasconcelos, Artur Caron Mottin</i>	100 - 103
SIMULAÇÃO E EXPERIMENTO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS PARA MOLDES DE ROTOMOLDAGEM <i>Henrique Rodrigues Braga; João Marinho; Tiago Fraga; Yukio Shigaki; Jânes Landre Jr.</i>	104 - 108
SIMULAÇÃO TERMO HIDRÁULICA DOS IMPACTOS DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO NAS CONDIÇÕES DE FLUXO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL <i>Fabricio Geraldo Silva Barros; José Leôncio Fonseca de Souza</i>	109 - 114

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Análise energética de um sistema de ar-condicionado com condensador geotérmico, instalado em Belo Horizonte, operando com refrigerantes R22 e R1234ZE(E)

Antonio Pereira Guimarães Filho¹ (0009-0008-0403-0051), Gustavo de Assis Xavier² (0009-0007-9704-9247), Tiago de Freitas Paulino³ (0000-0002-2446-0373).

1 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

2 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

3 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo: A crescente urbanização, o aumento da temperatura média global e a busca por maior qualidade de vida têm causado uma crescente demanda por estratégias de adaptação ambiental que promovam o bem-estar térmico nos espaços construídos. A solução mais comum para alcançar esse conforto térmico é o uso de sistemas de climatização, entretanto esses dispositivos têm impacto direto no aumento do consumo de energia elétrica, potencializando assim, a busca por novas tecnologias e por maior eficiência desses equipamentos. O objetivo desse trabalho é analisar a inserção de bombas de calor geotérmicas em uma planta de refrigeração industrial localizada em um ambiente tropical, além de simular o uso de refrigerantes com melhores performance energética e ambiental. Foi feita a simulação de um grande sistema de climatização, operando com um trocador de calor geotérmico, funcionando com dois tipos de refrigerantes, R22 e R1234ZE(E), localizado em Belo Horizonte. Foi feita a análise energética do sistema. Os resultados indicaram maiores valores de COP, redução nos valores anuais de consumo de eletricidade e consequente redução na emissão de poluentes, indicando a viabilidade do uso de trocadores geotérmicos em locais de clima tropical e, reafirmando a viabilidade do uso de fluidos refrigerantes com maior eficiência térmica, baixo impacto ambiental e segurança.

Palavras-chave: Condicionamento de ar; COP; Eficiência energética; Energia geotérmica.

Introdução: O crescimento das temperaturas médias globais potencializa a busca por conforto térmico. Particularmente em países de clima tropical, tem-se observado elevação da demanda por ambientes climatizados. As cidades tropicais são naturalmente quentes e a produção do clima urbano e geração das ilhas de calor são responsáveis pela intensificação do desconforto térmico e pela diminuição da qualidade ambiental e de vida das pessoas [1]. Estas alterações também têm sido observadas no Brasil, as mudanças climáticas globais têm influenciado o campo de temperatura brasileiro [2]. Em razão disto, o uso de aparelhos de ar-condicionado e outros sistemas de refrigeração torna-se cada vez mais comum, aumentando-se assim, o consumo de energia elétrica, trazendo implicações ambientais, como o aumento das emissões de carbono, entre outros. Após décadas de baixo crescimento econômico, no período entre os anos de 1980 e 1990, a elevação da renda média das famílias criou condições para atender a uma demanda até então reprimida por conforto ambiental. O consumo de energia elétrica para condicionamento de ar nas

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

residências brasileiras mais que triplicou nos últimos 12 anos atingindo 17% do consumo total, valor que está em linha com os dados observados globalmente [3]. Nos prédios comerciais brasileiros, o uso de sistemas de ar-condicionado é, ainda maior, sendo responsável por aproximadamente 50% do consumo de energia [4].

O desenvolvimento vivenciado atualmente tem causado uma dependência cada dia maior de energia e neste contexto, as energias renováveis se consolidam como um recurso viável e com grandes oportunidades de exploração. As fontes de energia renováveis são as consideradas como inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem usadas [3]. São consideradas limpas, pois emitem menos gases de efeito estufa (GEE) que as fontes fósseis e, por isso, têm conseguido boa inserção no mercado brasileiro e mundial. Com o desenvolvimento e aproveitamento de novas tecnologias, a Geotermia tem ganhado destaque. Já aplicada em outros países da Europa e nos Estados Unidos há pelo menos 20 anos, o sistema geotérmico é uma das alternativas de energia renovável que mais cresce no planeta [5]. O uso da energia geotérmica no Brasil, principalmente voltado para climatização dos edifícios, tem ganhado forças. Há registros de identificação de recursos de baixa temperatura em quantidades significativas, na crosta terrestre brasileira [6].

Os sistemas geotérmicos, embora mais estudados para estabilização de temperatura de edificações em países de clima frio, para fins de aquecimento, também podem ser utilizados para fins de resfriamento em edificações de climas temperados e até mesmo quentes. As condições climáticas afetam significativamente o desempenho dos sistemas de bomba de calor, o que deve levar a estratégias marcadamente diferentes para aquecimento e resfriamento [7]. Embora existam poucos estudos analisando a adequação de bombas de calor geotérmicas para fins de resfriamento em uma faixa ampla de temperatura ambiente e radiação solar, característica de países de clima quente, a utilização de ar-condicionado geotérmico em climas quentes mesmo em aplicação apenas para resfriamento é técnica e economicamente viável [8]. Na Arábia Saudita foi feito um estudo para avaliação do uso potencial de fonte de energia geotérmica rasa para aquecimento e resfriamento do ar visando-se reduzir custos e problemas ambientais. Neste estudo, seis cidades foram selecionadas representando cinco zonas climáticas diferentes. Foi demonstrado que o sistema proposto atendeu totalmente à necessidade de aquecimento e parcialmente à demanda de resfriamento. O clima local é quente e seco com um verão quente com temperaturas médias em torno de 45 °C. Com o uso tubulações enterradas, pôde-se reduzir a temperatura do ar em 7 °C. [9]. Ressalte-se que essa redução não proporcionou o conforto térmico desejado, necessitando-se da adição de uma fonte de auxiliar, entretanto contribuiu em média com uma economia da ordem de 36% no consumo de energia.

No Brasil, mais precisamente em Pato Branco no Paraná, estudou-se o uso da geotermia superficial no conforto térmico das edificações. A análise da energia geotérmica superficial para o conforto térmico das edificações, apresentou vantagens na maior parte do tempo e em alguns horários desvantagens [10]. O tempo médio de retorno do investimento foi aproximadamente de 2,5 a 3 anos. Na região central da Cidade de Sinop, localizado no Bioma Amazônia, ao norte do Estado de Mato Grosso (MT), região com temperaturas próximas a 40°C, verificou-se o potencial do sistema de trocador de calor terra-ar, com resfriamento de até 9,7°C, constatado na diferença de temperaturas do ar no ambiente interno e do ar na saída do tubo do trocador. Entre protótipos de edificações com sistema de trocador terra-ar e edificações normais, a diferença foi de 1,8°C. A diferença de temperaturas entre 9,7°C e 1,8°C é o potencial a ser explorado em novos estudos [11].

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Os estudos de bombas de calor geotérmicas em climas tropicais são escassos e os sistemas tradicionais, amplamente empregados, utilizam fluidos de alto impacto ambiental. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento de um sistema de climatização, operando com condensador geotérmico, utilizando-se o refrigerante R22 e o R1234ZE(E). Será feita a análise energética e o impacto ambiental do sistema.

Metodologia: Foi desenvolvido um modelo matemático numérico para a análise energética do sistema em estudo, sendo utilizada, linguagem Python. Para a seleção das propriedades termodinâmicas, foi utilizada a biblioteca Cool Prop [12]. Foram desenvolvidos modelos matemáticos para o compressor, o condensador, o trocador geotérmico e para a bomba, além do modelo para a análise energética. O evaporador e o dispositivo de expansão não foram modelados, suas condições foram consideradas constantes.

Neste estudo, foi utilizado um chiller equipado na descarga com válvula de recirculação que em função da taxa da carga, regula a carga térmica, controlando a vazão de refrigerante que percorre os trocadores de calor. Parte do fluxo que atravessa o compressor não é direcionada aos trocadores de calor. Portanto, a vazão de refrigerante que atinge os trocadores de calor e a vazão imposta pelo compressor podem ser consideradas como duas variáveis distintas. A razão entre elas estabelece a taxa de carga do sistema. No estudo foi considerada uma faixa de 0% a 120%.

Foram avaliadas as regiões de superaquecimento, condensação e subresfriamento do refrigerante para a criação do modelo com parâmetros concentrados do condensador.

Para a simulação do trocador geotérmico, foi considerada uma resistividade térmica de 0,12mK/W e um total de 140 estacas, com profundidade de 45m e diâmetro de 125mm. Considerou-se para a montagem, tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) com diâmetro interno nominal de 26mm em um arranjo simples em “U”. Foi utilizada a média de temperatura dos anos de 2021, 2022 e 2023, para verificação da temperatura do solo [13].

O modelo Incropera [14] foi usado para determinar a temperatura da água na saída do trocador de calor geotérmico. O cálculo é baseado no balanço de energia dentro do trocador de calor geotérmico, e o coeficiente de transferência de calor por convecção e a resistividade térmica total da pilha geotérmica são determinados. As temperaturas da água de saída e entrada no trocador de calor geotérmico foram consideradas as mesmas temperaturas que a água de entrada e saída do condensador, respectivamente.

O cálculo das perdas de carga ao longo da tubulação (tubos, válvulas e acessórios) foi desenvolvido pelo método de Darcy-Weisbach. Para a queda de pressão na tubulação o fator de atrito foi calculado pela correlação de Colebrook.

Resultados e Discussão: Análise Energética: A análise energética teve como objetivo avaliar o desempenho do sistema sob a ótica da eficiência energética. Para isso, foram utilizados dois parâmetros, o coeficiente de performance (COP) e o consumo anual de energia elétrica. O COP permite quantificar a eficiência do sistema em transformar energia elétrica em energia útil, enquanto o consumo anual fornece uma estimativa do impacto energético ao longo do tempo de operação.

Pela Figura 1, pode-se observar que o sistema com o fluido refrigerante R1234ZE(E) apresenta um COP de aproximadamente 3,88, já com o fluido refrigerante R22 apresenta um COP menor, cerca

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

de 2,53, indicando maior eficiência em termos de desempenho energético. O fluido R1234ZE(E) possui propriedades termodinâmicas que proporcionam um ciclo de refrigeração mais eficiente, como melhor comportamento na troca de calor, menor viscosidade e menor pressão de operação em certas condições

Pela Figura 2, observa-se que utilizando-se o fluido refrigerante R1234ZE(E), o consumo de eletricidade é de aproximadamente 154.667,25 kWh. O consumo anual de eletricidade com o fluido refrigerante R22 é significativamente maior, cerca de 236.717,98 kWh, indicando um consumo cerca de 35% menor quando em operação com o refrigerante R1234ZE(E). A substituição desses fluidos pode resultar em uma maior eficiência energética e redução de custos com eletricidade na operação da planta.

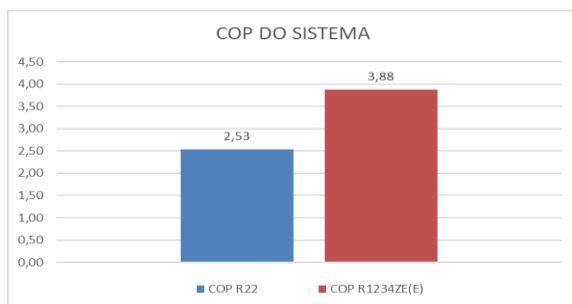


Figura 1 – Cop do sistema

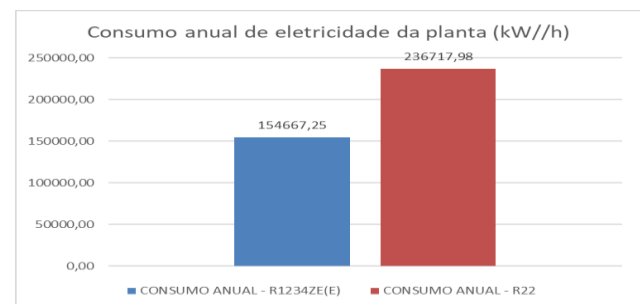


Figura 2 – Consumo anual de eletricidade

Conclusão: O uso do gás refrigerante R1234ZE(E), mostrou-se em todas as simulações propostas mais adequado que o R22, proporcionando uma eficiência significativamente maior, com um COP aproximadamente 54% superior, o que se traduz em menor consumo de energia elétrica para a mesma capacidade de refrigeração. Além disso, a análise do TEWI (Total Equivalent Warming Impact) demonstra que o R1234ZE(E) também oferece uma redução expressiva no impacto ambiental total, com destaque para as emissões indiretas, que são influenciadas pela eficiência energética do sistema.

Essa combinação de maior desempenho operacional e menor impacto ambiental torna o R1234ZE(E) uma alternativa altamente recomendada e favorece fortemente a substituição do R22, desde que sejam promovidas as adaptações técnicas necessárias — como compatibilidade de componentes, ajustes de pressão e reconfiguração de controles — e que sejam tecnicamente e economicamente viáveis.

Agradecimentos: Ao meu orientador Tiago de Freitas Paulino, pela oportunidade de desenvolver este trabalho. Pela orientação, parceria e generosidade, fazendo que o trabalho fluísse mesmo nos momentos de maior dificuldade.

Referências

[1] AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. Detecção remota de ilhas de calor superficiais: exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil; [2] BITENCOURT, D. P. et al. Frequência, duração, abrangência espacial e intensidade das ondas de calor no Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v. 31, n. 4, p. 506-517, 2016.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

[3] EPE. Uso de ar-condicionado no setor residencial brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço da eficiência energética. Nota Técnica EPE 030/18. Ministério de Minas e Energia, 2018.

[4] ELETROBRAS/PROCEL. Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: sumário executivo, ano base 2005. Rio de Janeiro, 2005.

[5] FERREIRA, Antônio C.; DURANTE, Luciane C.; PALLEJAS, Ivan Julio Apolonio C.; DA GUARDA, Emeli L. Ap. Systematic and patent review on geothermic applied to building cooling systems in tropical climate.

[6] OMIDO, Agleison Ramos et al. Uso da energia geotérmica na construção civil: um panorama da sua aplicação em edificações brasileiras.

[7] ZOGOU, O.; STAMATELOS, A. Efeito das condições climáticas na otimização do projeto de sistemas de bombas de calor para aquecimento e resfriamento de ambientes. Energy Conversion and Management, v. 39, p. 609-622, 1998.

[8] DUARTE, Willian M.; PAULINO, Tiago F.; TAVARES, Sinthya G.; CANÇADO, Kássio N.; MACHADO, Luiz. Comparative study of geothermal and conventional air conditioner: A case study for office applications.

[9] OUZANE, M.; NAQASH, M. T.; HARIRECHE, O. Assessment of the potential use of shallow geothermal energy source for air heating and cooling in the Kingdom of Saudi Arabia.

[10] RIBEIRO, Nédio Duarte. O uso da geotérmica superficial no conforto térmico das edificações em Pato Branco - PR. 2024. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2024. Dissertação (Mestrado).

[11] OHIRA, Luís A.; SHIGUEHARU. Análise comparativa de desempenho de trocador de calor. 2015.

[12] BELL, I. H.; WRONSKI, J.; QUOILIN, S.; LEMORT, V. Avaliação de propriedades termofísicas de fluidos puros e pseudopuros e a biblioteca de propriedades termofísicas de código aberto Coolprop. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 53, n. 6, p. 2498-2508, 2014.

[13] INMET. Dados históricos. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 17 abr. 2025.

[14] INCROPERA, F.; DE WITT, D.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. Fundamentos de transferência de calor e de massa. Tradução da 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Análise energética, exergética e ambiental de ciclos modificados de bomba de calor de expansão direta assistida por energia solar

Tiago de Alcantara Lopes¹, Cleison Henrique de Paula², Willian Moreira Duarte³, Ludoff Santini⁴, Tiago de Freitas Paulino⁵

^{1, 4, 5} Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), Angra dos Reis, RJ, Brasil.

³ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo, sob o ponto de vista termodinâmico, realizar uma análise comparativa de três configurações do ciclo transcrito de CO₂ aplicadas a uma bomba de calor de expansão direta assistida por energia solar (DX-SAHP). A análise em questão consiste na identificação de modificações capazes de aprimorar o desempenho energético, exergético e ambiental do sistema em estudo. As configurações avaliadas foram: o ciclo básico (CB), o ciclo de dupla expansão (CDE) e o ciclo com trocador de calor interno (CTCI). A modelagem matemática foi implementada em Python, em regime permanente, com o uso da biblioteca CoolProp para determinação das propriedades termodinâmicas do CO₂, baseada em dados experimentais de um sistema DX-SAHP real. Os resultados demonstraram que o CDE apresentou uma eficiência exergética aproximadamente 39% superior ao CB, além de maior estabilidade no superaquecimento. O CTCI também mostrou bom desempenho energético e menor variabilidade térmica. Em relação ao impacto ambiental, o CDE apresentou o melhor desempenho no Coeficiente de Performance Ecológico (ECOP), enquanto os valores de TEWI (Impacto Total Equivalente de Aquecimento) permaneceram semelhantes entre as configurações. Portanto, observa-se que entre as configurações avaliadas, o CDE e o CTCI oferecem vantagens significativas de estabilidade e eficiência energética, sendo alternativas promissoras para aplicações que demandem alta confiabilidade e baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: bomba de calor; CO₂; ciclo transcrito; energia solar; exergia.

Introdução

A crescente preocupação global com as alterações climáticas e a necessidade de mitigar emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a adoção de tecnologias de aquecimento e refrigeração energeticamente eficientes e ambientalmente sustentáveis. No contexto da produção

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

de água quente para uso residencial e comercial, as bombas de calor mostram-se como alternativas promissoras por fornecerem elevado desempenho térmico com consumo elétrico relativamente baixo. A integração da energia solar a esses sistemas, por meio das bombas de calor de expansão direta assistidas por energia solar (DX-SAHP), permite aproveitar a radiação incidente para incrementar a carga térmica do evaporador, reduzindo a potência elétrica requerida pelo compressor e elevando o coeficiente de performance (COP).

O dióxido de carbono (CO_2 , R-744) tem sido destacado como refrigerante ecológico por apresentar ODP nulo e baixo GWP, além de propriedades termodinâmicas adequadas para aplicações de aquecimento de água, especialmente em ciclos transcíticos. Entretanto, a operação transcítica impõe desafios de controle térmico e de pressão, visto que o ponto ótimo de rejeição de calor (pressão ótima de alta) depende de variáveis operacionais e ambientais. Na literatura, estudos experimentais e numéricos demonstram que o ajuste do ponto de rejeição de calor e o controle do superaquecimento são determinantes para a eficiência energética e exergetica do sistema (DUARTE et al., 2021; PAULINO et al., 2019).

O ciclo básico (CB) com CO_2 costuma ser constituído por um evaporador, compressor, resfriador de gás e um dispositivo de expansão que regula a pressão de alta segundo critérios de COP. Todavia, essa configuração não assegura controle refinado do superaquecimento na entrada do compressor. Tal fato, em sistemas assistidos por radiação solar intermitente, pode provocar variações acentuadas no ponto de operação. Em várias investigações, verificou-se que flutuações de superaquecimento aumentam a destruição de exergia e ampliam as irreversibilidades locais, reduzindo a eficiência exergetica global (HUMIA et al., 2021).

O ciclo de dupla expansão (CDE) propõe a inserção de um segundo dispositivo de expansão e um reservatório de líquido, permitindo o controle independente da pressão de alta e do superaquecimento, possibilitando estabilizar a condição de vapor superaquecido antes do compressor, reduzindo a variabilidade operacional e a destruição exergetica associada às transições rápidas de carga. Estudos prévios indicam ganhos em exergia e estabilidade quando se empregam estratégias de controle específicos para CDE em comparação com o ciclo básico (DUARTE et al., 2021).

O ciclo com trocador de calor interno (CTCI) representa uma alternativa, ao promover sub-resfriamento do líquido antes da expansão e um leve superaquecimento do vapor antes do compressor, por meio da troca térmica entre as linhas de alta e baixa pressão. Esse arranjo pode reduzir a entropia gerada nas trocas térmicas e diminuir a exergia destruída no conjunto. A literatura relata que este ciclo é uma solução eficaz para reduzir flutuações térmicas e melhorar a operação em regimes parciais de carga (PAULINO et al., 2019).

Considerando as particularidades de operação do CO_2 em regime transcítico é imprescindível avaliar, de forma comparativa, como modificações no ciclo afetam o desempenho energético, a qualidade da energia (exergia) e o impacto ambiental produzido (ECOP e TEWI). Este trabalho, portanto, busca quantificar tais efeitos para três configurações (CB, CDE e CTCI), baseando-se em dados experimentais e em modelagem matemática validada, de modo a fornecer subsídios

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

para o projeto e controle de DX-SAHP com CO₂ (DUARTE et al., 2021; DE PAULA et al., 2021; HUMIA et al., 2021).

Metodologia

A metodologia adotada contempla o desenvolvimento de um modelo matemático, em regime permanente, sob o ponto de vista termodinâmico e implementado no Python, com o intuito de simular o comportamento de três configurações distintas para uma DX-SAHP operando com CO₂ em regime transcrito, onde as propriedades termodinâmicas do CO₂ foram obtidas por meio da biblioteca CoolProp, cuja precisão é amplamente validada na literatura para fluidos puros e misturas (BELL et al., 2014). Vale a pena destacar que estas configurações podem ser observadas em Pérez-Garcia et al. (2013).

Neste trabalho, de forma geral, foram modelados os seguintes componentes: evaporador, compressor, resfriador de gás, dispositivo de expansão, reservatório (quando aplicável), trocador de calor interno e válvula de controle de contrapressão.

As variáveis de entrada do modelo são: pressão de evaporação, pressão do resfriador de gás, eficiência isentrópica do compressor, temperatura do fluido refrigerante na saída do resfriador de gás e a vazão mássica do fluido refrigerante, vide Tab. (1). Os valores destas variáveis foram obtidos de dados experimentais publicados no estudo de (Duarte et al., 2021). As variáveis de saída do modelo são: potência elétrica consumida pelo compressor, capacidade de refrigeração, taxa de transferência de calor no resfriador de gás, COP, ECOP, eficiência exergética, TEWI e grau de superaquecimento.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada no modelo, Duarte et al. (2021)

Pressão de evaporação (kPa)	4766
Pressão do resfriador de gás (kPa)	7965
Eficiência isentrópica do compressor (-)	0,74
Temperatura na saída do resfriador de gás (°C)	32,46
Temperatura de evaporação (°C)	12,31
Vazão mássica do fluido refrigerante (kg/s)	0,0201

Para cada componente, foram formulados balanços de massa e energia em regime permanente, bem como balanços de exergia para determinar a destruição total de exergia do sistema. Cada configuração foi simulada para os mesmos conjuntos de dados experimentais, assegurando comparabilidade direta entre os resultados. Foram calculados o desempenho energético (COP), eficiência exergética (η_{exergy}), desempenho ambiental por meio tanto do ECOP (razão entre taxa de transferência de calor no resfriador de gás e destruída total de exergia) quanto do TEWI (cálculo do impacto ambiental devido emissões direta e indireta), conforme ilustrado por trabalhos de (de PAULA et al., 2021; HUMIA et al., 2021). A validação do modelo foi realizada confrontando-se os resultados simulados com os dados experimentais disponíveis, observando-se boa concordância para COP, conferindo robustez.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Finalmente, realizou-se análise comparativa entre as configurações, enfatizando as diferenças em eficiência energética, exergética e impactos ambientais. Os resultados foram apresentados de maneira a facilitar a interpretação dos benefícios técnicos e ambientais de cada modificação, fornecendo diretrizes para projeto e controle de DX-SAHP com CO₂.

Resultados e Discussão

O resultado da simulação para as três configurações pode ser observado na Tab. (2).

Tabela 2 – Valores de saída para as configurações avaliadas

CICLO BÁSICO (CB)							
\dot{W}_{comp} (kW)	\dot{Q}_{evap} (kW)	\dot{Q}_{resf} (kPa)	COP (-)	ECOP (-)	η_{exergy} (%)	TEWI (kgCO ₂)	ΔT_{sup} (°C)
0,646	3,303	3,949	6,11	8,34	26,72	912,1	23,96
CICLO DE DUPLA EXPANSÃO (CDE)							
\dot{W}_{comp} (kW)	\dot{Q}_{evap} (kW)	\dot{Q}_{resf} (kPa)	COP (-)	ECOP (-)	η_{exergy} (%)	TEWI (kgCO ₂)	ΔT_{sup} (°C)
0,542	2,73	3,27	6,04	9,33	35,19	764,7	7
CICLO COM TROCADOR DE CALOR INTERNO (CTCI)							
\dot{W}_{comp} (kW)	\dot{Q}_{evap} (kW)	\dot{Q}_{resf} (kPa)	COP (-)	ECOP (-)	η_{exergy} (%)	TEWI (kgCO ₂)	ΔT_{sup} (°C)
0,540	2,72	3,26	6,04	9,53	36,62	761,7	6,72

Os resultados mostraram que apesar do CTCI não possuir maior COP, ele apresenta a maior a eficiência energética global, pois possui maior eficiência exergética. Além disso, O CTCI mostra que ao inserir no ciclo um trocador de calor interno permite possui melhor controle de grau de superaquecimento em relação as demais configurações. Outro fato interessante é que o CB possui elevado grau de superaquecimento devido não possuir nenhum acessório que possibilitam esse controle. A análise dos parâmetros ECOP e TEWI revela que o CTCI possui a melhor performance ambiental, pois obteve maior valor de ECOP, pois possui menor destruição de exergia, fato que faz com o ciclo aproveite melhor aproveitamento energético. Outro fato que reforça essa ideia é o ciclo ter alcançado menor valor de TEWI mostrando que o ciclo produz menor impacto ambiental fato observado principalmente devido a menor emissão indireta produzida (relacionado ao menor consumo de potência elétrica do compressor).

Conclusão

O estudo confirmou que as modificações no ciclo de uma bomba de calor operando com CO₂ em ciclo transcrito podem resultar em ganhos significativos de desempenho e estabilidade operacional. O ciclo com trocador de calor apresentou os melhores resultados gerais, com eficiência exergética e ambiental superior e controle preciso do superaquecimento, enquanto o ciclo de dupla expansão mostrou excelente eficiência também. Portanto, as configurações CDE e CTCI representam avanços interessantes para o uso de CO₂ em sistemas de aquecimento

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

sustentáveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental e o aumento da confiabilidade operacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio e as contribuições dos colegas e pesquisadores que participaram das discussões técnicas e revisões deste trabalho.

Referências

Agrawal Neeraj, Bhattacharyya, Souvik, Sarkar J. Optimization of two-stage transcritical carbon dioxide heat pump cycles. **International Journal of Thermal Sciences** 46 (2007) 180–187

Aprea, Ciro, Maiorino, Angelo. Heat rejection pressure optimization for a carbon dioxide split system: Na experimental study. **Applied Energy** 86 (2009) 2373–2380.

Bell IH, Wronski J, Quoilin S, Lemort V. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 2014; 53(6): 2498-508.

Chen, Ying, Gu, Junjie. The optimum high pressure for CO₂ transcritical refrigeration systems with internal heat exchangers. **International Journal of Refrigeration** 28 (2005) 1238–1249

Duarte, Willian M., Paulino, Tiago F., Pabon, Juan J.G., Sawalha, Samer, Machado, Luiz. Refrigerants selection for a direct expansion solar assisted heat pump for domestic hot water. **Solar Energy** 184 (2019) 527–538

Duarte, Willian M., Rabelo, Sabrina N., Paulino, Tiago F., Pabon, Juan J.G., Machado, Luiz. Experimental performance analysis of a CO₂ direct-expansion solar assisted heat pump water heater. **International Journal of Refrigeration** 125 (2021) 52–63

García, Pérez V., Flores, Belman J.M., Esbrí, Navarro J., Maya, Rubio C. Comparative study of transcritical vapor compression configurations using CO₂ as refrigeration mode base on simulation. **Applied Thermal Engineering** 51 (2013) 1038e1046.

Ge, Y.T., Tassou, S.A. Control optimisation of CO₂ cycles for medium temperature retail food refrigeration systems. 2009 **Elsevier Ltd and IIR**

Humia, Gleberson M., Duarte, Willian M., Pabon, Juan J. G., Paulino, Tiago F., Machado, Luiz. Experimental study and simulation model of a direct expansion solar assisted heat pump to CO₂ for water heating: Inventory, coefficient of performance and total equivalent warming impact. **Solar Energy** 230 (2021) 278–297

Kauf, Friedrich. Determination of the optimum high pressure for transcritical CO₂-refrigeration cycles. **Int. J. Therm. Sci.** (1999) 38, 325-330. Elsevier, Paris

Kim, Sung C., Won, Jong P., Kim, Min S., Effects of operating parameters on the performance of a CO₂ air conditioning system for vehicles. **Applied Thermal Engineering** 29 (2009) 2408–2416

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Kong, Xiangqiang, Kailin Jiang, Shandong Dong, Ying Li, Jianbo Li. Control strategy and experimental analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater with R134a. 2017 Elsevier Ltd

Liao, S.M., Zhao, T.S., Jakobsen, A. A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles. **Applied Thermal Engineering** 20 (2000) 831-841.

Paula, Cleison H., Duarte, Willian M., Rocha, Thiago T. M., Oliveira, Raphael N., Maia, Antônio A. T. 2021. Energetic, Exergetic, Environmental, and Economic Assessment of a Cascade Refrigeration System Operating with Four Different Ecological Refrigerant Pairs. **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration** Vol. 29, No. 3 (2021) 2150025 (14 pages) © World Scientific Publishing Company DOI: 10.1142/S2010132521500255

Paulino, Tiago F., Nunes, Raphael O., Maia, Antônio A.T., Palm, Bjorn., Machado, Luiz. Modeling and experimental analysis of the solar radiation in a CO₂ directexpansion solar-assisted heat pump. **Applied Thermal Engineering** 148 (2019) 160-172.

Pérez-García, V., Belman-Flores, J. M., Navarro-Esbrí, J., Rubio, C. Comparative study of transcritical vapor compression configurations using CO₂ as refrigeration mode base on simulation. **Applied Thermal Engineering** 51. 1-2 (2013) 1038-1046.

Qi, Peng-Cheng, He, Ya-Ling, Wang, Xiao-Lin, Meng, Xiang-Zhao. Experimental investigation of the optimal heat rejection pressure for a transcritical CO₂ heat pump water heater. **Applied Thermal Engineering** 56 (2013) 120-125

Rabelo, Sabrina N., Paulino, Tiago F., Duarte, Willian M., Maia, Antônio A.T. Experimental analysis of the influence of the expansion valve opening on the performance of the small size CO₂ solar assisted heat pump. **Solar Energy** 190 (2019) 255-263.

Rabelo, Sabrina N., Paulino, Tiago F., Soares, Carla P.M., Duarte, Willian M., Machado, Luiz., Nunes, Raphael O. Mass flow characteristics of CO₂ operating in a transcritical cycle flowing through a needle expansion valve in a direct-expansion solar assisted heat pump. **Journal of Building Engineering** 67 (2023) 105963

Sarkar, J., Bhattacharyya, Souvik, Gopal, Ram M. Optimization of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications. **International Journal of Refrigeration** 27 (2004) 830-838

Shao, Liang-Liang, Zi-Yang Zhang, Chun-Lu Zhang. Constrained optimal high-pressure equation of CO₂ transcritical cycle. **Applied Thermal Engineering** 128 (2018) 173-178.

Wang, Shouguo, Hanfei Tuo, Feng Cao, Ziwen Xing. Experimental investigation on air-source transcritical CO₂ heat pump water heater system at a fixed water inlet temperature. 2012 Elsevier Ltd and IIR.

Yang, Liang., Li, Hui., Cai, Si-Wei., Shao, Liang-Liang., Zhang, Chun-Lu. Minimizing COP loss from optimal high-pressure correlation for transcritical CO₂ cycle. **Applied Thermal Engineering** 89 (2015) 656-662.

Zhang, X.P., X.W. Fan, F.K. Wang, H.G. Shen. Theoretical and experimental studies on optimum heat rejection pressure for a CO₂ heat pump system. **Applied Thermal Engineering** 30 (2010) 2537-2544.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Análise vibracional no desgaste de ferramentas durante processo de usinagem em ligas de ferro fundido

Alisson Ramon Gonçalves¹(0009-0002-8761-1738), Yukio Shigaki¹(0000-0003-0962-3573), Paulo Sérgio Martins² (0000-0002-8239-7528)

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM-CEFET/MG

² (IBMEC e Centro Universitário UNA)

Resumo

A aplicação da análise de vibrações no processo de usinagem é um dos métodos de monitoramento para certificar a influência do desgaste da ferramenta de corte e qualidade dos produtos usinados. O monitoramento da condição das ferramentas é essencial para garantir qualidade dimensional, aumentar a vida da ferramenta e evitar falhas em ambientes industriais. A metodologia consiste na coleta de sinais vibracionais por acelerômetros piezoelétricos já instalados no eixo principal da máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado), operando como parte de um sistema de manutenção preditiva. Esses sinais refletem, de forma indireta, o comportamento dinâmico do sistema durante a furação profunda de componentes metálicos. Apesar dos avanços, o uso de sinais vibracionais coletados indiretamente, integrados a algoritmos de aprendizado de máquina, sob condições reais e com ferramentas revestidas ainda é pouco explorado e pode apresentar limitações sob condições industriais reais. As vibrações captadas são processadas para extração de características como valor RMS, amplitude de pico e frequência dominante. Com esses dados, serão desenvolvidos modelos preditivos utilizando RNA (Redes Neurais Artificiais) capazes de estimar o nível de desgaste da ferramenta em tempo real. O estudo contribui para o avanço do monitoramento de condição (*Condition-Based Monitoring*), alinhado à Indústria 4.0, e espera-se que os resultados promovam maior automação, produtividade e confiabilidade nos sistemas de fabricação.

Palavras-chave: Análise preditiva, FFT (Transformada Rápida de Fourier), Furação, Machine Learning, Vibração mecânica.

Introdução

Em 2024, a produção industrial brasileira registrou crescimento de 3,1 %, um dos maiores índices dos últimos 15 anos, refletindo a recuperação e o fortalecimento do parque produtivo nacional (IBGE, 2025). Nesse cenário de expansão, destaca-se o setor metalmeccânico como um dos pilares da manufatura brasileira, contribuindo significativamente para o PIB industrial e impulsionando demandas por inovação. Contudo, apesar do avanço tecnológico disponível, ainda há um descompasso entre potencial e aplicação prática: segundo a CNI (2022), apenas 24 % das indústrias utilizam sensores para monitoramento de processos, e menos de 10 % empregam sistemas de inteligência artificial. Tal cenário evidencia uma lacuna crítica na adoção de soluções inteligentes, especialmente em estratégias de manutenção preditiva, elemento central nas diretrizes da Indústria 4.0. Além disso, estudos recentes apontam que a integração entre sensores

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

industriais e algoritmos de IA (Inteligência Artificial) ainda enfrentam barreiras técnicas e operacionais em ambientes fabris (Bombríński et al., 2025; Kotha Amarnath et al., 2023).

O monitoramento da condição de ferramentas de corte em processos de usinagem representa uma estratégia essencial para evitar falhas prematuras, reduzir paradas não programadas e garantir qualidade dimensional nas peças fabricadas. A proposta de um estudo experimental que relaciona os sinais vibracionais gerados durante a usinagem com o desgaste progressivo da ferramenta de corte, aplicando técnicas de aprendizado de máquina com auxílio de RNA (Redes Neurais Artificiais) é um campo a ser explorado. Pesquisas como as de Si et al. (2024) e Jones et al. (2025) já demonstram a viabilidade de empregar modelos híbridos baseados em aprendizado profundo para esse tipo de análise, embora ainda existam desafios quanto à robustez sob condições industriais reais.

Apesar de avanços relevantes na área de monitoramento de condição, ainda existe uma lacuna importante na literatura científica quanto à aplicação de sinais vibracionais captados indiretamente, via sensores instalados para outros fins, integrados com algoritmos robustos de *Machine Learning*, especialmente em ambientes industriais reais, em um processo de usinagem e com ferramentas revestidas. Essa abordagem é pouco explorada e pode enfrentar limitações preditivas em contextos práticos (Kodrič et al., 2025; Shi et al., 2024). Assim, a busca em preencher essa lacuna, oferecendo um modelo preditivo aplicável diretamente na prática fabril é importante para a evolução do tema.

O estudo parte de três eixos teóricos interligados: (1) a vibração mecânica, tratada sob a ótica dos modelos massa-mola-amortecedor e da análise das frequências, conforme os fundamentos propostos por Rao (2017) e Inman (2014), que abordam a importância do comportamento dinâmico dos sistemas para diagnóstico de instabilidades; (2) o desgaste de ferramentas de corte, tema central na engenharia de manufatura, com base em autores como Shaw (2005), Groover (2010) e Kalpakjian e Schmid (2014), os quais descrevem os mecanismos de desgaste, como abrasão, adesão e difusão, além de suas consequências sobre a qualidade do produto e vida útil da ferramenta; e (3) o uso de técnicas de inteligência computacional, especialmente o aprendizado de máquina supervisionado por meio de RNA, com suporte teórico em autores como Haykin (2001) e Goodfellow, Bengio e Courville (2016), que apresentam a capacidade das RNAs em capturar padrões complexos em dados multivariados, tornando-as especialmente úteis para tarefas de predição e classificação em ambientes industriais.

O monitoramento vibracional é feito de forma indireta, utilizando a infraestrutura existente da máquina-ferramenta CNC, que já conta com acelerômetros piezoelétricos instalados no *spindle* (eletromandril), integrados a um sistema de manutenção preditiva denominado R-CBM (*Real-time Condition Based Monitoring*). Essa abordagem permite uma coleta contínua e não invasiva de dados vibracionais, representando o comportamento dinâmico do processo de usinagem sem necessidade de alterações físicas na linha de produção. A análise dos sinais vibracionais segue os princípios estabelecidos pelas normas ISO 10816-3, que trata da avaliação de vibrações em máquinas rotativas, e ISO 17243-1, voltada para o monitoramento do desgaste de ferramentas de corte com base em medições de vibração. Trabalhos como os de Daga e Garibaldi (2024) demonstram que a análise de vibração pode oferecer diagnósticos precisos quando aliada a boas práticas de extração de características e interpretação estatística dos sinais.

O sinal de vibração coletado será analisado em domínio do tempo e da frequência. Serão extraídas características como valor RMS, amplitude de pico e frequência dominante, indicadores

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

clássicos de intensidade e comportamento oscilatório. A partir desses atributos, aliados à potência, corrente, temperatura e torque, modelos de aprendizado supervisionado serão treinados e validados para prever o nível de desgaste da ferramenta em tempo real, conforme a proposta de diversos estudos recentes (Li et al., 2021; Xu et al., 2019; Zhang et al., 2022).

Com base nos resultados encontrados, espera-se que os modelos desenvolvidos possam auxiliar na tomada de decisão automatizada sobre o momento ideal para a substituição da ferramenta, promovendo maior confiabilidade ao processo e economia operacional. Além disso, o estudo contribui para o avanço técnico-científico nas áreas de engenharia mecânica, inteligência artificial aplicada à manufatura e análise de sinais industriais, consolidando os vínculos entre teoria e prática.

Metodologia

O projeto de pesquisa adota uma abordagem experimental e quantitativa, voltada à análise da correlação entre vibrações geradas durante o processo de usinagem e o desgaste progressivo das ferramentas de corte. O estudo será conduzido em ambiente industrial real, considerando condições operacionais típicas, com o objetivo de construir modelos preditivos de desgaste baseados na análise de sinais vibracionais tratados por técnicas estatísticas e algoritmos de *Machine Learning*.

Inicialmente, será realizado o planejamento experimental, com a definição das ferramentas, materiais e parâmetros de corte utilizados na usinagem. Também será feita a configuração do sistema de aquisição de dados, incluindo calibração e verificação dos sensores já instalados no equipamento. A operação escolhida para o estudo é a furação profunda de virabrequins metálicos em uma máquina-ferramenta CNC do modelo Flex-Duo, da marca Etex-tar, instalada em uma linha de produção industrial. A máquina é composta por dois *spindles* independentes, fixação hidráulica e com capacidade de usinar duas peças simultaneamente. O ciclo de usinagem estudado é composto por três etapas sequenciais: fresamento do plano de referência, furação inicial com broca curta ("*Short Drill*") e furação final com broca longa ("*Long Drill*"). As ferramentas utilizadas são fabricadas em metal duro e revestidas com TiCN, com o objetivo de garantir maior resistência ao desgaste. O comprimento total da broca é de 134mm, sendo 84 mm usinados, com diâmetro de 5 mm e tolerância de $\pm 0,2$ mm.

Durante os testes, serão utilizadas ferramentas em diferentes estágios de desgaste – novas, reafiadas e desgastadas – para permitir a observação da influência da degradação da aresta de corte sobre as vibrações do sistema. As ferramentas são montadas em mandris hidráulicos HSK63 da marca Mapal. A refrigeração é feita por meio de sistema de lubrificação mínima (MQL), fabricado pela Lubrix, modelo V7, com mistura realizada no compartimento de tanque e pressurização para os dois canais internos das ferramentas.

Um dos principais diferenciais desta pesquisa é a utilização da estrutura já existente de sensores para a coleta dos sinais de vibração, realizando-se, assim, um monitoramento indireto da condição de corte. A máquina estudada está equipada com acelerômetros piezoelétricos IMI modelo 607A61, instalados diretamente nos *spindles* da marca Franz Kessler. Esses sensores fazem parte do sistema de manutenção preditiva da planta industrial, operando segundo os princípios do R-CBM. A instalação dos sensores segue as recomendações normativas ISO 10816-3 e ISO 17243, que definem critérios de posicionamento e níveis aceitáveis de vibração. Os sinais captados pelos acelerômetros são transmitidos via cabos Ethernet ao módulo IFM modelo VSE

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

100, responsável pela decodificação e gerenciamento dos dados. As informações são disponibilizadas em tempo real pelo software Octavis, também da IFM, que permite a visualização gráfica dos sinais, o ajuste de parâmetros de alarme e o armazenamento das séries temporais para posterior análise.

Durante os ensaios, além das vibrações, também serão monitorados parâmetros como força e temperatura de corte e características geométricas do produto, como forma e rugosidade, visando à construção de um conjunto de dados robusto para os modelos preditivos. Após a coleta, os sinais serão submetidos a pré-processamento, com filtragem de ruídos e normalização. Em seguida, serão extraídas características como valor eficaz (RMS), amplitude de pico, frequência dominante, curtose e fator de crista, que representam o comportamento dinâmico da interação ferramenta-peça.

Essas variáveis servirão como entrada para os modelos de *Machine Learning*, que serão desenvolvidos com ênfase em RNA do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP). A base de dados será dividida em conjuntos de treinamento, validação e teste, adotando-se técnicas de validação cruzada para avaliar o desempenho dos modelos e garantir sua generalização. Serão ajustados hiperparâmetros como número de camadas ocultas, neurônios por camada, taxa de aprendizagem e função de ativação, visando maximizar a acurácia e minimizar os erros de predição.

Ao final da pesquisa, os modelos desenvolvidos serão comparados entre si quanto à sua capacidade de prever o desgaste da ferramenta com base nos sinais vibracionais. Os resultados serão interpretados à luz da literatura científica, permitindo a formulação de recomendações práticas para aplicação industrial. Espera-se que os modelos gerados sejam capazes de antecipar falhas ou necessidade de troca das ferramentas, contribuindo para a implementação de estratégias de manutenção inteligente, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0. Essa abordagem favorece a tomada de decisão automatizada e a otimização dos processos produtivos, com ganhos em confiabilidade, disponibilidade e produtividade nos sistemas de fabricação.

Resultados e Discussão

Atualmente, a pesquisa encontra-se na fase de coleta experimental de dados, etapa essencial para garantir a consistência e a reprodutibilidade dos resultados. O procedimento metodológico contempla desde a preparação da máquina-ferramenta até o tratamento dos dados coletados, com foco na robustez e fidelidade das medições.

Inicialmente, realiza-se a verificação das condições operacionais da máquina CNC, incluindo a conferência do batimento do *spindle*, o ajuste da pinça hidráulica, a inspeção do sistema de lubrificação mínima (MQL), e a análise preliminar de vibrações com vistas à identificação de possíveis folgas, desbalanceamentos ou ressonâncias estruturais. A integridade do conjunto de transmissão e do componente Deublin também é inspecionada para garantir estabilidade dinâmica ao processo.

Paralelamente, os jogos de ferramentas utilizados nos testes são preparados em dois grupos: ferramentas novas e ferramentas reafiadas, todas de metal duro com revestimento de TiCN. As brocas são encaminhadas ao laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para inspeção superficial e análise de integridade estrutural. Quanto ao material usinado, três amostras do lote de produção são submetidas à medição de dureza com o objetivo de garantir homogeneidade do substrato durante os ensaios.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Durante os testes, são monitoradas grandezas físicas relevantes para o processo de corte, como potência, temperatura, torque, força de corte, rotação (RPM), avanço por rotação e tempo de usinagem. No domínio da vibração, são extraídas métricas como RMS (*Root Mean Square*), amplitude de pico e frequência dominante. Esses parâmetros constituem o conjunto de entrada (*input*) para os modelos preditivos baseados em Redes Neurais Artificiais.

A coleta vibracional é realizada com o auxílio de acelerômetros piezoelétricos já integrados à máquina, respeitando configurações específicas de ganho, níveis de saturação e aplicação de filtros digitais (passa-alta, passa-baixa ou banda específica), conforme o tipo de sinal analisado. Os dados obtidos passam por pré-processamento e são organizados em um banco estruturado, o qual será utilizado para treinar, validar e comparar diferentes algoritmos de aprendizado supervisionado com base em métricas como acurácia, RMSE e F1-score.

Conclusão

Os avanços esperados com este estudo incluem o desenvolvimento de modelos preditivos robustos capazes de estimar o nível de desgaste de ferramentas de corte em tempo real, utilizando sinais vibracionais coletados de forma indireta. A aplicação dessa abordagem em ambiente industrial representa um passo importante para a consolidação de estratégias de manutenção preditiva e para a integração de conceitos da Indústria 4.0 aos processos de fabricação. Espera-se que os resultados permitam reduzir paradas não programadas, otimizar o tempo de uso das ferramentas e, consequentemente, diminuir custos operacionais e desperdícios. Além disso, o uso de algoritmos de aprendizado de máquina em dados reais contribuirá para o avanço científico na área de monitoramento de condição de ferramentas, fornecendo uma base para pesquisas futuras que explorem novas variáveis de processo, diferentes tipos de ferramentas e aplicações em outros materiais. Dessa forma, este trabalho busca não apenas preencher uma lacuna existente na literatura, mas também oferecer subsídios práticos para a indústria, promovendo maior confiabilidade, produtividade e sustentabilidade em sistemas de manufatura automatizados.

Referências:

BOMBIŃSKI, M. et al. Intelligent condition monitoring system for predictive maintenance of cutting tools using vibration signals and ML techniques. *Procedia CIRP*, v. 127, p. 509–514, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.086>.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. *Pesquisa Inovação 2022*. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 20 set. 2025.

DAGA, M. R.; GARIBALDI, L. A. Vibration signal analysis using feature extraction techniques and machine learning algorithms for fault detection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 35, n. 3, p. 1234–1248, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02016-w>.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.

GROOVER, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

HAYKIN, S. *Neural Networks: a comprehensive foundation*. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Industrial 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 set. 2025.

INMAN, D. J. *Engineering Vibration*. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10816-3: Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ. Geneva, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17243-1: Machine tool spindles – Evaluation of machine tool spindle vibrations by measurements on spindle housing – Part 1: Contact and non-contact cutting processes. Geneva, 2014.

JONES, A. et al. Real-time wear monitoring using deep learning and sensor fusion in CNC machining. *Procedia CIRP*, v. 128, p. 290–295, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.10.033>.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. 7. ed. Boston: Pearson, 2014.

KODRIČ, T. et al. Machine learning-based predictive maintenance using vibration data in industrial machining: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 206, p. 110732, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.110732>.

KOTHA AMARNATH, M. et al. Predictive maintenance for smart manufacturing systems using hybrid intelligent models. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 69, p. 123–139, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.01.002>.

LI, Y. et al. Tool wear monitoring based on deep learning and multisensor data fusion. *Sensors*, v. 21, n. 4, p. 1341, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21041341>.

RAO, S. S. *Mechanical Vibrations*. 6. ed. Boston: Pearson, 2017.

SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2005.

SHI, C. et al. A comprehensive review of vibration signal analysis for tool condition monitoring using machine learning. *Measurement*, v. 230, p. 112481, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112481>.

SI, Z. et al. Deep learning approach for tool wear monitoring in smart manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 35, n. 1, p. 211–225, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-01944-9>.

XU, Y. et al. A novel tool wear prediction method based on adaptive deep belief network and sensor fusion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 66, n. 12, p. 9744–9753, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2898263>.

ZHANG, Y. et al. Tool wear prediction using convolutional neural networks with sensor signal time–frequency representations. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 75, p. 221–230, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.038>.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Bombas de calor assistidas por energia solar operando com CO₂: Revisão sistemática e perspectivas tecnológicas

Gustavo Alexandre Fiuza¹, Everthon Oliveira^{2,3} (0000-0001-6016-9025), Tiago de Freitas Paulino^{1,3} (0000-0002-2446-0373)

1 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

2 Departamento de Engenharia Elétrica, CEFET-MG

3 Centro de Pesquisa em Energia Inteligente (CPEI)

Resumo: A necessidade de buscar novas soluções para o uso de energia térmica sustentável tem impulsionado o interesse em bombas de calor assistidas por energia solar (SAHPs), particularmente aquelas que empregam um fluido de trabalho com o menor impacto ambiental, como o dióxido de carbono (CO₂). Uma análise bibliométrica foi conduzida para mapear tendências de publicação, regiões de pesquisa ativas e coocorrências de palavras-chave. O estudo identifica três configurações primárias de SAHP usando CO₂: expansão direta, expansão indireta e sistemas de múltiplas fontes. Os coeficientes de desempenho (COP) variam de 1,7 a 4,8, dependendo do projeto e das condições climáticas. A literatura existente indica que as primeiras publicações sobre este assunto surgiram em 2012, com 2021 marcando o ano com o maior número de publicações sobre o tema. Esta pesquisa facilita a identificação de potenciais perspectivas de pesquisa neste tipo de equipamento, como confiabilidade de sistemas a longo prazo, análise de custo do ciclo de vida, avaliação de diferentes configurações de sistemas, uso do modelo de caixa preta, uso de SAHP de CO₂ de alta capacidade e avaliação de estratégias avançadas de controle. Além disso, a assistência é estendida a engenheiros e fabricantes que buscam utilizar SAHP de CO₂.

Palavras-chave: análise de desempenho; bomba de calor assistida por energia solar; CO₂; configuração do sistema; revisão sistemática.

Introdução:

Diante da crescente demanda global por energia e da necessidade de soluções térmicas sustentáveis, as bombas de calor se destacam como uma tecnologia chave na transição energética. A seleção de fluidos refrigerantes com baixo impacto ambiental é crucial, e nesse contexto, o dióxido de carbono (CO₂) surge como uma alternativa promissora por não agredir a camada de ozônio e ter baixo potencial de aquecimento global. Uma característica particular do CO₂ é sua baixa temperatura crítica, que frequentemente força o sistema a operar na região

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

transcrítica, exigindo análises específicas, especialmente quando combinado com sistemas de Bombas de Calor Assistidas por Energia Solar (SAHPs). As bombas de calor têm a capacidade de atender à demanda de energia térmica de forma sustentável [1, 2].

Embora vários estudos recentes tenham sido publicados sobre SAHPs de CO_2 , falta na literatura científica uma revisão que consolide e organize esse conhecimento. Portanto, o artigo apresentado visa preencher essa lacuna ao realizar uma revisão sistemática com os objetivos de quantificar o cenário bibliométrico da área, identificar os tipos de configurações de sistemas existentes e comparar seus indicadores de desempenho, como o COP e a capacidade de aquecimento, a fim de entender o estado da arte da pesquisa e apontar caminhos futuros.

O estudo visa apresentar uma revisão sistemática da literatura existente sobre SAHPs de CO_2 . Os objetivos principais deste estudo são os seguintes: (i) quantificar o cenário bibliométrico para SAHPs de CO_2 ; (ii) identificar os tipos usados em SAHPs de CO_2 ; (iii) comparar indicadores de desempenho sob diferentes tipos de condições climáticas; e (iv) destacar desafios e sugerir oportunidades de pesquisa.

Metodologia:

Esta revisão sistemática da literatura foi conduzida utilizando a metodologia PRISMA (Itens Preferenciais para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises) para garantir uma abordagem sistemática. O processo envolveu as seguintes etapas: identificação (número de registros encontrados por meio de buscas em bases de dados e outros métodos), triagem (número de registros triados e excluídos com base no título e resumo), elegibilidade (número de artigos completos avaliados para elegibilidade) e inclusão (número de estudos incluídos na revisão final). Não foram feitas alterações substanciais no protocolo PRISMA vigente para alinhá-lo aos requisitos específicos desta revisão, além da incorporação de uma etapa de análise bibliométrica. As seguintes bases de dados acadêmicas foram utilizadas para identificar a literatura pertinente.

As estratégias de busca empregadas incluíram palavras-chave específicas e necessárias utilizadas em buscas em bases de dados para maximizar a recuperação de artigos relevantes (por exemplo, "bomba de calor assistida por energia solar", "refrigerante de CO_2 ", "ciclo transcrito", "SAHP CO_2 ", "bomba de calor de CO_2 ", "bomba de calor solar de CO_2 ", "bomba de calor R744", " CO_2 transcrito assistido por energia solar"). Operadores booleanos (AND, OR, NOT) foram empregados para refinar as consultas de busca, em conjunto com outros filtros de busca, como tipo de documento (artigos revisados por pares).

As seguintes ferramentas de software foram utilizadas para fins de análise, visualização e organização de dados durante todo o processo de revisão: VOSviewer e Bibliometrix serão utilizados para conduzir uma análise bibliométrica, que incluirá a geração de redes de coautoria, mapas de ocorrência de palavras-chave e análise de tendências de publicação.

Resultados e Discussão:

Uma análise temporal da produção científica sobre sistemas de bomba de calor solar assistida (SAHP) utilizando CO_2 revela que 8 trabalhos foram publicados desde 2023, conforme apresentado na Figura 1. Essa tendência pode ser desencadeada por inovações tecnológicas, bem como pela crescente compreensão e preocupação global com as mudanças climáticas. O mapeamento dos países mais recomendados para pesquisa, com base nas afiliações institucionais dos autores, ajuda a identificar os principais pólos de pesquisa do mundo.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Os dados mostram que a produção científica está concentrada em regiões específicas, especialmente em países com forte tradição em energia e tecnologias de baixo carbono. Além disso, a análise das redes de coautoria destaca parcerias internacionais bem estruturadas, sinalizando um esforço conjunto para desenvolver e disseminar essa tecnologia. O fato de instituições de diferentes continentes estarem conectadas sugere que o avanço de SAHPs alimentadas por CO₂ faz parte de uma agenda global, fortemente ligada à sustentabilidade energética e ao enfrentamento das mudanças climáticas. A Figura 1, apresenta referências abrangentes para os trabalhos.

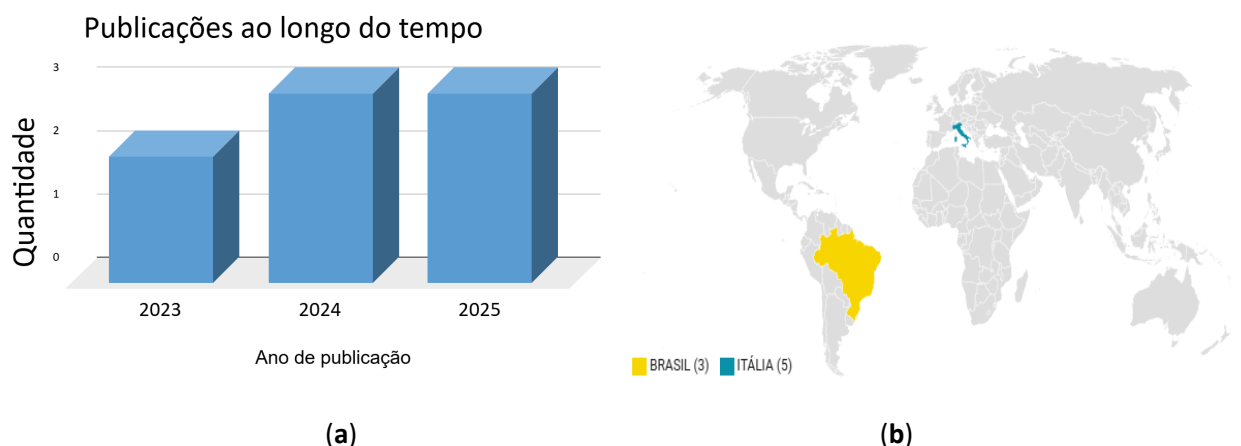


Figura 1. Visão geral bibliométrica para SAHPs com CO₂: (a) Publicações ao longo do tempo, (b) Mapeamento dos países.

Este mapeamento conceitual mostra quais áreas receberam mais atenção e como os diferentes tópicos se conectam, ajudando a visualizar a estrutura atual da pesquisa sobre SAHPs com CO₂. Esses termos refletem o interesse da comunidade científica em compreender e melhorar a eficiência energética, os aspectos operacionais e a viabilidade prática de sistemas SAHP usando CO₂.

2.2. Configurações utilizadas em SAHPs de CO₂

O Coeficiente de Desempenho (COP) reportado para essa tecnologia varia de 1,73 a 4,4, dependendo das condições de operação.

Sistemas de Múltiplas Fontes: Avaliação de sistemas que combinam o coletor solar com outras fontes de calor, como o ar ambiente ou o solo (Estudos de Zanetti et al., Conte et al.).

Modelagem e Validação: Criação e validação de modelos numéricos a partir de dados experimentais para prever o comportamento do sistema (Estudo de Azzolin et al.).

Otimização de Operação: Determinação de parâmetros ideais para maximizar a eficiência, como a pressão de operação, a carga de refrigerante e o desempenho de válvulas (Estudos de Reis et al., Humia et al., Rabelo et al.).

Com base nas lacunas e desafios identificados nesta revisão, as seguintes áreas são recomendadas para pesquisas futuras:

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

- Desenvolvimento de compressores projetados especificamente para bombas de calor de CO₂ assistidas por energia solar, com foco na melhoria da eficiência, especialmente para sistemas de baixa capacidade.
- Realizar pesquisas em sistemas IX-SAHP e DX-SAHP de alta capacidade.
- Investigar configurações inovadoras de sistemas, como a integração com sistemas de armazenamento de energia térmica e o uso de múltiplas fontes de calor (solar, aérea e geotérmica), para aumentar o desempenho do sistema.
- Estudos de desempenho de longo prazo devem ser conduzidos e a confiabilidade dos sistemas avaliada em condições operacionais reais.
- Análises detalhadas do ciclo de vida e avaliações econômicas devem ser conduzidas para determinar a sustentabilidade geral da tecnologia e sua viabilidade de mercado.
- Estratégias avançadas de controle serão desenvolvidas para otimizar a operação do sistema em resposta a variações nas condições climáticas e na demanda de carga, particularmente em relação ao controle ideal de alta pressão e superaquecimento em um sistema DX-SAHP com configuração de expansão dupla.
- Desenvolver modelos de caixa-preta usando inteligência artificial para simular e prever o CO₂ SAHP como alternativa de modelo.

Conclusão

Observou-se uma escassez de pesquisas nessa área quando o fluido refrigerante em consideração é o dióxido de carbono.

Os seguintes pontos-chave foram identificados: (a) a configuração mais comum é o sistema de expansão direta de CO₂ assistido por energia solar, seguido pelo sistema de expansão indireta de CO₂ assistido por energia solar; (b) os sistemas apresentados têm baixa capacidade de aquecimento, com um máximo de 15 kW; (c) o COP apresentado nos trabalhos varia entre 1,7 e 4,8, dependendo das condições de operação; (d) o desempenho do sistema é melhorado pelo uso de outros trocadores de calor na configuração de uma bomba de calor de fonte múltipla.

Espera-se que esta revisão auxilie no desenvolvimento contínuo desta área, com vistas a tornar esta tecnologia disponível à sociedade.

Agradecimentos:

Aos professores, agradeço pela dedicação, paciência e pelos ensinamentos que contribuíram imensamente para meu crescimento acadêmico e profissional. Ao meu orientador Tiago de Freitas Paulino, e ao meu coorientador, Everthon de Souza Oliveira sou igualmente grato pelo apoio e pelas valiosas contribuições ao longo desta jornada e todo corpo docente e administrativo do PPGEM.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Referências:

- GAUR, A. S.; FITIWI, D. Z.; CURTIS, J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. **Energy Research & Social Science**, v. 71, p. 101764, 2021. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101764. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>.
- KITSOPOULOU, A. et al. Dynamic energy analysis of different heat pump heating systems exploiting renewable energy sources. **Sustainability**, v. 15, n. 14, p. 11054, 2023. DOI: 10.3390/su151411054. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151411054>.
- XIE, Z. et al. Numerical analysis and optimization of solar-assisted heat pump drying system with waste heat recovery based on TRNSYS. **Processes**, v. 9, n. 7, p. 1118, 2021. DOI: 10.3390/pr9071118. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr9071118>.
- ZANETTI, E.; LAZZARIN, R.M.; NORO, M.; DEL COL, D. Performance and control of a CO2 dual source solar assisted heat pump with a photovoltaic-thermal evaporator. **Applied Thermal Engineering**, 2023, 218, 119286. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119286>
- CONTE, R.; LAZZARIN, R. M.; NORO, M. The advantage of running a direct expansion CO2 heat pump with solar-and-air simultaneous heat sources: experimental and numerical investigation. **Applied Energy**, v. 369, p. 123478, 2024. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123478. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123478>.
- RABELO, S. N. et al. Mass flow characteristics of CO2 operating in a transcritical cycle flowing through a needle expansion valve in a direct-expansion solar assisted heat pump. **Journal of Building Engineering**, v. 67, p. 105963, 2023. DOI: 10.1016/j.job.2023.105963. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105963>.
- AZZOLIN, M. et al. Control of CO2 evaporation in an integrated photovoltaic module: experiments and modelling. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2685, p. 012048, 2024. DOI: 10.1088/1742-6596/2685/1/012048. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2685/1/012048>.
- REIS, H. O. et al. Optimal high-pressure correlation for transcritical CO2 cycle in direct expansion solar assisted heat pumps. **Journal of Building Engineering**, v. 97, p. 110616, 2024. DOI: 10.1016/j.job.2024.110616. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110616>.
- CONTE, R.; LAZZARIN, R. M.; NORO, M. Investigation on a direct expansion multisource carbon dioxide heat pump to maximize the use of renewable energy sources. **Applied Thermal Engineering**, v. 255, p. 124599, 2025. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126533. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126533>.
- HUMIA, G. M. et al. Solar irradiation and refrigerant charge effects on performance of direct expansion solar assisted heat pumps using CO2 transcritical cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 253, p. 124388, 2025. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125725. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125725>.
- CONTE, R. et al. Comparative analysis of CO2 and propane heat pumps for water heating: seasonal performance of air and hybrid solar-air systems. **Applied Thermal Engineering**, p. 127131, 2025. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127131. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127131>.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Caracterização tribológica e microestrutural para otimização da manutenção nos revestimentos dos chutes de minério

Nayara Aparecida Lopes Viana¹ (0009-0009-8898-8757), Sandro Cardoso Santos¹ (0000-0002-4628-4788)

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM - CEFET/MG

Resumo:

Paradas não programadas em mineradoras podem levar a perdas de milhões de reais em produção. Os equipamentos devem permitir um bom escoamento de material, sem quebras ou entupimentos, que levariam a paradas de manutenção. O escoamento de material provoca abrasão na superfície interna dos chutes de transferência, e para preservá-los, é usado um revestimento de sacrifício em seu interior. Esse revestimento deve apresentar alta durabilidade e facilitar o escoamento do minério. A deterioração desse revestimento depende das condições operacionais, das propriedades e composição do material escoado. Serão estudadas as propriedades tribológicas de dois tipos de revestimentos de chutes. Um é hidrofóbico, e evita o consequente entupimento dos chutes. As propriedades mecânicas deste revestimento serão comparadas com as propriedades do revestimento padrão de ferro fundido. Serão testados o desgaste sob abrasão de diferentes composições de minério. Serão comparados testes in loco e testes de laboratório, para verificar a aplicabilidade dos ensaios para avaliação do desempenho dos revestimentos. Ao final do trabalho, espera-se alcançar uma condição de operação e manutenção que corresponda ao aumento da vida útil dos revestimentos. Dessa forma será criado um plano de manutenção que permita aumentar a disponibilidade do chute, reduza o número de paradas e intervenções e aumente a produtividade da usina.

Palavras-chave: Caracterização, transferência de minério, desgaste, estratégia de manutenção, revestimentos.

Introdução:

A manutenção de equipamentos pode influenciar a competitividade de uma empresa, afetando o negócio de forma negativa ou positiva. Ao longo do tempo, houve um desenvolvimento no campo da fabricação e manutenção, seja pela aplicação de tecnologias, conceitos ou filosofias. A manutenção passou de um nível corretivo para um nível estratégico (PINJALA, 2006).

Máquinas e equipamentos com paradas prolongadas ou ocorridas em momentos não programados podem significar perdas de produção (TAVARES, 1996). Para evitar isso, é necessário ter uma estratégia de manutenção robusta e bem planejada. Evitar a falha prematura de correias transportadoras e chutes de transferência devido ao desgaste é de grande importância para o sucesso de uma mineradora. Um tempo de inatividade da ordem de algumas horas pode resultar em milhões de toneladas de perdas anuais de exportação (ILIC, 2019).

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Durante o manuseio de material a granel em transportadores de correia e chutes, alguns problemas podem ser causados pelo projeto ou mesmo pela operação ineficiente deles. Leyva (2023) estudou a influência do projeto do chute em seu funcionamento. Ele cita alguns problemas como o entupimento de chutes e degradação das paredes do chute que podem levar a paradas com redução da produção, redução da vida útil dos equipamentos, aumento de custos com limpezas e manutenções, além da maior exposição dos trabalhadores ao risco.

Além do impacto significativo na lucratividade da operação, que pode chegar a milhões de toneladas de produto exportadas perdidas, a manutenção corretiva de chutes também representa um nível elevado de risco para os trabalhadores, pois as modificações geralmente ocorrem em espaços confinados (ILIC, 2019).

A especificação do material para o revestimento do chute demanda estudos sobre desgaste, durabilidade, confiabilidade e custo (LEYVA, 2003). O desgaste é definido como a perda progressiva de material de uma superfície, causado pelo contato em movimento com outro sólido, gás ou líquido. É indesejável na maior parte das situações, causando deterioração do material e até perda de seu valor. Em sistemas tribológicos reais, há a sobreposição de mais de um tipo de desgaste. (MANG, 2011)

O desgaste pode resultar de impacto ou abrasão ou de uma combinação de ambos. Ele depende das características do sólido a granel, das características da superfície e as condições ambientais e de carga (ROBERTS; WICHE, 1993). A depender da região do chute e do material transportado, as propriedades mecânicas exigidas são diferentes. Regiões de material de maior granulometria apresentam um maior impacto, e por isso exigem materiais de elevada tenacidade. Regiões onde o material transportado apresenta menor granulometria estão mais sujeitas ao desgaste abrasivo, e por isso deve ser usado um revestimento com alta resistência a abrasão. É comum utilizar materiais polifásicos para os revestimentos, sendo constituídos, normalmente, de uma fase dura com características próximas às dos materiais cerâmicos, envolvida por uma matriz dúctil. A matriz dúctil absorverá os impactos e a matriz dura suportará o desgaste abrasivo (SILVA, 2016).

A escolha adequada do material do revestimento exige um estudo minucioso das interações presentes, das propriedades dos materiais e características do processo. Entre as opções utilizadas atualmente na mineração, destacam-se ligas de aço, materiais cerâmicos, cermets (compósitos de cerâmicos e metais) ou mesmo materiais poliméricos como o UHMW (*Ultra High Molecular Weight*), polímero com baixíssimo coeficiente de atrito (SILVA, 2016).

Silva (2023) realizou testes em materiais compósitos, como por exemplo placas de PolyCer, no qual espera-se a combinação de propriedades de cerâmicos e de polímeros. A cerâmica oferece a resistência ao desgaste abrasivo e a borracha absorve possíveis impactos. Esse material apresenta hidrofobicidade, e poderia ser usado para reduzir a ocorrência de agarramento de material nos chutes. A placa de UHMW, constituída de polímero de alta massa molar, também apresentou elevada hidrofobicidade, repelindo o material úmido.

Por meio da análise de imagens de microscopia, Silva (2017) observou o agarramento de partículas de minério na superfície do revestimento de poliuretano. Essa incorporação de partículas pode levar ao aumento da resistência do polímero, mas também pode levar a um aumento de massa da amostra, o que prejudicaria a incerteza da medida de desgaste em alguns ensaios, onde a taxa de desgaste é calculada pela variação de massa do revestimento.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Nesse trabalho, será comparada a resistência ao desgaste de dois revestimentos, sujeitos a abrasão por dois tipos diferentes de minério. Será avaliada a influência da composição do minério no desgaste. Dessa maneira, podemos buscar um blend de minério que desgaste menos os revestimentos. A performance do revestimento hidrofóbico de polímero UHMW será comparada ao revestimento padrão de ferro fundido, avaliando se o primeiro apresenta alguma vantagem além de evitar entupimentos em regiões críticas.

Uma vez que a performance do revestimento depende também da condição operacional, serão feitos testes in loco, para comparar com os testes em escala laboratorial, e avaliar se os resultados obtidos são fidedignos a condição real de operação.

Metodologia:

Serão coletadas duas amostras de minério, com diferentes composições e teor de umidade, conforme ilustrado na Tabela 1. Essas amostras serão analisadas quimicamente, através de EDS e difração de raio X, para determinação da composição, teor de umidade e fases presentes.

Tabela 1: Composição dos minérios utilizados.

Minério	%Fe	%Si	%Al
1	X	X	X
2	X	X	X

Os dois revestimentos serão caracterizados através de microscopia de varredura. Serão realizados ensaios de desgaste Calowear em placas de revestimento de ferro fundido e do polímero UHMW, utilizando os dois tipos de minério coletado.

Serão aplicadas três placas de revestimento de ferro fundido e de UHMW em dois chutes na usina, ambos na mesma posição no fluxo de beneficiamento, uma com fluxo do minério 1 e uma com fluxo do minério 2. Os resultados obtidos em campo serão comparados com o resultado do ensaio Calowear, para verificar a aplicabilidade desse ensaio, quando comparado com a real condição operacional. Baseado nos testes de desgaste in loco, será estimada uma vida média para cada revestimento.

Resultados e Discussão:

Espera-se que o revestimento de UHMW tenha menor resistência e uma menor durabilidade do que o ferro fundido, quando submetido ao desgaste. O polímero seria trocado mais vezes, aumentando o custo com a compra do revestimento.

Uma vez que o UHMW é hidrofóbico e evita entupimentos, seu maior custo de troca seria compensado pelo menor número de paradas por entupimento. Os custos de operação com cada revestimento serão comparados, levando em consideração a compra dos revestimentos, tempos de troca e tempo estimado de parada por entupimento. Assim será definida a melhor estratégia de uso.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Por meio da análise de desempenho e custos, será avaliado se o revestimento de polímero deve ser usado apenas em locais fortemente sujeitos a entupimentos, em períodos de maior umidade, ou se podem ser aplicados em condições menos severas de operação.

Também será avaliado se o teste Calowear é uma maneira adequada de estimar a condição de abrasão in loco, ou se os resultados não apresentam confiabilidade adequada. Os resultados dos testes em campo permitirão avaliar a durabilidade, propensão a entupimentos e aplicabilidade, levando em consideração as características do processo, como as paradas para trocas de revestimento, manutenções e limpeza do chute.

Referências:

ILIC, D.. Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes. Wear: in **international journal on the science and technology of friction lubrication and wear**, v. 434–435, n. 202986, p. 202986, 2019.

LEYVA, C. A. L.; DESSAUNE, M. B. Redução do desgaste e problemas correlatos em pontos de transferência de minérios, através de projeto auxiliado de CAD/CAE – estudo de casos, p. 4292–4302. In: **62º Congresso anual da ABM**, Vitória, 2007.

MANG, Theo; BOBZIN, Kirsten; BARTELS, Thorsten. **Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication**. John Wiley & Sons, 2011.

PINJALA, S. K.; PINTELON, L.; VERECKA, A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. **International Journal of Production Economics**, v.104, n.3, p.214-229, 2006

ROBERTS, A. W., WICHE, S. J. (1993). Prediction of lining wear life of bins and chutes in bulk solids handling operations. **Tribology International**, 26(5), 345–351. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(93\)90071-8](https://doi.org/10.1016/0301-679X(93)90071-8)

SILVA, R. J; Caracterização de sistema tribológico e seleção de ligas para revestimento de chutes de transferência de minérios. Orientador: Dr Ernane Rodrigues da Silva. **Dissertação de Mestrado**. CEFET. Belo Horizonte. 2016.

SILVA, V. A. Desgaste de poliuretano por erosão úmida: desenvolvimento de um ensaio tecnológico. 2017. 71 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)** – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

TAVARES, L. **Excelência na Manutenção: Estratégias, Otimização e Gerenciamento**. Salvador: Casa da Qualidade, 1996

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Desenvolvimento de um conduto de gases de exaustão para testes em dispositivos de tratamento de gases poluentes advindos de motores do ciclo Otto

Raphael Nogueira de Oliveira¹ (0009-0006-4115-5940), Thiago Augusto Araújo Moreira¹ (0009-0004-0553-5116)

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – CEFET-MG

Resumo

A poluição causada pela queima de combustíveis fósseis é uma realidade do cotidiano universal e dela vem a necessidade de sua redução e mitigação de seus impactos. O tratamento de gases de escapamento automotivos é hoje uma exigência ambiental e por meio dele espera-se atingir os índices máximos de emissão de poluentes estabelecidos pelos órgãos regulamentadores. Atualmente, a Fase L8 do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores, o PROCONVE, determina que os fabricantes ou importadores deverão comprovar o atendimento aos limites máximos de emissão de poluentes em veículos por até 160.000 km ou dez anos de uso. Dessa forma propõe-se a realização de uma metodologia para o desenvolvimento de um distribuidor para testes, formado por cinco condutos em uma geometria paralela que permitirá a condução dos gases de escape de um motor com funcionamento segundo o ciclo Otto, instalado em uma bancada de testes, de maneira que o fluxo de seus gases se distribua de forma equalizada entre cinco ramos interligados a um conjunto de cinco diferentes dispositivos para tratamento de gases de escape. A premissa é que este distribuidor consiga conduzir os gases de escape de forma a realizar simultaneamente o ciclo de testes nos diferentes dispositivos mantendo as mesmas condições de vazão e temperatura em cada um dos cinco ramos, simulando um veículo rodando em condições normais em seu dia a dia.

Palavras-chave: Combustão, Emissões, Poluentes, tratamento de gases, veículos.

Introdução

Os dispositivos para tratamento de gases poluentes resultantes da combustão de combustíveis fósseis, que daqui para frente serão tratados apenas como dispositivos, desempenham um papel central em processos tanto químicos, industriais quanto automotivos. Eles são responsáveis por possibilitar e ou acelerar reações químicas e aumentar a eficiência dos produtos finais de um determinado processo. Uma das formas de se tratar esses gases é por meio de reações químicas que forneçam oxigênio de forma a reagir com os compostos poluentes tornando-os inofensivos ao meio ambiente, (TURNS, 2013).

No entanto, ao longo do tempo de operação, os materiais que compõem esses dispositivos enfrentam um fenômeno inevitável que é o empobrecimento no fornecimento de oxigênio que compromete seu desempenho e vida útil. Entre os principais fatores que contribuem para esse processo estão a contaminação por impurezas, a sinterização de partículas ativas e as alterações

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

estruturais causadas por condições extremas de temperatura. Dessa forma, compreender os mecanismos de envelhecimento são desafios essenciais para a manutenção da eficiência e durabilidade desse componente, (MARTINS, 2006).

O aquecimento de dispositivos durante longos períodos é um processo utilizado para simular o desgaste que eles sofrem durante o uso em veículos. Esse método permite antecipar o comportamento do componente em condições reais, otimizando seu desempenho e durabilidade. O ensaio permite verificar a durabilidade dos dispositivos antipoluição que equipam os veículos com motores de combustão interna, representando um ensaio de uso referente a 160 000 km de vida útil. Esses ensaios podem ser efetuados em pista, estrada ou banco dinamométrico de chassi usando um veículo completo. Através da reprodução de ciclos de condução e exposição a temperaturas elevadas e contaminantes como enxofre e óleo, os testes avaliam a degradação térmica e química, a eficiência na conversão de poluentes como o monóxido de carbono (CO), compostos nitrogenados (Nox) e hidrocarbonetos (HC) em compostos como o dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio (N₂) e água (H₂O). A interação com diferentes combustíveis, como gasolina e etanol também podem ser avaliadas e representam a determinação dos fatores de deterioração das emissões de gases de escapamento durante o acúmulo de rodagem de 160 000 km ou equivalente. Após os testes, são realizadas análises que investigam e quantificam sua capacidade de armazenamento de oxigênio (OSC) e alterações na composição química. Esses dados são essenciais para o desenvolvimento de dispositivos mais resistentes à sinterização e contaminação, contribuindo diretamente para a redução de emissões e para a melhoria da qualidade do ar, (ABNT NBR 16897).

Tendo em vista os grandes custos envolvidos nos testes em apenas um dispositivo, pretende-se desenvolver um distribuidor formado por cinco condutos capazes de distribuir os gases de exaustão de um motor de combustão interna de forma a realizar testes em cinco dispositivos interligados paralelamente simultaneamente. Essa metodologia busca gerar uma redução de tempo, recursos e dos insumos necessários para a fase de desenvolvimento do dispositivo e verificação de sua eficácia em converter os gases poluentes gerados na combustão em gases de baixo ou nenhum poder poluente ao longo do tempo. Tal resultado possibilitará a realização dos testes de forma mais rápida e assertiva contribuindo diretamente aos compromissos de eficiência ambiental da cadeia automotiva.

Metodologia

Número de dispositivos possíveis de teste simultaneamente.

O ponto de partida é a definição da quantidade de dispositivos possíveis de serem testados simultaneamente levando-se em conta a vazão mássica de gases fornecida pelo motor de teste, para isso faz-se os cálculos da vazão mássica de fluidos no escapamento desse motor, pelo método indireto por meio das seguintes equações:

**A listagem contendo todas as variáveis utilizadas nesse trabalho e suas respectivas nomenclaturas se encontram após as referências bibliográficas.*

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\eta_v \cdot \rho_{ar} \cdot V_d \cdot N}{n_r} \quad (1)$$

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{R \cdot T_{entrada}} \quad (2)$$

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

De posse do volume deslocado do motor a ser utilizado igual a $5654 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$, considerando uma eficiência volumétrica média igual a 85%, rotação máxima de teste 3000 RPM, pressão atmosférica no local de teste igual a 90,2 [kPa], temperatura média 25°C, $\eta_r = 2$, $R = 0,287 \text{ [kJPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}]$. Tem-se que:

$$\rho = \frac{P}{RT} \Rightarrow \frac{90,2}{0,287 \times 298} = 1,05 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\eta_v \cdot \rho_{ar} \cdot V_d \cdot N}{n_r} \Rightarrow \frac{0,85 \times 1,0541 \times 5654 \times 10^{-6} \times 3000}{2} \Rightarrow \dot{m}_{ar} = 7,6 \text{ [kg/mim]}$$

Considerando a razão estequiométrica da gasolina (E 27) de 13,2 kg_{ar} para 1 kg_{comb} . Tem-se que:

$$\frac{7,6 \text{ kg}_{ar} \text{ necessário}}{13,2 \text{ kg}_{ar} \text{ estequimétrico}} = 0,57 \frac{\text{kg}_{combustível}}{\text{mim}} \times \rho_{gas (E27)} 0,75 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 0,42 \text{ [l}_{gas}/\text{mim}]$$

Assim a vazão mássica total de fluido (ar + combustível) que passará pela saída do coletor de escapamento do motor será igual a:

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{gas} 0,57 \text{ kg} + \dot{m}_{ar} 7,6 \text{ kg} = 8,17 \text{ [kg/mim]}$$

Com um motor de volume deslocado igual a 999 cm^3 trabalhando nas mesmas condições que o primeiro motor tem-se que:

$$\rho = \frac{P}{RT} \Rightarrow \frac{90,2}{0,287 \times 298} = 1,05 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\eta_v \cdot \rho_{ar} \cdot V_d \cdot N}{n_r} \Rightarrow \frac{0,85 \times 1,0541 \times 999 \times 10^{-6} \times 3000}{2} \Rightarrow \dot{m}_{ar} = 1,34 \text{ [kg/mim]}$$

Considerando a razão estequiométrica da gasolina (E 27) de 13,2 kg_{ar} para 1 kg_{comb} . Tem-se que:

$$\frac{1,34 \text{ kg}_{ar} \text{ necessário}}{13,2 \text{ kg}_{ar} \text{ estequimétrico}} = 0,101 \frac{\text{kg}_{combustível}}{\text{mim}} \times \rho_{gas (E27)} 0,75 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 0,076 \text{ [l}_{gas}/\text{mim}]$$

Dessa forma é possível testar um número total de dispositivos igual a:

$$\frac{8,17}{1,44} = 5,67 \text{ [kg/mim]} \text{ ou } 5 \text{ dispositivos}$$

Dá surge a possibilidade de se trabalhar testando cinco dispositivos ao mesmo tempo.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

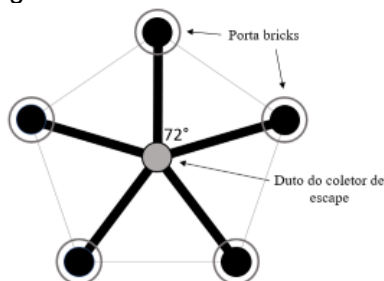
Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Formato do distribuidor de gases

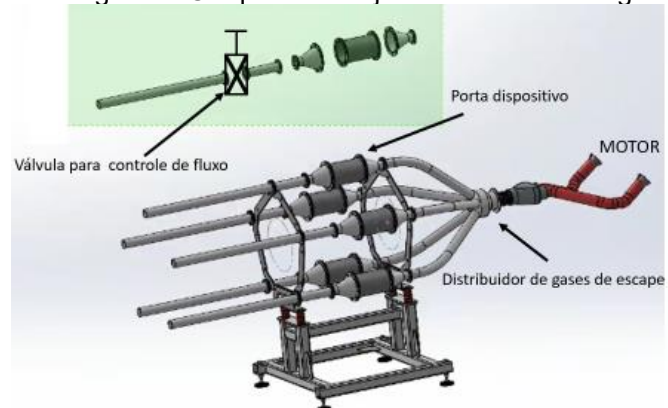
Como o objetivo principal é fazer testes em cinco diferentes dispositivos simultaneamente, garantindo que os gases advindos do motor sejam distribuídos igualmente nos ramos do distribuidor, a geometria teoricamente mais adequada seria a de uma seção pentagonal como demonstrado pela figura 1. Esse arranjo permitiria que os porta dispositivos fiquem espaçados de uma forma equilibrada a $360^\circ/5 = 72^\circ$ entre si, propiciando que as distancias entre o coletor de escape e cada um dos porta dispositivos sejam iguais, item fundamental para garantir a igualdade nos fluxos dos gases de escape. Mesmo garantindo uma geometria perfeita, fatores como forças gravitacionais, transferência de calor, rugosidade dos dutos, perda de carga, podem alterar o comportamento dos gases de escape em diferentes ramos do distribuidor, dessa forma será instalada uma válvula borboleta ao final de cada um dos ramos como forma de controlar e equalizar os gases do escapamento. O arranjo do distribuidor de gases com seus porta dispositivos e o posicionamento das válvulas borboletas são demonstrados pela figura 2.

Figura 1: Seção transversal do arranjo dos porta dispositivos em forma pentagonal.



Fonte: Autor, (2025).

Figura 2: Croqui do arranjo de distribuidor de gases.



Fonte: Autor, (2025).

Controle do fluxo de gases

A medição do fluxo dos fluidos de exaustão é um parâmetro de extrema importância e por meio dele será possível garantir um fluxo em igualdade para todos os ramos. De forma a equalizar o fluxo do escapamento igualmente entre os ramos, prevê-se a instalação de uma válvula do tipo borboleta a jusante dos porta dispositivos em cada um dos cinco ramos, que se comunicam por meio de um sistema de atuadores eletrônicos que trabalham abrindo ou restringindo a passagem dos gases de exaustão de acordo com as alterações no comportamento desses gases. O mecanismo de funcionamento primário dessa válvula é demonstrado na figura 3. Uma possibilidade de se fazer a leitura no fluxo de gases, seria pela medição da vazão mássica $[\dot{m}]$ do fluido na cessão dos dutos de escape a jusante dos porta dispositivos. Essa medição seria feita segundo o esquema demonstrado pela figura 4.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

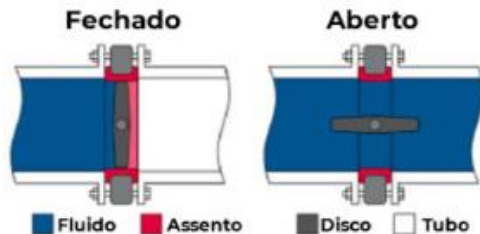
FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

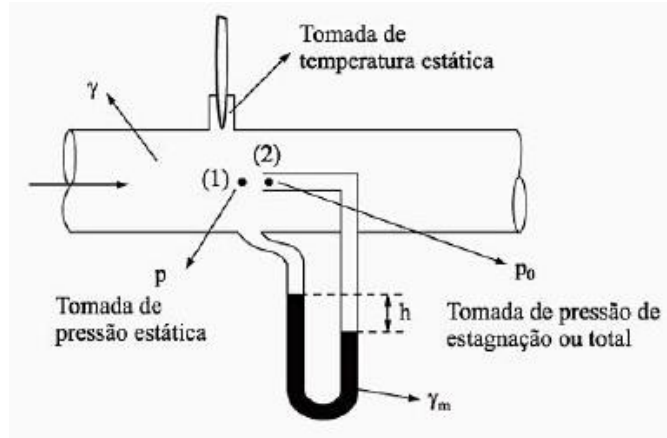
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Figura 3: Desenho esquemático de uma válvula borboleta.



Fonte: CASA DAS VÁLVULAS MG, (2025).

Figura 4: Medição da velocidade de um fluido em um duto com escoamento unidimensional



Fonte: BRUNETTI, (2008).

A seguinte equação possibilita a medição de velocidade segundo o esquema da figura 4.

$$v = \sqrt{\frac{2k}{k-1}} x RT \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (3)$$

Em posse dos valores de velocidade e temperatura do fluido e da equação dos gases ideais aplica-se as seguintes equações:

$$PV = mRT \text{ e } \rho = \frac{m}{V} \Rightarrow \rho = \frac{P}{RT} \quad (4)$$

$$\dot{m} = \rho v A \quad (5)$$

Dessa forma é possível medir a vazão mássica de fluidos em cada ramo, informação essa que será enviada aos atuadores elétricos das válvulas borboletas, de forma a garantir a mesma vazão em cada ramo do distribuidor.

O material para a construção mecânica do distribuidor mais adequado é o aço inox 310, visto que este aço é usado principalmente em temperatura elevada devido a sua resistência à oxidação. A temperatura típica de trabalho para atmosfera com teor máximo de enxofre de 2g/m³ é de 1050 °C em serviço contínuo e de 1100 °C temperatura de pico, (APERAM SOUTH AMERICA, 2012).

Os isolamentos de toda a tubulação do distribuidor serão realizados por meio de manta cerâmica resistente a altas temperaturas com coeficiente de condutividade térmica [k] igual 0,05W/m.K e espessura de 10mm afim de garantir que não haja perdas térmicas durante o percurso entre a saída do motor e os porta dispositivos que devem permanecer em temperatura constante entre 900 e 990°C.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Resultados e Discussão

Como resultado, pretende-se obter um controle preciso dos fluxos de gases de forma que os cinco dispositivos recebam os gases de escape em condições igualitárias de temperatura e vazão mássica, possibilitando assim a realização de um comparativo entre eles, comparativo esse de eficiência na redução/conversão dos gases poluentes emitidos pelo motor de combustão interna.

Referências

123ECOS. *Poluentes ácidos – O que são, fontes, impactos e como reduzir*. Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/poluentes-acidos/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16897: Veículos rodoviários automotores leves – **Determinação dos fatores de deterioração das emissões de gases de escapamento durante o acúmulo de rodagem de 160.000 km ou equivalente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ARAÚJO, A. F. F. DE L. **Estudo do comportamento de catalisadores de CeO₂ nas reações de transformação de etanol**. 2021 – 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – UERJ.

BRUNETTI, FRANCO. *Mecânica dos fluidos*. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 448 p. ISBN 9788576051824.

BRUNETTI, FRANCO. *Motores de combustão interna*. Volume 1. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 554 p. ISBN 9788521207085.

CARVALHO JÚNIOR, João Andrade de; LACAVA, Pedro Teixeira. *Emissões em processos de combustão*. São Paulo: Editora UNESP, 2003.

ÇENGEL, YUNUS A. *Introdução à termodinâmica: princípios da energia*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

CONAMA BRASIL. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Proposta de Resolução CONAMA – PROCONVE L7 e L8**. Brasília: IBAMA, 2017. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/proconve-promot/2017/consulta-publica/2017-10-proposta-conama-L7-L8-v3-m.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

COSTA, DJESON M. A. da. **Análise do desvio de comportamento entre gás real e gás ideal**. *Holos*, Natal, v. 22, n. 2, p. 4–10, 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481549269001>. Acesso em: 1 jul. 2025.

eCYCLE. **Poluentes atmosféricos**: Disponível em: [Poluentes atmosféricos: principais tipos e efeitos - eCycle jun2025](#).

FERNANDES M, D. **Estudo da influência da temperatura na desativação de catalisadores automotivos comerciais**. 2007 – 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UERJ.

FICHA COMPLETA. **Carros**. Disponível em: <https://www.fichacompleta.com.br/carros/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

FOX, ROBERT W.; MCDONALD, ALAN T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 504 p. ISBN 8521612613.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

HEYWOOD, JOHN B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

MARTINS, JORGE. **Motores de combustão interna**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2006. ISBN 972-8953-82-X.

MAYO CLINIC. **Low blood oxygen (hypoxemia): causes**. Rochester: Mayo Foundation for Medical Education and Research, 2023. Disponível em: <https://www.mayoclinic.org/symptoms/hypoxemia/basics/causes/sym-20050930>. Acesso em: 30 jun. 2025.

TURNER, STEPHEN, R. **Introdução a Combustão conceitos e aplicações**. 3. ed. São Paulo: AMGH editora Ltda, 2013.

Lista de equações:

η_v : eficiência volumétrica (1)

ρ_{ar} : densidade do ar no coletor de admissão
[kg/m³] (1) (2) (4)

N : frequência de rotação do motor [rpm]
(1)

V_d : deslocamento volumétrico do motor [cm³]
(1)

η_r : Número de revoluções de cada ciclo de trabalho por cilindro do motor [rev] (1)

R : Constante do ar [J/kg.K] (2)

P_{in} : pressão no coletor de admissão [kPa] (2)

T_{in} : Temperatura do ar no coletor de admissão [K] (2)

v = velocidade (3)

T = temperatura (3)

R = constante dos gases ideais (3) (4)

$K = \frac{C_p}{C_v}$, onde C_p e C_v são os calores específicos do fluido a pressão e volume constante (3)

P_0 = Pressão de estagnação (3)

P = pressão estática /atmosférica (3) (4)

T = Temperatura do ar (4)

\dot{m} = vazão mássica (5)

v = velocidade (5)

ρ = massa específica (5)

A = área da seção transversal (5)

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Desenvolvimento e análise de um coletor fresnel para uso em laboratórios e processos térmicos industriais

Pedro Henrique Caetano O. Teixeira¹ (0009-0004-4886-6353), José Henrique Martins Neto¹ (0000-0001-6162-5459)

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, CEFET-MG

Resumo

Desenvolvimento de um refletor linear de Fresnel (RLF) em escala reduzida, destinado a aplicações didáticas e a processos industriais de média temperatura, contribuindo para soluções energéticas sustentáveis. O coletor é composto por espelhos planos ou levemente curvados, projetados para concentrar a radiação solar em um tubo receptor, no qual circula ar como fluido de trabalho, em regime atmosférico ou pressurizado. A escolha do ar, em substituição à água, amplia a faixa de temperaturas operacionais, reduz custos e simplifica a infraestrutura necessária. A metodologia adotada contempla o dimensionamento óptico do coletor por meio de equações geométricas, análise paramétrica em Python e simulações ópticas no software Tonatiuh. Como etapa preliminar, foi calculado um modelo geométrico de referência, validado por comparação com dados de um fabricante, confirmando a fidelidade do algoritmo desenvolvido. Complementam o estudo a elaboração de modelos 3D no SolidWorks, seleção de materiais e estimativas de custo. O protótipo resultante visa não apenas a avaliação experimental de desempenho térmico, mas também a aplicação como ferramenta didática para o ensino de conceitos de transferência de calor, óptica e automação.

Palavras-chave: Ar como fluido térmico; Energia solar térmica; Óptica geométrica; Rastreamento solar; Refletor linear de Fresnel.

Introdução

A crescente preocupação com os impactos ambientais da matriz energética baseada em combustíveis fósseis tem impulsionado a busca por alternativas renováveis. No Brasil, a elevada incidência de radiação solar destaca a energia solar térmica como solução promissora para suprir cerca de 75% da demanda de calor de processo da indústria, tradicionalmente atendida por fontes fósseis caras e poluentes (CORREIA, 2017; SOUZA, 2020). Tecnologias de concentração solar, como coletores cilindro-parabólicos e refletores lineares de Fresnel (RLF), são adequadas para aplicações de média temperatura (100–400 °C), tornando-se estratégicas para a transição energética (SOLATOM, 2020).

O mapa de recurso solar do Solargis e World Bank figura 1, evidencia grande potencial no Brasil central, com irradiação direta normal (DNI) entre 5,4 e 6,2 kWh/m² por dia, reforçando a

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

viabilidade técnica de sistemas solares concentrados. Diferentemente da fotovoltaica, os sistemas térmicos concentram a radiação em receptores, elevando a temperatura de fluidos de trabalho, o que os torna indicados para processos industriais como secagem, esterilização e dessalinização (MONTES et al., 2014).

Figura 1: Mapa de recursos solares, irradiação normal direta.



Fonte: Solargis e World Bank Group

A proposta é desenvolver um protótipo de RLF para aplicações industriais e didáticas, adotando o ar — pressurizado ou não — como fluido térmico, buscando ampliar a faixa de operação, reduzir custos e simplificar a construção. Os objetivos específicos incluem: dimensionar a geometria ótica do refletor no software Tonatiuh; projetar o sistema de rastreamento; avaliar configurações de coletores secundários em Python; modelar o desempenho térmico e energético no software Python; e elaborar o detalhamento técnico para construção.

Revisão bibliográfica

Os sistemas de potência solar concentrada (CSP) apresentam simplicidade construtiva e uso de materiais acessíveis (IEA/SolarPACES, 2010). Entre eles, o refletor linear de Fresnel (RLF) destaca-se pelo baixo custo, modularidade e fácil manutenção, utilizando espelhos planos ou levemente curvados que refletem a radiação solar para um tubo receptor fixo (Häberle et al., 2006). Essa tecnologia é viável em países em desenvolvimento e adequada para aplicações de média temperatura (150–400 °C). A Figura 2 ilustra a configuração típica do RLF, composta por coletores primários, coletor secundário e sistema de ajuste angular.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

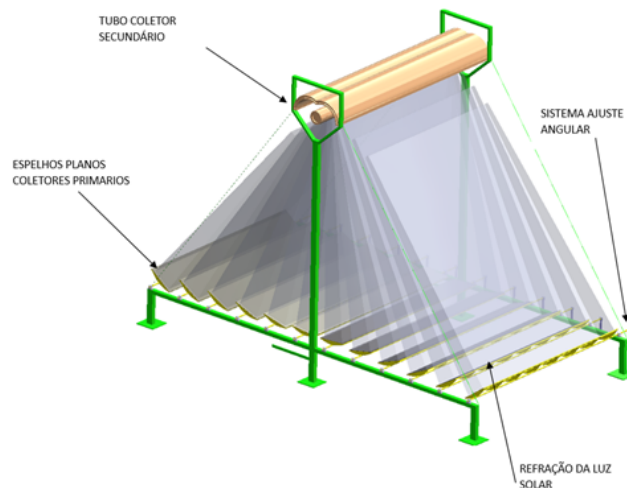
FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Figura 2: Exemplo CSP do tipo RFL



Fonte: Autor

Desde a década de 2000, pesquisas avançaram com protótipos modulares e rastreamento ativo, como o uso de concentradores secundários CPC (Compound Parabolic Concentrator), capazes de reduzir perdas óticas e melhorar a distribuição de fluxo solar (Mathur et al., 1991; Häberle et al., 2006). Feldhoff (2012) aponta, contudo, perdas por sombreamento e bloqueio, mitigáveis com ajustes geométricos e uso de CPCs. Alternativas mais recentes incluem geometrias aplanáticas, refletor triangular e sistemas multifacetados (Souza & Fraidenraich, 2020; Subramaniyan et al., 2021). Ferramentas de simulação, como Tonatiah, são essenciais para otimizar o desempenho ótico. O método Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) permite analisar fator de interceptação, distribuição de fluxo e perdas óticas antes da construção. Estudos como os de Mathur et al. (1991) e Feldhoff (2012) consolidam metodologias de dimensionamento geométrico e previsão de desempenho.

O RLF se apresenta como tecnologia robusta, simples e elegível para aplicações de média temperatura em setores industriais e educacionais. Seu diferencial está na combinação de baixo custo, modularidade e adaptabilidade, com destaque para a inovação do uso do ar como fluido térmico neste projeto, visando reduzir complexidade e ampliar a viabilidade técnico-econômica. A modelagem com Python, o traçado de raios no Tonatiah e o desenvolvimento mecânico no SolidWorks fornecerão subsídios para a futura construção do protótipo e validação experimental.

Metodologia

A metodologia foi dividida em duas etapas complementares. Na primeira, desenvolveu-se em Python um modelo geométrico preliminar do refletor linear de Fresnel, validado por comparação com dimensões de um modelo de referência (Industrial Solar). Foram consideradas variáveis como distância focal, largura dos espelhos e do campo refletor. O algoritmo inicia pela fileira central, determinando ângulo de inclinação, espaçamento e posição horizontal acumulada, repetindo o processo simetricamente até atingir a largura de 7,5 m.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

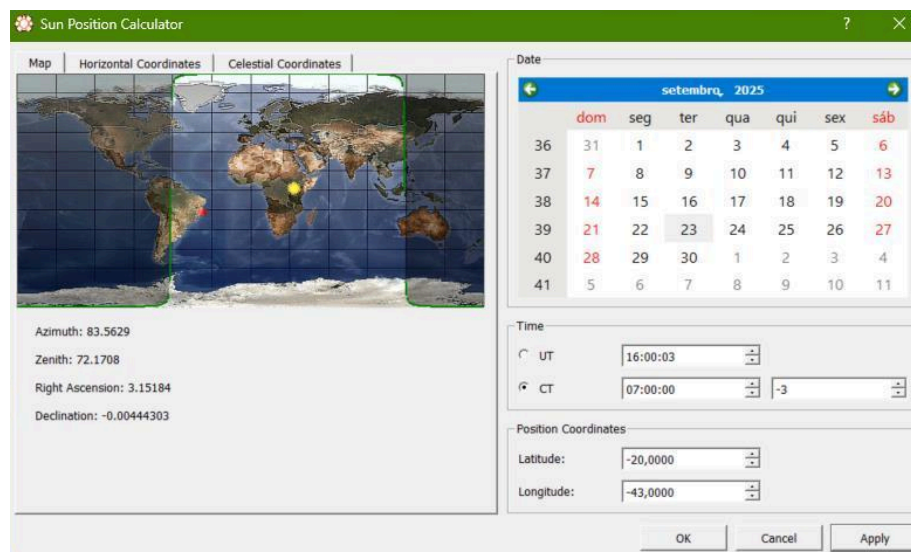
Além desse procedimento, elaborou-se uma comparação metodológica entre três configurações distintas: (i) modelo do fabricante, com espaçamento entre fileiras (S_n) de 700 mm; (ii) modelo intermediário, com $S_n = 600$ mm; e (iii) modelo geométrico otimizado, configurado para maximizar a ocupação de área. Para essa etapa, foram utilizados os mapas de fluxo incidente gerados no Tonatiuh, permitindo avaliar o campo refletor em função do sombreamento. O processo adotou como referência o último traço de luz visível sobre cada espelho para determinar a extensão da região sombreada. Foi considerada a incerteza de ± 20 mm. Foram estabelecidos indicadores de comparação, como largura sombreada (mm), percentual de área sombreada em relação ao espelho. Dessa forma, estruturou-se uma base metodológica para identificar as diferenças geométricas e óticas entre os três arranjos.

Na segunda etapa, o modelo foi expandido para uma análise paramétrica, automatizando varreduras de combinações entre 3 e 15 fileiras por lado, distâncias focais de 1 a 10 m (intervalos de 0,5 m) e larguras de espelhos de 0,1 a 1,0 m (incrementos de 0,1 m). Os resultados foram exportados para Excel, para comparar configurações e selecionar arranjos mais eficientes.

A geometria obtida foi transferida para o software Tonatiuh, onde cada espelho foi modelado como retângulo plano com material especular e o receptor como cilindro no plano focal. A estrutura hierárquica do programa organiza fileiras em módulos com rastreamento solar, forma geométrica e propriedades óticas, assegurando consistência entre cálculos analíticos e simulação.

As simulações consideraram Belo Horizonte (Brasil), mês de setembro, com a análise iniciando-se as 7 horas da manhã (horário de Brasília) até as 17 horas (Figura 3). Foram definidos latitude, longitude, declinação, ângulo horário e irradiância direta normal. O Tonatiuh então gerou raios solares incidentes e, pelo método de Monte Carlo, simulou sua reflexão nos espelhos e a incidência sobre o tubo receptor.

Figura 3: Condições de contorno e simulação do modelo geométrico comparado ao do fabricante



Fonte: Software Tonatiuh

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



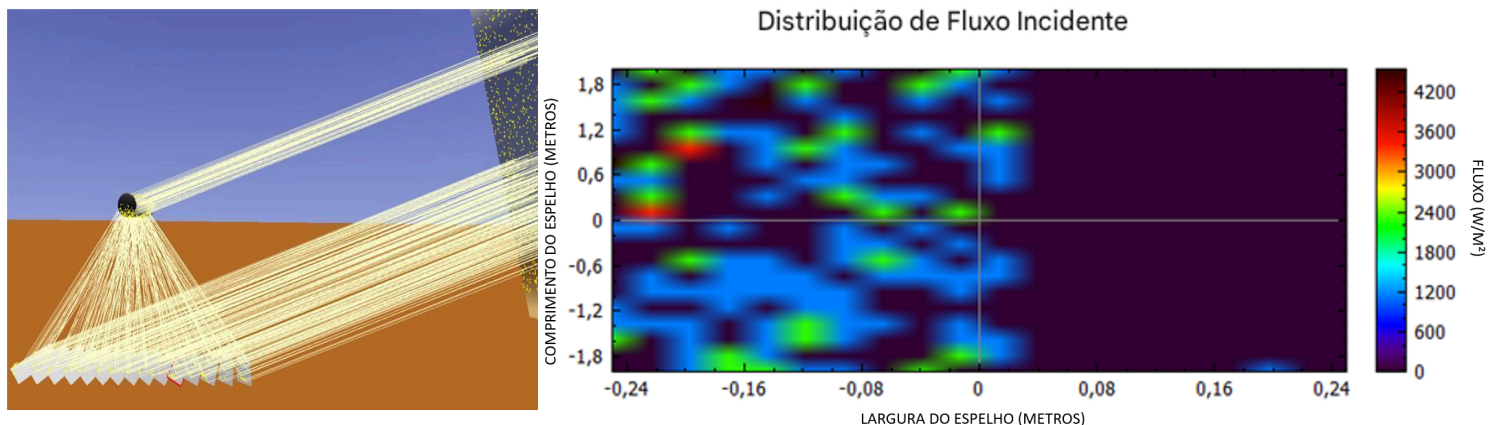
Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Resultados

O algoritmo em Python gerou planilhas com ângulos de inclinação (θ_n), coordenadas geométricas (Z_n e Q_n) e espaçamentos (S_n) para três configurações. O modelo do fabricante ($S_n = 700$ mm) apresentou distribuição simétrica padrão. O modelo intermediário ($S_n = 600$ mm) resultou em maior densidade de espelhos, refletida nos valores de Z_n e Q_n . Já o modelo geométrico, com S_n variável, teve o espaçamento ajustado para maximizar a ocupação do campo refletor. As simulações forneceram como resultados o fator de interceptação, a distribuição de fluxo ao longo da superfície receptora e a quantificação das perdas ópticas associadas ao sombreamento e ao bloqueio entre os espelhos, como é mostrado na figura 4.

Figura 4: Resultado da simulação do modelo geométrico com exemplo de gráfico de distribuição de fluxo dos espelhos para avaliação de sombreamento



Fonte: Software Tonatiuh

A comparação entre os três modelos mostrou comportamentos distintos em relação ao aproveitamento óptico. O arranjo do fabricante ($S_n = 700$ mm) apresentou menor superfície refletora ativa ao longo do período analisado, totalizando cerca de $125,4$ m². O modelo intermediário ($S_n = 600$ mm) elevou a área captada para $144,6$ m², evidenciando o efeito do adensamento de espelhos sobre a coleta de radiação.

Já o modelo geométrico otimizado alcançou a maior superfície efetivamente iluminada, com $165,2$ m² no total. Os mapas de fluxo gerados no Tonatiuh mostraram que, embora todos os arranjos tenham apresentado boa cobertura entre 10h e 14h, as diferenças mais significativas ocorreram nas faixas de 07–09h e 15–17h, quando o sombreamento entre fileiras e do tubo receptor se tornou mais expressivo devido ao baixo ângulo de inclinação do Sol.

Conclusão

De forma geral, observa-se que o modelo do fabricante, por possuir menor número de espelhos, reduz os efeitos de sombreamento, mas também limita a área total de coleta. Em contrapartida, os modelos com maior quantidade de espelhos sofrem mais com o sombreamento adjacente, porém essa desvantagem é compensada pela maior superfície refletora instalada.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Nessa comparação, o modelo intermediário ($S_n = 600 \text{ mm}$) apresentou cerca de 15% a mais de área de coleta em relação ao fabricante, enquanto o modelo geométrico alcançou aproximadamente 32% de ganho. Destaca-se, portanto, que essas observações representam tendências preliminares, e novas análises ainda serão conduzidas para consolidar a avaliação comparativa entre os arranjos

Referências

CORREIA, G. B. *Análise energética de coletores solares térmicos aplicados em processos industriais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)* – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity**. Paris: IEA/OECD, 2010. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/663fabad-397e-4518-802f-7f1c94bc2076/csp_roadmap.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

HÄBERLE, A. et al. Linear concentrating Fresnel collector for process heat applications. **Proceedings of the 2006 International Solar Energy Society Conference**, 2006.

MONTES, M. J. et al. A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power. **Energy**, v. 66, p. 332-343, 2014.

SOLATOM. **Solar Heat for Industrial Processes (SHIP): Applications and Potential**. Espanha: Solatom, 2020. Disponível em: <https://solatom.com>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SUBRAMANIYAN, Chinnasamy et al. Investigation on the optical design and performance of a single-axis-tracking solar parabolic trough collector with a secondary reflector. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9918, 2021.

SOUZA, D. M. *Estudo do potencial de utilização de energia solar térmica na indústria brasileira. Dissertação (Mestrado em Energia)* – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

FELDHOF, J. Fabian. **Linear Fresnel Collectors**. [línea], Disponible en: http://sfera.sollab.eu/downloads/Schools/Fabian_Feldhoff_Linear_Fresnel.pdf. [Accedido: 11-mar-2019], 2012.

MATHUR, S. S.; KANDPAL, T. C.; NEGI, B. S. Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators—II. Mirror elements of equal width. **Energy Conversion and Management**, v. 31, n. 3, p. 221-232, 1991.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Eficiência energética em máquinas injetoras através de anel metálico de contenção térmica a vácuo parcial

Hézio Nogueira Lopes Júnior¹ (0009-0007-7040-3680), André Guimarães
Ferreira¹ (0000-0002-0694-5369), Lucimar Venâncio Amaral²
(0000-0001-8040-7385)

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – CEFET/MG

² Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG

Resumo

Uma visão detalhada sobre os custos que envolvem uma operação é de grande importância para a manutenção de um negócio no mercado, e no processo de injeção de termoplásticos não é diferente. Trabalhos técnicos para contribuição no avanço tecnológico, com o objetivo de reduzir o consumo energético, são cada vez mais necessários, em virtude do grande impacto que a energia elétrica tem no custo de transformação dos polímeros. Da literatura, pode ser observado que, em média, a maior contribuição para esse consumo é na etapa de fusão do polímero, quando a energia elétrica é transformada em energia térmica, estimando-se que 45,3% do consumo da máquina é destinado a essa finalidade. Ao escolher um ponto estratégico de maior impacto para redução do consumo global do equipamento, o aquecimento do canhão é o maior consumidor de energia. Este trabalho tem como objeto de estudo uma máquina Chen Hsong® JM 800, cujo consumo mensal é de 27.720 kWh. A partir de dados da pesquisa, estimativas de perdas térmicas e simulações computacionais em SolidWorks e Fusion 360 serão avaliadas em três cenários: sem isolamento térmico, com manta térmica convencional e com um anel de contenção térmica a vácuo. A etapa experimental será realizada com instrumentação em campo para validar os resultados, consolidando a proposta como uma alternativa viável de forma técnica e economicamente para reduzir o consumo energético em máquinas injetoras, e como contribuição científica compreender melhor a correlação entre meios de baixa pressão e a transferência de calor, assim como a eficiência para contenção térmica. Após a aplicação da solução proposta estima-se que a dissipação térmica seja reduzida em 60%, gerando, consequentemente, redução no consumo de energia elétrica para essa aplicação.

Palavras-chave: Injeção de termoplásticos. Contenção térmica. Transferência de calor à vácuo. Simulação da transferência de calor. Experimento de dissipação térmica.

1. Introdução

A indústria de transformação de plásticos desempenha papel estratégico no cenário econômico mundial e nacional, em razão de sua presença em quase todos os setores produtivos e de consumo. De acordo com a ABIPLAST (2023), o Brasil produziu 7,04 milhões de toneladas de produtos plásticos em 2022, movimentando aproximadamente R\$123,36 bilhões e empregando cerca de 379 mil pessoas em mais de 14 mil empresas. Essa relevância evidencia não apenas o impacto social e econômico do setor, mas também a necessidade de aprimorar continuamente seus processos produtivos, visando maior eficiência, competitividade e sustentabilidade. Entre as

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

diversas tecnologias de transformação, a injeção de termoplásticos é a mais difundida, dada sua capacidade de produzir peças com precisão dimensional, ciclos curtos e diversidade de aplicações. Entretanto, esse processo apresenta elevado consumo energético, o que o torna um dos principais focos de custo na indústria. A energia elétrica é o segundo maior fator de despesa, considerando produção em larga escala, atrás apenas da matéria-prima (Turc, C. G. *et al.*, 2017). Sendo assim, aumentar a eficiência energética das máquinas injetoras torna-se essencial tanto para reduzir custos. O canhão de injeção é o subsistema que mais contribui para o consumo de energia das injetoras, representando 45,3% do total diante desse cenário (Dalla Corte Junior *et al.*, 2010).

A proposta deste trabalho é desenvolver um anel de contenção térmico utilizando, e em seu interior, vácuo como isolante térmico. A configuração visa reduzir significativamente a transferência de calor do canhão para o ambiente, explorando as propriedades de condução térmica minimizadas do ar em regime rarefeito. O dispositivo será projetado para as dimensões reais da injetora em estudo. Atualmente uma solução empregada para tratar essa perda térmica é a manta convencional, que apresenta redução da perda térmica de 30,4% (Guarato Junior, *et al.*, 2020), já solução que será proposta tem potencial de redução de 70% e com um custo menor. Já as análises térmicas e relação com os custos serão feitas embasadas nas apresentadas por (Dalla Corte Junior *et al.*, 2010).

A expectativa é de que a solução proposta apresente ganhos expressivos em retenção térmica e redução do consumo energético, superando a solução da monta convencional (Guarato Junior, *et al.*, 2020). Além do benefício econômico direto, a proposta pode contribuir para políticas de eficiência energética e sustentabilidade, reduzindo impactos ambientais e melhorando a competitividade da indústria plástica, além de propor uma solução de baixo custo comparada com a ofertada atualmente. (Guarato Junior, *et al.*, 2020).

Do ponto de vista científico, espera-se ampliar o conhecimento sobre os mecanismos de transferência de calor em máquinas injetoras e sobre o potencial de tecnologias de isolamento inovadoras. Do ponto de vista industrial, a expectativa é oferecer alternativas concretas para otimização de custos e eficiência, alinhando-se às crescentes exigências de produtividade e sustentabilidade no setor plástico, conforme análise do consumo energético realizada por (Dalla Corte Junior *et al.*, 2010).

2. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho é estruturada em etapas complementares, com o objetivo de compreender detalhadamente o comportamento energético do canhão da máquina injetora e avaliar a viabilidade da solução proposta de contenção térmica com isolamento a vácuo. O estudo se desenvolverá em quatro eixos principais: caracterização do equipamento, instrumentação e coleta de dados experimentais, desenvolvimento/implementação da solução técnica e modelagem computacional com simulações comparativas. A seguir, cada uma dessas etapas é descrita em detalhes.

2.1 Caracterização do Equipamento

O objeto de estudo deste trabalho é uma máquina injetora do modelo Chen Hsong® JM 800, amplamente utilizada em processos de transformação de termoplásticos. A escolha do equipamento foi baseada em sua representatividade no ambiente industrial da planta estudada na empresa Antares Plásticos que produz utensílios domésticos, moveis, vasos, entre vários outros

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

produtos plásticos, a empresa é localizada no município de Contagem, Minas Gerais, Brasil, assim como na disponibilidade de dados operacionais fornecidos pelos manuais técnicos e literatura. A máquina apresenta capacidade de fechamento de 800 toneladas, e opera com temperatura de trabalho média de 230 °C no canhão de injeção. Este é constituído por sete resistências elétricas distribuídas ao longo de sua extensão, responsáveis por promover a fusão e homogeneização do polímero. Dados de consumo energético coletados junto à planta indicam que o equipamento possui gasto mensal de aproximadamente 27.720 kWh, sendo 12.480 kWh atribuídos exclusivamente ao canhão, ou seja, cerca de 45% do consumo total segundo o Manual técnico Chen Hsong® JM 800 (2018).

2.2 Instrumentação e Coleta de Dados Experimentais

A etapa experimental visa identificar e quantificar as perdas térmicas do canhão para o ambiente fabril. Para isso, serão utilizados termopares tipo K, sensores amplamente empregados em medições de temperatura industrial pela sua robustez e faixa de operação. Foram definidos três pontos de monitoramento externo no canhão, correspondentes às resistências 1, 2 e 3, localizadas em diferentes zonas do aquecimento. Essa escolha busca capturar a distribuição térmica ao longo da superfície, possibilitando verificar a uniformidade do processo e identificar eventuais concentrações de perda de calor. O plano de coleta contempla medições ao longo de cinco dias consecutivos, em três momentos distintos do dia: pela manhã, ao meio-dia e ao final da tarde. Esse procedimento permitirá observar eventuais variações relacionadas às condições ambientais, como temperatura ambiente e circulação de ar no entorno da máquina. Os dados serão registrados em um sistema de aquisição digital, com taxa de amostragem suficiente para garantir confiabilidade.

2.3 Diagnóstico Energético

A condução térmica radial em uma estrutura tubular, como no caso da parede do canhão da injetora, ocorre do centro (raio interno) para a periferia (raio externo). Para um tubo de comprimento L , com raio interno r_1 e externo r_2 , a equação da taxa de transferência de calor por condução radial em regime estacionário é descrita conforme a equação 1.

$$q''_{cond} = -k_{inox} \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (1)$$

Em que: T_1 e T_2 são as temperaturas nas superfícies interna e externa, respectivamente [K]; r_1 e r_2 são os raios interno e externo [m], k é a condutividade térmica [W/m·K], L é o comprimento do tubo [m].

Com base nos dados coletados, será possível estimar a perda de energia térmica do canhão por meio dos mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. A análise seguirá o modelo clássico de Incropera e Dewitt (2007), considerando as equações de balanço de energia e as propriedades termofísicas dos materiais envolvidos conforme descrito na figura 1 e tabela 1, nas quais são descritos conforme as equações que regem os fenômenos de transferência de calor por condução térmica.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



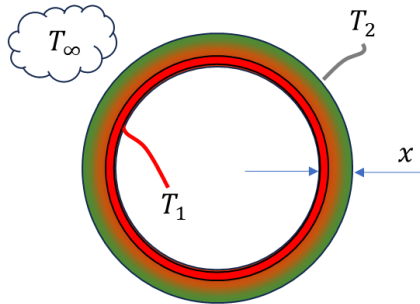
DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG



$T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C} = 298,15\text{K}$	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$
$T_1 = 230^{\circ}\text{C} = 503,15\text{K}$	$k_{inox} = 16 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$
$T_2 = 112^{\circ}\text{C} = 385,15\text{K}$	$h_{ar} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
$x = 3 \cdot 10^{-3} \text{m}$	$\varepsilon = 0,82$
$hrs \text{ mês} = 320h$	$A = 0,427\text{m}^2$

Figura 1 – Esquema de comportamento térmico esperado na transferência de calor no perfil do canhão de uma máquina injetora

Tabela 1 – Valores específicos esperados de forma experimental

2.4 Desenvolvimento da Solução Técnica

A solução proposta partirá de um anel metálico de contenção térmica, e em seu interior um ambiente de baixa pressão será gerado por uma bomba de vácuo. O dispositivo será simulado em aço SAE 1020, devido à sua boa resistência mecânica, facilidade de usinagem e/ou conformação, acessibilidade comercial e baixo custo. O anel apresenta geometria compatível com o canhão estudado, com dimensões internas de $\varnothing 260 \text{ mm}$ e externas de $\varnothing 296 \text{ mm}$, permitindo instalação prática sem necessidade de modificações estruturais conforme figura 2.

Válvula de uma via: Será utilizada para retenção do vácuo.

Manômetro: Será utilizado para monitoramento da pressão interna.

Bomba de vácuo externa: Será utilizada apenas na etapa inicial de preparação do dispositivo.

O processo de fabricação seguirá etapas de corte, usinagem e soldagem, garantindo estanqueidade e resistência mecânica para suportar as condições de operação industrial.

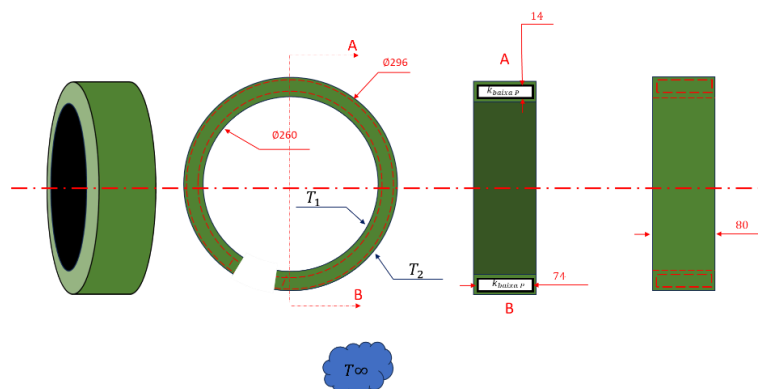


Figura 2 – Proposta inicial de anel de contenção térmica

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

2.5 Modelagem e Simulação Computacional

Antes da validação experimental, serão realizadas simulações computacionais de transferência de calor, utilizando os softwares SolidWorks e Fusion 360. Essas ferramentas permitem a análise térmica transiente em regime estacionário e não estacionário, possibilitando a comparação entre diferentes cenários de isolamento. Duas condições serão simuladas: Canhão sem isolamento (Condição de referência); Canhão com anel a vácuo (Solução proposta). Os parâmetros analisados incluem: Temperatura superficial e no centro do canhão; Gradiente térmico radial; fluxo de calor em regime permanente; Tempo de estabilização térmica. Esses resultados permitirão prever o comportamento energético do sistema e quantificar os ganhos potenciais em termos de redução de perdas térmicas e economia de energia.

2.6 Validação Experimental

A etapa experimental futura terá como objetivo validar as previsões numéricas, consolidando a viabilidade técnica da proposta. Os dados coletados pelos termopares serão comparados aos resultados das simulações, verificando a aderência entre teoria e prática. Caso os valores de redução de perdas se aproximem dos resultados computacionais, será possível confirmar a eficácia do anel de contenção térmica frente à simulação. A análise também incluirá o cálculo da economia financeira mensal, estimada pela diferença entre consumo com e sem o dispositivo.

2.7 Procedimentos de Análise

A análise dos resultados seguirá três dimensões principais: Técnica: verificação da redução efetiva das perdas térmicas; Econômica: cálculo da economia financeira decorrente da redução de consumo; Ambiental: estimativa da redução de emissões indiretas de CO₂, considerando o fator médio de emissão da matriz elétrica nacional. Esse tripé de avaliação permitirá não apenas comprovar a viabilidade da solução, mas também apresentar argumentos sólidos para sua adoção em escala industrial. A metodologia proposta combina abordagem experimental e modelagem computacional, garantindo robustez e confiabilidade aos resultados. O diagnóstico energético do canhão, aliado à simulação comparativa e à futura validação prática, permitirá confirmar a eficácia da solução. Espera-se que o anel de contenção térmica com isolamento a vácuo se mostre não apenas eficiente em termos técnicos, mas também economicamente vantajoso e ambientalmente relevante.

3. Resultados e discussões

Após todas as análises, é esperado que as simulações retornem resultados similares aos encontrados na bibliografia (Incropera; Dewitt, 2007), que são resumidos na figura 3.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

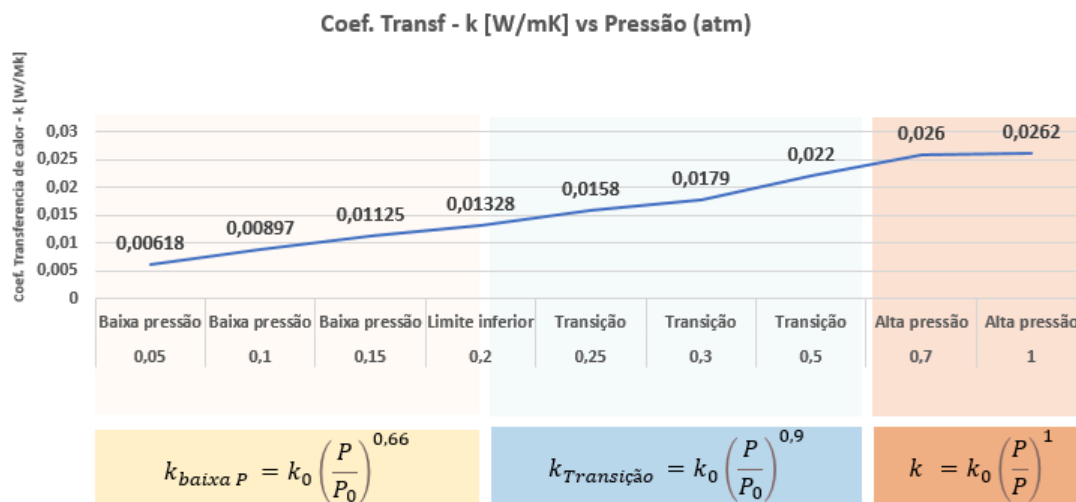


Figura 3 – Gráfico de correlação entre pressão e coeficiente de transferência de calor (Dados obtidos compilados a partir dos dados tabelados (Incropera; Dewitt, 2007)).

Chegando a resultados de eficácia conforme os descritos na figura 4, a solução proposta terá ótima viabilidade, sendo uma solução vantajosa comparada a soluções atualmente empregadas ao mercado, em que há menor capacidade de contenção térmica, e alto custo. Após a confecção e instalação do dispositivo, espera-se configuração próxima à ilustrada na figura 4 e descrita na tabela 2, que estima o comparativo de resultados que podem ser obtidos.

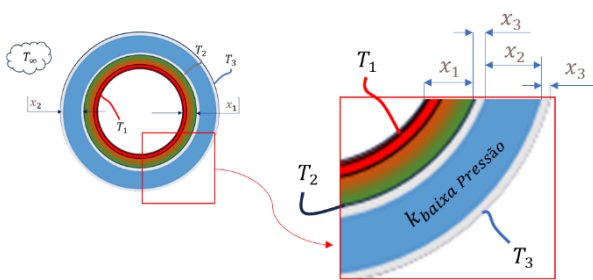


Figura 4 – Esquema da transferência de calor com o anel de contenção térmica

Item	Sem Manta Térmica	Com Manta (Aço 1020 + Ar Rarefeito)
Área analisada	0,427 m ²	0,427 m ²
Temperatura interna (T _i)	230 °C (503,15 K)	230 °C (503,15 K)
Temperatura da superfície (T _s)	112 °C (385,15 K)	—
Temperatura externa (T _e)	—	25 °C (298,15 K)
Fluxo condutivo	630 W/m ²	38,5 W
Potência dissipada total (Q)	1.106 W	38,5 W
Consumo mensal	2477,9 kWh/mês	86,2 kWh/mês
Perda mensal (R\$ 0,90/kWh)	R\$ 2.230,16	R\$ 77,58
Economia de energia	—	2391,7 kWh/mês ↓
Economia financeira	—	R\$ 2.152,58/mês ↓
Redução percentual das perdas	—	96,9% ↓
Material do invólucro	—	Aço 1020
Isolamento térmico	Inexistente	Ar rarefeito (0,0062 W/m·K) + paredes metálicas

Tabela 2 – Comparativo e ganhos esperados totais

4. Conclusão

A eficiência da transferência de calor em um meio operando a baixa pressão é uma solução que se mostra bastante promissora, e após a conclusão do estudo, serão expostos dados concretos sobre o emprego dessa tecnologia para a economia energética na indústria de termoplásticos.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

5. Referências

ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico). PERFIL 2023: **As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil**. São Paulo: Abiplast, 2023.

CHEN HSONG MACHINERY CO., LTD. Manual Técnico da Máquina Injetora JM800-SVP/2 – servo motor. Shatin, Hong Kong: Chen Hsong Machinery Co., [s.d.]. **Manual Técnico**, 2018.

DALLA CORTE JUNIOR, Valter; WANDER, Paulo Roberto; ALTAFINI, Carlos Roberto. Redução do consumo de energia no cilindro de plastificação numa máquina injetora de plásticos. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, 6., 2010, Campina Grande. Campina Grande: ABCM, 2010.

GUARATO JÚNIOR, Ivo Carlos; JÚNIOR, Lúcio Rogério; SILVA, Antônio Manoel Batista da; ALVES, Guilherme Henrique. **Melhoria da eficiência energética com a utilização de manta térmica: estudo de caso de uma injetora de peças plásticas**. In: DALLAMUTA, João; HOLZMANN, Henrique Ajuz; GRANZA, Marcelo Henrique (org.). Engenharia elétrica e de computação: atividades relacionadas com o setor científico e tecnológico 2. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

TURC, C. G.; CĂRĂUȘU, C.; BELGIU, G. **Cost analysis in injection moulded plastic parts designing**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 227, n. 1, 2017.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Influência da posição de montagem da vela de ignição na combustão, emissões e desgaste dos eletrodos

Matheus Phylipe de Campos Araújo¹ (0009-0006-9580-2656), Fernando
Antônio Rodrigues Filho¹ (0000-0003-1786-4158)

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Federal de Tecnologia de Minas
Gerais

Resumo

A posição de montagem da vela de ignição na câmara de combustão exerce influência direta sobre a formação do núcleo de chama, a estabilidade da combustão, as emissões e a durabilidade do eletrodo. Estudos experimentais e numéricos mostram que configurações que minimizam a área de contato do núcleo de chama com os metais do eletrodo e/ou orientações que favorecem o transporte advectivo do núcleo tendem a promover *kernels* maiores, taxas de queima mais rápidas e redução de HC, ainda que possam aumentar NOx em função de maior temperatura de chama. Essas relações dependem fortemente da geometria da câmara, do regime de operação (EGR, rotação, carga) e do campo de velocidades local.

A pesquisa propõe a realização de ensaios experimentais em dinamômetro, utilizando um motor de quatro cilindros ciclo Otto instrumentado com sensores de pressão instalados diretamente nas câmaras de combustão. O objetivo é quantificar a influência da orientação da vela de ignição — variando o posicionamento do eletrodo lateral entre as direções vertical e horizontal, ou seja, contra e a favor do fluxo de gases — sobre os parâmetros de combustão, emissões e desgaste dos eletrodos. As medições incluirão pressão interna no cilindro, consumo de combustível, torque e emissões reguladas, além da análise física do desgaste após o ensaio.

Espera-se demonstrar que a montagem vertical, alinhada ao escoamento principal da mistura ar-combustível, favorece a propagação inicial da chama, reduz emissões e diminui o desgaste eletrodo-metal, enquanto a montagem horizontal acentua perdas térmicas e instabilidades ciclo a ciclo. A comparação dos resultados com a literatura permitirá compreender de forma mais abrangente o papel da orientação de montagem no desempenho global do motor e fornecer subsídios para melhoria de projeto e padronização de montagem em aplicações automotivas.

Palavras-chave: eficiência energética; sistemas de ignição; motores flex; combustíveis alternativos.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Introdução

O desempenho de motores de combustão interna depende fortemente da eficiência do processo de ignição, responsável pela formação e propagação inicial do núcleo de chama. Diversos estudos destacam que a posição e a orientação da vela de ignição influenciam diretamente a interação entre a centelha e a mistura ar-combustível, afetando emissões e estabilidade ciclo a ciclo (CECERE et al., 2022; SONG et al., 2025; MOUSTAFA; HUSSEIN, 2025).

A posição e a orientação da vela na câmara de combustão influenciam diretamente a interação entre centelha e mistura ar-combustível. Cecere et al. (2022), por meio de técnicas ópticas em motor GDI, demonstraram que a orientação do eletrodo em relação ao escoamento de *tumble* modifica a velocidade de crescimento do núcleo de chama em condições de mistura pobre. Song et al. (2025), em simulações CFD de motores rotativos, verificaram que o ângulo de montagem da vela altera a distribuição de pressão, a formação de NOx e a ocorrência de regiões de combustão incompleta. Moustafa e Hussein (2025) confirmaram experimentalmente que a posição da vela está associada à eficiência de combustão e às emissões, reforçando a necessidade de estudos sobre o tema.

Apesar desses avanços, a literatura carece de investigações voltadas especificamente para o impacto da orientação de montagem da vela sobre o desgaste dos eletrodos e sobre a confiabilidade em partida a frio. Este trabalho busca preencher essa lacuna, apresentando resultados de ensaios controlados que comparam velas montadas em posições vertical e horizontal, correlacionando os efeitos observados com combustão, emissões e durabilidade.

Metodologia

Os ensaios serão realizados em um motor de quatro cilindros ciclo Otto, montado em bancada dinamométrica e instrumentado com sensores de pressão piezoelétricos instalados diretamente em cada câmara de combustão. O sistema de aquisição permitirá correlacionar as variações de pressão interna no cilindro com os parâmetros de combustão, tais como ângulo de início da combustão, tempo de queima (CA₁₀₋₉₀), coeficiente de variação de pressão (COV do IMEP) e eficiência térmica indicada.

A metodologia compreenderá ciclos controlados de operação em regimes variando de 800 a 5600 rpm, em carga parcial e plena (WOT), com mistura estequiométrica e levemente empobrecida, a fim de aumentar a solicitação térmica sobre o sistema de ignição. O dinamômetro possibilitará a aquisição contínua de torque, potência, consumo de combustível e emissões reguladas (HC, CO, NOx).

Serão avaliadas conforme apresentado nas Figs. 1 e 2, diferentes orientações de montagem das velas de ignição:

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Imagem 1: Vertical: eletrodo lateral posicionado de forma paralela ao escoamento predominante na câmara, ficando contra o fluxo.

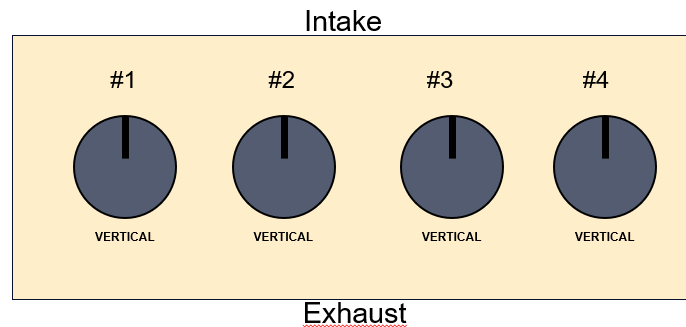
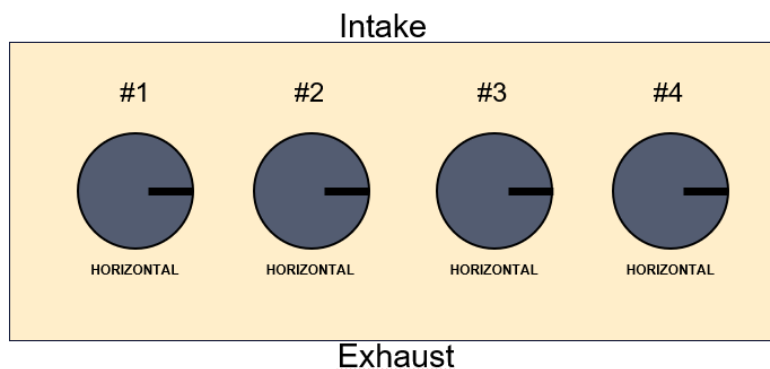


Imagem 2: Horizontal: eletrodo lateral orientado perpendicularmente ao escoamento, ficando a favor do fluxo de gases.



As velas serão instaladas seguindo procedimento padronizado de torque, garantindo repetibilidade de montagem e confiabilidade nos resultados. Após os testes, serão analisados o desgaste dos eletrodos por meio de inspeção visual, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e medições de variação do gap.

Os resultados experimentais obtidos serão comparados com a literatura existente, que utiliza tanto ensaios ópticos de alta velocidade quanto simulações CFD para avaliar os efeitos da orientação do eletrodo na formação do núcleo de chama e nas emissões (GE; ZHAO, 2019; WANG et al., 2017). Essa correlação permitirá validar as tendências observadas e identificar de forma inédita os impactos da montagem sobre a durabilidade dos eletrodos em condições reais de operação.

Resultados e Discussão

Os resultados indicam que velas montadas na posição vertical apresentaram menor desgaste de eletrodo, melhor propagação do núcleo de chama e combustão mais estável. Essa condição resultou em redução de HC e CO, associada à combustão mais completa, além de maior confiabilidade em partidas a frio (BRERETON; RAHI, 1983; SONG et al., 2025). Na posição

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

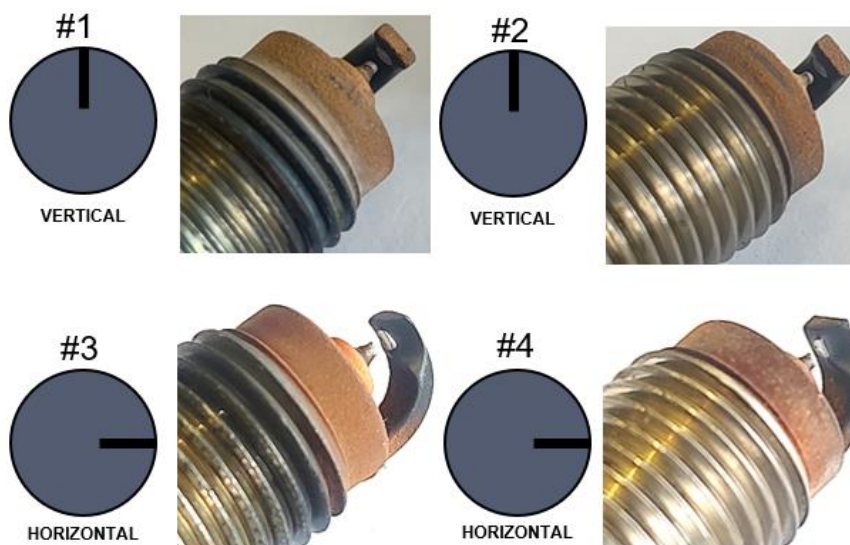
horizontal, observou-se maior variabilidade ciclo a ciclo e desgaste acelerado dos eletrodos devido ao aumento de contato térmico com o núcleo de chama (GE; ZHAO, 2019). Além disso, a orientação

inadequada pode comprometer a durabilidade do sistema de ignição em motores de produção, ocasionando aumento de custo de manutenção e emissões (MOUSTAFA; HUSSEIN, 2025).

Tabela 1 – Síntese dos principais efeitos da orientação da vela de ignição

Parâmetro	Montagem Vertical	Montagem Horizontal
Emissões (HC/CO)	Redução significativa	Aumento devido a combustão incompleta
Durabilidade dos eletrodos	Menor desgaste térmico/mecânico	Desgaste acelerado
Partida a frio	Maior confiabilidade	Maior risco de misfire

Imagem 3: Desgaste do eletrodo lateral x posição de montagem



Conclusão

A posição de montagem da vela de ignição exerce influência direta sobre a combustão, as emissões, a performance e a durabilidade. A montagem vertical favorece a interação da centelha com a mistura ar-combustível, promovendo combustão mais eficiente e menor emissão de poluentes, além de prolongar a vida útil dos eletrodos. A montagem horizontal, por sua vez, aumenta o desgaste e a instabilidade, comprometendo a confiabilidade do motor. Os resultados reforçam a necessidade de especificação adequada de orientação durante o projeto e a produção de motores, sobretudo em aplicações com combustíveis alternativos, como o etanol hidratado.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Referências

ARAÚJO, M. Metodologia para avaliação da influência da posição da vela de ignição sobre o desgaste do eletrodo. **Depósito de patente**, 2025.

BRERETON, G. J.; RAHI, M. A. A. Some Effects of Spark Plug Electrode Geometry and Orientation on Small-Engine Emissions. **SAE**, 1983.

CECERE, G. et al. Lean Burn Flame Kernel Characterization for Different Spark Plug Designs and Orientations in an Optical GDI Engine. **Energies**, v. 15, p. 3393, 2022.

GE, H.; ZHAO, P. Numerical Investigation of the Spark Plug Orientation Effects on Flame Kernel Growth. **SAE**, 2019.

GLASSMAN, I.; YETTER, R. A.; GLUMAC, N. G. **Combustion**. 5. ed. Amsterdam: Academic Press, 2014.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

MOUSTAFA, E. B.; HUSSEIN, H. Enhancing Automotive Performance: A Comparative Study of Spark Plug Electrode Configurations on Engine Behaviour and Emission Characteristics. **Vehicles**, v. 7, p. 55, 2025.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

SONG, J. et al. Exploration of the Optimal Spark Plug Position and the Effect of Ignition Timing on the Combustion and Emission Characteristics of Opposed Rotary Piston Engines. **Processes**, v. 13, p. 657, 2025.

STONE, R. **Introduction to Internal Combustion Engines**. 4. ed. London: Palgrave Macmillan, 2012.

WANG, Y.; ZHANG, J.; et al. Investigation of Impacts of Spark Plug Orientation on Early Flame Development and Combustion in a DI Optical Engine. **SAE**, 2017.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Influência do material da ferramenta de corte no acabamento superficial de engrenagens no processo de *Shaving*

Leandro da Silva Braga¹ (0009-0002-5316-2532), Yukio Shigaki¹
(0000-0003-0962-3573), Paulo Sérgio Martins² (0000-0002-8239-7528)

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

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

Resumo: Materiais para fabricação de engrenagens necessitam de uma análise detalhada das composições dos elementos químicos e formações estruturais para prover ganhos de vida útil e qualidade do produto usinado. O foco da tecnologia está no tratamento termoquímico, que deve assegurar baixos níveis de distorções na microgeometria da hélice e evolvente pela alta precisão mecânica. Pode ser observado também uma variável associada ao material, geralmente liga de aço com estrutura ferrita/perlita e memórias de tensão residual do forjamento. Este projeto experimental estuda a influência de fatores no processo de construção e acabamento de dente de engrenagem, bem como a microestrutura da liga de aço nos níveis de distorções geométricas e acabamento superficial no perfil da hélice e evolvente. Nesse contexto, o material da ferramenta, influenciado por suas propriedades mecânicas e térmicas, estabelece diferentes interações com o material da peça, alterando a estabilidade do corte e impactando diretamente o acabamento superficial obtido. O estudo foi realizado com amostras de aço 19MnCr5, submetidas à caracterização microestrutural por técnicas metalográficas. As análises de acabamento superficial foram mensuradas por contato com rugosímetro. A microgeometria do perfil do dente foi avaliada em equipamento tridimensional Wenzel, e a tensão residual, por difração de raios X. Foram utilizados parâmetros como assimetria (Rsk), curtose (Rku), distorções nos perfis hélice e evolvente, e avaliação da tensão residual antes e depois do tratamento. As observações permitem decisões importantes no processo de fabricação, visando melhorias no produto e otimização das etapas produtivas.

Palavras-chave: Engrenagens, *Shaving*, Material para ferramentas de corte, Acabamento superficial, Difração de Raio X.

Introdução

O processo de *shaving* é amplamente utilizado na usinagem de engrenagens para garantir um acabamento superficial de alta qualidade, essencial para o desempenho e durabilidade dos componentes mecânicos. Este processo é fundamental na fabricação de engrenagens que requerem precisão dimensional e suavidade de superfície para funcionar de forma eficiente em sistemas de transmissão. Podemos considerar o *shaving* como uma técnica de acabamento que melhora a qualidade superficial em comparação com outras operações de usinagem. Os materiais utilizados nas ferramentas de corte desempenham um papel significativo na qualidade do acabamento superficial. O aço nitretado é conhecido por sua resistência ao desgaste e pela maior vida útil das ferramentas. O aço sinterizado se destaca por suas propriedades avançadas de

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

dureza e resistência. Por outro lado, o aço normal, apesar de suas características básicas, apresenta limitações em comparação com os outros materiais.

Os processos de fabricação de engrenagem exigem um estudo de inúmeras variáveis para que se alcance a excelência em seus resultados produtivos. Essa busca é objetivo de todos os profissionais da indústria metal-mecânica, que uma vez alcançados, têm-se processos cada vez mais robustos, eficazes e eficientes. Dentre os vários aspectos compreendidos, a fim de propor melhorias nos processos de fabricação, destacam-se não apenas o domínio dos parâmetros de corte e suas influências nas características do produto, mas também as propriedades das ferramentas de corte utilizadas, pois, deste modo, há segurança nas tomadas de decisões em variá-los para obtenção de um melhor desempenho, a custos menores, e maximizando, inclusive, a qualidade do produto.

A qualidade do acabamento superficial das engrenagens durante o processo de *shaving* são fortemente influenciados pelos materiais das ferramentas de corte. Diferentes composições, apresentam propriedades que afetam diretamente a rugosidade, a microgeometria dos dentes e a integridade do produto. Sabe-se, ainda, que forças de usinagem interagem com o produto usinado e provocam neles características indesejáveis, dentre elas, as tensões residuais. Essa característica física pode contribuir para as distorções do produto em função das tensões geradas ao longo do processo de fabricação (REMI H, 2012).

Desde as características que asseguram boa usinabilidade até as propriedades mecânicas, que garantem resistência aos esforços, à fadiga e ao desgaste por contato, espera-se bom desempenho do material. Desse modo, o entendimento de como esses parâmetros estão definidos e de como se comportam dentro dos requisitos supracitados é imprescindível para sua aplicação nesses processos.

Objetiva-se, neste trabalho, investigar a influência dos materiais das ferramentas de corte — aço nitretado, sinterizado, sinterizado/nitretado e normal — sobre o acabamento superficial de engrenagens no processo de usinagem por *shaving*. A pesquisa abordará como essas variações impactam na rugosidade superficial, microgeometria dos dentes e nas tensões residuais geradas, proporcionando *insights* valiosos para aprimorar as práticas de usinagem, qualidade e performance do produto.

Metodologia

O fluxograma do procedimento experimental é apresentado na Figura 01, elaborado para visualizar e compreender de forma simplificada todas as etapas estabelecidas para se alcançar o objetivo do trabalho. O experimento foi estruturado em três blocos principais: análise do material da peça, aquisição e caracterização da ferramenta de corte, e usinagem das peças. Cada bloco contempla subatividades específicas que definem os procedimentos adotados em cada etapa.

- **Análise do material da peça:** Consiste na avaliação das características do material por meio de análise metalográfica completa e caracterização química, com o objetivo de compreender sua estrutura e composição.
- **Aquisição e caracterização da ferramenta de corte:** Envolve a análise das propriedades da ferramenta, incluindo caracterização química e ensaio de dureza, assegurando que o material esteja conforme as especificações técnicas exigidas para o processo.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

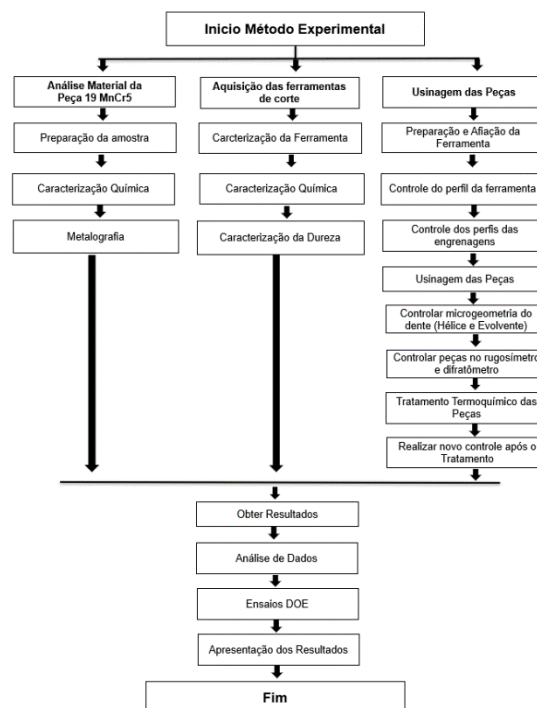
Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

- **Usinagem das peças:** Etapa mais extensa, abrange a preparação, afiação e montagem das ferramentas, além da execução do processo de usinagem. São monitoradas todas as variáveis de resposta antes e após o tratamento térmico, garantindo controle rigoroso dos dados.

Após a conclusão dessas etapas, procede-se à obtenção e análise dos resultados, com o objetivo de identificar como as propriedades e o desempenho dos diferentes materiais de ferramentas de corte influenciam o acabamento superficial das engrenagens.

Figura 01: Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Próprio autor

Preparação da Ferramenta

As ferramentas foram preparadas na retífica para afiadora Samputensili, modelo S400GS, série FU040018. O controle do perfil da ferramenta foi realizado com a utilização de uma Copiadora Hofler Klingelnberg, modelo ZP 250. Em processos nos quais não se realiza retífica de dente, o ajuste preciso da ferramenta torna-se essencial para garantir a conformidade dimensional e funcional do produto conforme as especificações de engenharia. O processo de afiação da ferramenta deve estar alinhado com as condições do tratamento térmico, especialmente considerando a deformação do dente da engrenagem após a têmpera. A afiação da ferramenta é ajustada para compensar as deformações geométricas previstas após o tratamento térmico, garantindo que o perfil final do dente esteja dentro das tolerâncias especificadas. Essa compensação é mostrada na Figura 02, comparando o perfil obtido pela afiação (linha tracejada) com a conformação final após a têmpera (linha contínua).

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

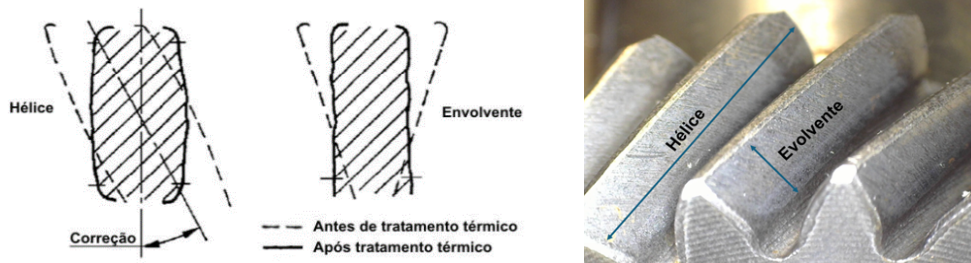
FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Figura 02: Comportamento do perfil do dente antes e após tratamento térmico

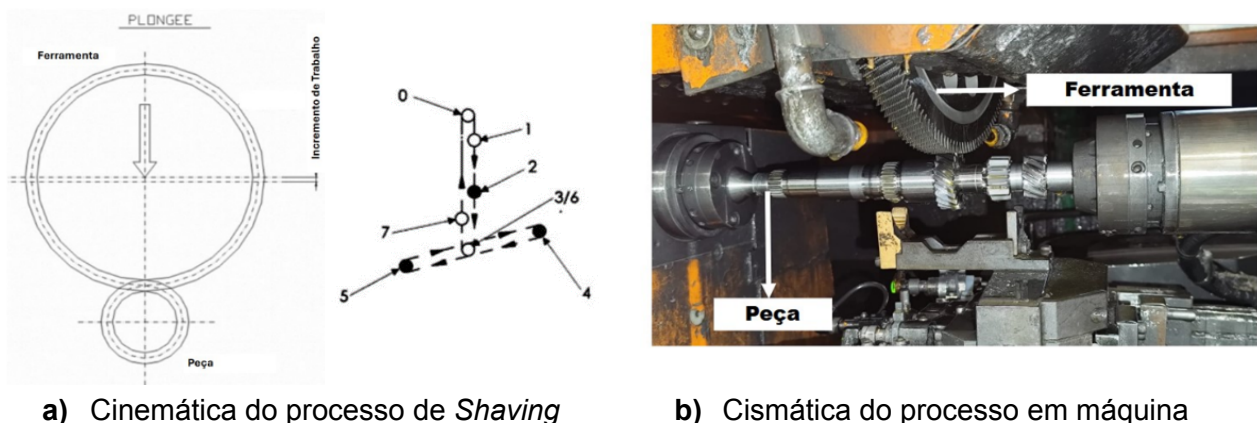


Fonte: Próprio autor

Processo de Usinagem

Os ensaios de usinagem foram realizados na Raspadora Sicmat, tipo RASO 400 6AX CNC. Todas as peças foram usinadas com os mesmos parâmetros de corte e movimento. O processo de acabamento por *shaving* adotado nesta pesquisa é caracterizado por uma sequência precisa e coordenada de movimentos entre a ferramenta de corte e o perfil dentado da engrenagem. Essa sequência foi mapeada com base em observações diretas do ciclo e programa de usinagem, permitindo uma compreensão detalhada de cada fase do processo conforme Figura 03. Na Tabela 1 são apresentadas de forma sistemática, as etapas operacionais envolvidas no ciclo de usinagem, associando cada ação ao seu respectivo objetivo técnico e à representação visual correspondente.

Figura 03: Processo de Shaving



a) Cinemática do processo de Shaving

b) Cismática do processo em máquina

Fonte: Próprio Autor

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Tabela 1: Etapas do processo de *Shaving*

Etapa	Descrição da Ação	Objetivo Técnico	Referência
1	Deslocamento inicial da ferramenta em alta velocidade a partir da posição de repouso.	Posicionar a ferramenta próxima à engrenagem.	Ponto 0 a Ponto 1
2	Início do sincronismo entre a ferramenta e o dentado da peça, com movimento vertical.	Encaixar os dentes da ferramenta nos dentes da engrenagem.	Ponto 2
3	Início da rotação da ferramenta com avanço vertical controlado.	Iniciar a remoção de material no perfil do dente.	Ponto 3
4	Atinge-se a profundidade máxima de corte ("mergulho").	Obter a dimensão final do dente.	Ponto 4
5	Inversão do sentido de rotação da ferramenta.	Melhorar o acabamento superficial e precisão do perfil nos dois flancos do dente.	Ponto 5
6	Controle dos parâmetros de rotação e avanço via programa usinagem.	Garantir repetibilidade e qualidade do processo.	Pontos 4, 5 e 6
7	Retorno da ferramenta para posição neutra e, em seguida, para a posição inicial.	Finalizar o ciclo e preparar para nova operação.	Pontos 7 e 0

Fonte: Próprio Autor

Controles de Usinagem

Para o controle da Hélice e Evolvente foi utilizada uma Copiadora Wenzel modelo WGT 350. A medição da rugosidade foi realizada pelo método de contato, utilizando o rugosímetro Mahr, MarSurf GD 25. A medição da tensão residual foi realizada utilizando a técnica de tensiometria por difração de raios X. O Difrátômetro de raios-X empregado nos experimentos é do Fabricante GNR – Analytical Instruments Group. Os sistemas de medição utilizados são representados na Figura 04.

Figura 04: Equipamentos de Medição



a) Perfil das peças



b) Rugosímetro



c) Difrátômetro

Fonte: Próprio Autor

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Elaboração dos Ensaios de Usinagem

Foram definidos quatro grupos de usinagem, correspondendo a um bloco para cada tipo de ferramenta avaliada no experimento: aço nitretado, sinterizado, sinterizado/nitretado e normal. Para cada grupo, foram usinadas 1.500 peças. A cada 34 peças usinadas, uma peça era retirada para o controle das variáveis resposta. Esse processo foi repetido até que o lote de 1.500 peças fosse concluído, totalizando 45 amostras por grupo para análise. As peças identificadas por cores correspondem às amostras destinadas à análise de tensões residuais, permitindo seu rastreamento ao longo das etapas do experimento. Além disso, para cada grupo de usinagem, uma folha de registro foi posicionada ao lado da máquina, junto ao diário de bordo, com o objetivo de anotar toda e qualquer intervenção ocorrida durante o processo, conforme mostrado na Figura 05.

Buscando minimizar variáveis de ruído no experimento, todas as peças foram usinadas pelo mesmo operador. As amostras separadas foram numeradas a laser e identificadas com as letras: N (normal), S (sinterizada), SN (sinterizada/nitretada) e NP (nitretada a plasma). Essa padronização foi adotada devido à complexidade do processo de fabricação ao qual as peças foram submetidas. Trata-se de um processo com lead time de aproximadamente 12 horas; portanto, qualquer falha na rastreabilidade poderia comprometer o andamento do experimento. Após essa etapa, todas as peças foram submetidas ao controle das variáveis resposta, encerrando o procedimento experimental estabelecido antes da realização do tratamento térmico.

As amostras foram tratadas dentro de um mesmo intervalo de tempo, e os parâmetros do processo no forno foram rigorosamente controlados e mantidos constantes. Ao final do tratamento térmico, as peças passaram por um processo de limpeza superficial em equipamento de jateamento com granelha esférica de aço, finalizando a etapa térmica e preparando as amostras para o controle das variáveis resposta após o tratamento.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de Engenharia Mecânica CEFET-MG

FCM FUNDAÇÃO CEFETMINAS

CEFET-MG

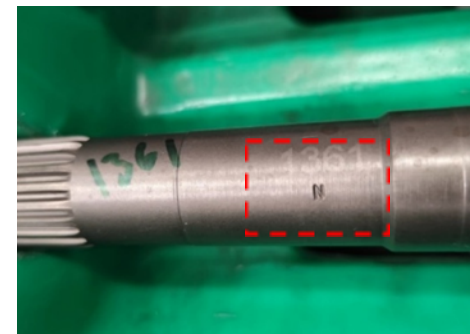
Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Figura 05: Ensaios de Usinagem

Parâmetros de controle														
Tratamento	Material da ferramenta		Condição da ferramenta				Tratamento térmico do produto usinado							
2			Sinterizado S				Antes							
			Saída (produto usinado)											
Nº da peça avaliada	Acabamento Superficial				Microgeometria				Tensão Residual na Superfície					
	Ra	Rsk	Rku	Rz	Rk	Rpk	Rvk	ffa	fha	ffb	fhβ	Evolvente (MPa)	Hélice (MPa)	
1												-284 ± 4	-329 ± 4	
35	0,2475	-1,662	11,454	2,2247	0,6384	0,2971	0,7957	3,1	-6,1	1,5	21,6			
69												-322 ± 4	-382 ± 4	
103	0,2840	-1,568	8,989	1,9411	0,6788	0,1835	0,9038	3,8	-7,2	1,3	24,1			
137	0,2527	-0,518	5,624	1,9381	0,7240	0,3127	0,5632	3,2	-8,1	1,8	23,2			
171	0,2688	-0,190	6,068	2,3023	0,7145	0,3421	0,5010	3,0	-8,7	1,2	23,4			
205	0,2685	0,048	3,674	1,8932	0,7662	0,2507	0,5645	3,3	-7,3	2,1	22,4			
239	0,2732	-1,022	8,005	2,6081	0,8288	0,3514	0,7160	2,8	-7,0	1,5	22,3			
273	0,3034	-0,430	5,969	2,6645	0,8187	0,3733	0,9346	3,6	-7,5	1,8	22,1			
307	0,2907	-0,397	5,067	2,1185	0,8194	0,3087	0,6844	4,5	-9,3	1,3	24,4			
341	0,3116	-0,190	4,274	2,3247	0,8712	0,2792	0,6669	2,9	-8,9	1,3	23,9			
375	0,2768	0,042	4,438	2,1715	0,7487	0,3682	0,6491	3,4	-6,5	1,6	22,4			
409	0,2646	-0,967	7,539	2,4938	0,8096	0,1847	0,7664	2,5	-8,4	2,0	22,7			
443	0,2710	0,333	4,125	2,1272	0,7978	0,3760	0,5637	3,3	-6,5	1,7	22,8			
477	0,2907	-0,691	6,022	2,2063	0,7673	0,2933	0,8084	2,6	-8,8	1,7	23,9			
511	0,2407	0,093	5,289	1,9658	0,6113	0,3566	0,4934	3,8	-6,9	1,5	22,5			
545	0,3155	-1,522	10,248	2,4205	0,7308	0,3485	1,0919	3,2	-5,4	1,2	21,6			
579	0,2394	0,573	3,482	1,5332	0,7226	0,3259	0,3458	5,1	-8,0	1,3	24,9			
613	0,2885	-0,075	3,854	1,9564	0,7764	0,3272	0,6048	2,8	-6,9	1,4	22,4			
647	0,3167	-0,741	6,685	2,8253	0,8636	0,3257	0,8913	3,3	-6,7	1,6	22,5			
681	0,3161	-0,180	4,832	2,5126	0,8119	0,4165	0,7295	4,3	-6,9	1,3	23,0			
715	0,2612	-0,601	7,281	2,363	0,7196	0,2812	0,5924	2,8	-8,1	1,6	24,1			
749												-368 ± 5	-390 ± 4	
783	0,1915	-1,038	12,044	1,6986	0,6218	0,2086	0,4853	3,5	-5,8	1,9	22,7			
817	0,2096	-0,980	7,648	1,8167	0,5779	0,1877	0,4668	3,4	-7,2	1,4	23,1			
851	0,2845	-0,458	5,067	2,1681	0,8566	0,3177	0,6449	3,3	-6,2	1,3	22,4			
885	0,2716	-0,023	3,439	1,9347	0,9211	0,1780	0,4245	3,0	-7,6	1,5	23,1			
919	0,2125	-0,990	6,933	2,0504	0,5923	0,2402	0,5892	3,5	-7,1	1,4	22,4			
953	0,2763	-0,235	4,595	2,1128	0,8484	0,3670	0,5645	3,7	-7,4	1,4	23,0			
987	0,2521	-0,890	6,446	2,0780	0,6748	0,3110	0,6328	3,5	-6,0	1,5	23,2			
1021	0,2962	-0,113	3,610	2,1579	0,9058	0,2170	0,6166	3,5	-6,9	1,5	22,5			
1055	0,2396	0,215	3,318	1,6401	0,7750	0,2801	0,4302	3,3	-5,9	1,4	22,2			
1089	0,2767	0,246	3,388	1,9106	0,8618	0,2891	0,5004	3,6	-5,0	1,6	20,2			
1123	0,2679	0,370	3,261	1,8317	0,7860	0,3125	0,4656	4,5	-5,2	1,4	20,3			
1157	0,2582	0,108	2,995	1,7065	0,9179	0,1572	0,4046	3,5	-6,8	1,4	22,3			
1191	0,2197	0,144	3,916	1,6174	0,6590	0,2722	0,4435	3,3	-6,1	3,9	20,9			
1225	0,2241	-0,361	4,979	1,9035	0,6741	0,2502	0,4733	3,4	-5,8	1,4	20,7			
1259	0,2715	0,347	3,465	1,9277	0,9777	0,2918	0,4425	3,9	-5,4	1,3	21,2			
1293	0,2107	0,441	3,535	1,4153	0,5961	0,2594	0,3396	3,9	-7,2	1,7	22,3			
1327	0,2380	0,420	3,694	1,7138	0,7790	0,2296	0,3269	2,9	-5,3	1,5	21,2			
1361	0,2813	0,165	3,972	1,9973	0,8960	0,2759	0,5196	3,3	-4,3	1,4	20,5			
1395	0,2670	0,494	3,619	1,6860	0,7741	0,2180	0,4389	3,8	-5,1	1,5	21,3			
1429												-349 ± 5	-383 ± 4	
1463	0,2602	0,209	3,990	1,9791	0,7710	0,3234	0,4970	3,5	-5,3	1,2	21,6			
1497												-290 ± 5	-414 ± 4	

a) Parâmetros de Controle



b) Identificação das peças

Resultado e Discussão

Espera-se encontrar como o material da ferramenta influência na microgeometria do perfil da hélice e evolvente do dente, no grau de acabamento e nos parâmetros de rugosidade, além de entender o comportamento da tensão residual entre as ferramentas utilizadas, após o processo de *shaving* antes e após o tratamento térmico.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Referências

HODGYAI, N.; MÁTÉ, M.; OANCEA, G.; DRĂGOI, M.-V. Gear Hobs—Cutting Tools and Manufacturing Technologies for Spur Gears: The State of the Art. **Materials, Basel**, v. 17, n. 13, p. 3219, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133219>.

BORAL, P.; GOŁĘBSKI, R.; KRÁLIKOVÁ, R. Technological aspects of manufacturing and control of gears—Review. **Materials, Basel**, v. 16, p. 7453, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16167453>.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Processos de fabricação**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

MAZZO, N. **Engrenagens cilíndricas: da concepção a fabricação**. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

RUIZ-PONCE, G., ARJONA, M. A., HERNANDEZ, C., ESCARELA-PEREZ, R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. **Energies**, v. 16, n. 4, 1721, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16041721>

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica**. Tradução: João Batista de Aguiar; José Manoel de Aguiar. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

NORTON, R.L.; STAVROPOULOS, K.D. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

CALLISTER, W. D., Jr.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. Tradução e revisão técnica: Fernando Ribeiro da Silva. [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFET-MINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Investigação do processo de laminação de encruamento via método de elementos finitos

Guilherme Eduardo Bastos¹ (0009-0001-2228-0213), Prof. Dr. Yukio Shigaki¹
(0000-0003-0962-3573),

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, CEFET-MG

Resumo: O processo de laminação a frio é amplamente utilizado na fabricação de produtos planos com o objetivo fundamental de reduzir espessura. Um de seus tipos consiste na laminação de encruamento, caracterizada por pequenas reduções de espessura (0,5 a 3%) e eliminação das bandas de Lüders. Existem diversos modelos matemáticos utilizados atualmente para descrever esse processo. Dentre eles, pode-se citar alguns como o de Roberts e Shigaki. Cada um introduz um comportamento específico do processo, mas, de maneira geral, objetivam determinar parâmetros de laminação como carga e torque de laminação, distribuição de pressão normal entre chapa e cilindro de trabalho, comprimento do arco de contato, tensão de cisalhamento na interface cilindro-tira, entre outros. O presente trabalho apresenta a utilização de um modelo que aplica o método dos elementos finitos em estado plano de deformação, sendo um modelo mais refinado para o estudo. Isto ocorre, pois, ao invés de adotar simplificações como as relativas ao formato do arco de contato, apresenta seus valores em cada elemento finito em que a geometria foi seccionada. Além disso, podem-se obter os valores de diversas variáveis relativas ao arco de contato, como deslocamento, pressão normal e tensão de cisalhamento. Tais variáveis serão abordadas no presente artigo, juntamente com a avaliação de simplificação nas curvas de tensão-deformação ao adotar-se diferentes valores de velocidades de deformação.

Palavras-chave: Laminação a frio, laminação de encruamento, arco de contato, elementos finitos, velocidade de deformação.

Introdução

De acordo com LENARD (2014), o processo de laminação ocorre quando um produto tem sua espessura reduzida quando é processado entre dois cilindros que possuem uma determinada abertura entre eles. Tratando-se da temperatura de processo, quando ela é acima da temperatura de recristalização do material, o processo é denominado laminação à quente, e, quando abaixo, laminação a frio. Este último é um processo amplamente utilizado para obtenção de chapas de alta precisão dimensional e melhores propriedades mecânicas (Dieter, 1988).

A laminação de encruamento normalmente compõe uma das etapas finais de processamento de vários aços e geralmente são aplicadas reduções de 0,5 a 3%. A supressão do patamar de escoamento é importante para evitar a formação de linhas de Lüders e melhorar a uniformidade de forma do material (Mazur, 2012), sendo fundamentais para futuros processos de estampagem do material.

Conforme descrito por Pawelski (2000), apud Lenard, (2014), a laminação de encruamento difere significativamente de outros regimes de laminação a frio. Como os valores de redução são

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

menores e, conseqüentemente, menores os valores de deformação plástica, a deformação elástica passa a ser significativa e precisa ser considerada. Além disso, o forte achatamento dos cilindros e a distribuição não circular do arco de contato invalidam simplificações geométricas empregadas em formulações analíticas clássicas.

Nesse contexto, modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) têm sido amplamente adotados para descrever com maior precisão as condições reais de laminação (Kainz; Krimpelstätter; Zeman, 2003). O MEF permite incorporar efeitos de contato, comportamento elasto-plástico do material, geometria real dos cilindros e variações de tensão ao longo da espessura, reduzindo a necessidade de hipóteses simplificadoras (Shigaki et al., 2016).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo computacional pelo Método dos Elementos Finitos para simulação do processo de laminação de encruamento, com ênfase na análise do arco de contato, pressão normal e tensão de cisalhamento. Espera-se que o modelo contribua para a compreensão mais detalhada do comportamento mecânico durante o encruamento e para simplificar o processo experimental de determinação das curvas de escoamento para elevadas velocidades de deformação, devido ao surgimento de picos nas deformações iniciais da chapa de aço.

Metodologia

Visando o processo de validação do modelo em elementos finitos, foram utilizados dados de um laminador de encruamento industrial do tipo quádruplo configurado em duas cadeiras de laminação em sequência. Para simplificar a simulação, foi utilizada apenas uma das cadeiras e foi representado apenas um par de cilindros laminando um comprimento determinado de material. O tipo do material laminado é o aço carbono SAE 1010 e os cilindros são fabricados em aço forjado. Os demais dados industriais são encontrados na Tabela 1 e os demais dados não fornecidos foram estipulados e podem ser encontrados na tabela 2.

Tabela 1 - Dados industriais referentes à laminação de encruamento do aço 1010.

Propriedade	Unidade	Valor
Espessura de entrada da tira	mm	0,248
Espessura de saída da tira	mm	0,241
Diâmetro do cilindro de trabalho	mm	508
Largura da tira	mm	885
Tensão à frente	MPa	126,6
Tensão à ré	MPa	56,8
Velocidade de laminação	m/s	11,67
Carga de laminação medida	MN	11,6
Limite de escoamento do material da tira	MPa	289,25
Limite de resistência do material da tira	MPa	366,25
Alongamento máximo do material da tira	%	38,25

Fonte: Autor

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

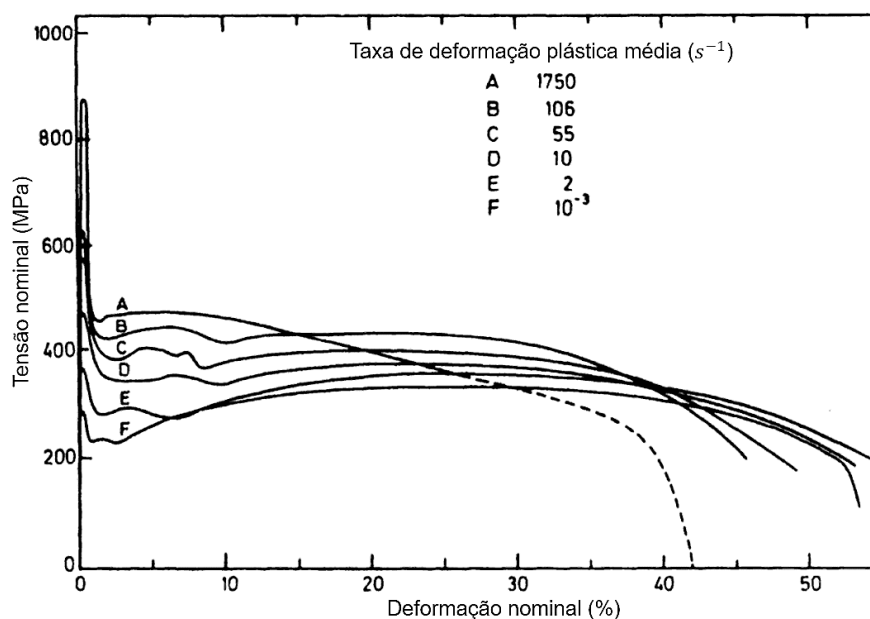
Tabela 2 - Valores estipulados para variáveis sem dados industriais.

Propriedade	Unidade	Valor
Densidade do material dos cilindros de trabalho	g/cm ³	7,85
Densidade do material da tira laminada	g/cm ³	7,85
Modulo de elasticidade do material dos cilindros de trabalho	GPa	210
Modulo de elasticidade do material da tira laminada	GPa	200
Coeficiente de Poisson do material dos cilindros de trabalho	-	0,3
Coeficiente de Poisson do material da tira laminada	-	0,3

Fonte: Autor

Para os valores de taxa de deformação do material, utilizaram-se as curvas extraídas de Blazynski (1987). Isso foi necessário, pois estudar este comportamento é um dos objetivos deste trabalho e tais dados não foram fornecidos juntamente com os outros industriais. Para a inclusão no software de elementos finitos, foram extraídos diversos pontos do plano cartesiano presente na Figura 1 para cada um dos valores de taxa: 10^{-3} , 2, 10, 55, 106 e 1750 s^{-1} .

Figura 1 - Relação tensão-deformação para aço baixo carbono considerando taxas de deformação.



Fonte: adaptado de Blazynski (1987).

Para a construção do modelo, foram desenhados no Abaqus 2016 (software de elementos finitos utilizado) em estado plano de deformação (bidimensional), atribuídas as propriedades mecânicas, posicionamento do cilindro e da tira, aplicação de condições de contorno, aplicação de malha nos elementos, simulação e análise dos resultados. Visando simplificar a simulação e ter comprimento suficiente para convergência de modelo, foi laminada uma tira de comprimento limitado a 110 mm. Além disso, o cilindro foi particionado de maneira a aplicarmos 5 tamanhos de elementos de malha diferentes. Tal estratégia procurou refinar regiões mais próximas ao arco de contato e aumentar o tamanho em locais mais distantes do objeto de estudo (contato com a tira laminada)

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

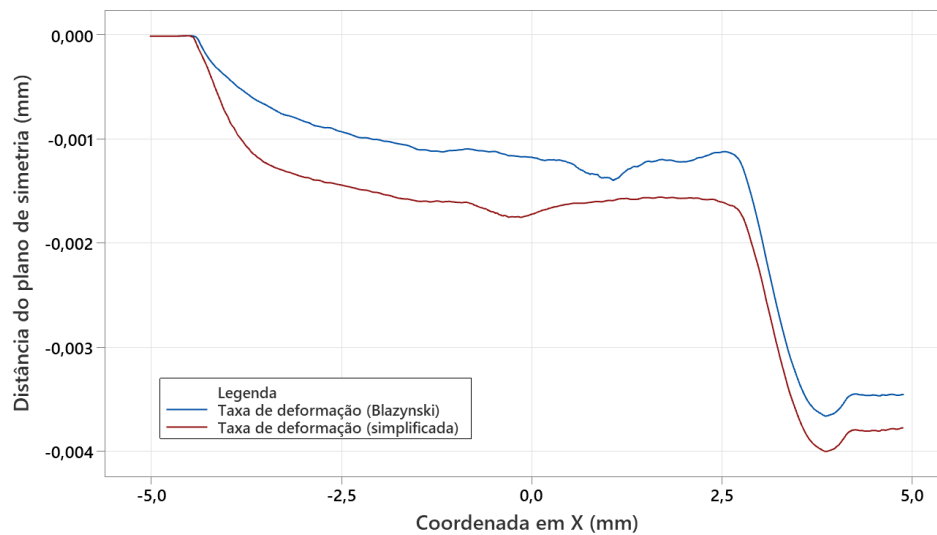
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Outro importante passo na execução da metodologia encontra-se na definição da taxa de deformação para propriedades mecânicas da tira. Além dos dados da Figura 1, foi realizada uma outra simulação eliminando os picos de tensão que ocorrem a pequenos valores de deformação. Ao final, os resultados serão avaliados para concluir se há uma variação significativa entre eles.

Resultados e Discussão

Após a execução de dois tipos de simulação, sendo uma com as taxas de deformação conforme apresentado por Blasynski (1987) e outra com a eliminação dos picos de tensão nos valores iniciais de deformação, foram coletados os dados gerados e plotados em gráficos. Os dados foram divididos em 3: distância do plano de simetria formando o arco de contato, pressão normal e tensão de cisalhamento, como pode ser verificado nas Figuras 2, 3 e 4. Para verificar os resultados, foram realizadas análises estatísticas visando correlacionar as duas curvas e concluir se elas podem ser consideradas similares.

Figura 2 – Perfil do arco de contato considerando taxas de deformações normais e simplificadas.



Fonte: Autor

Figura 3 – Pressão normal considerando taxas de deformações normais e simplificadas.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:

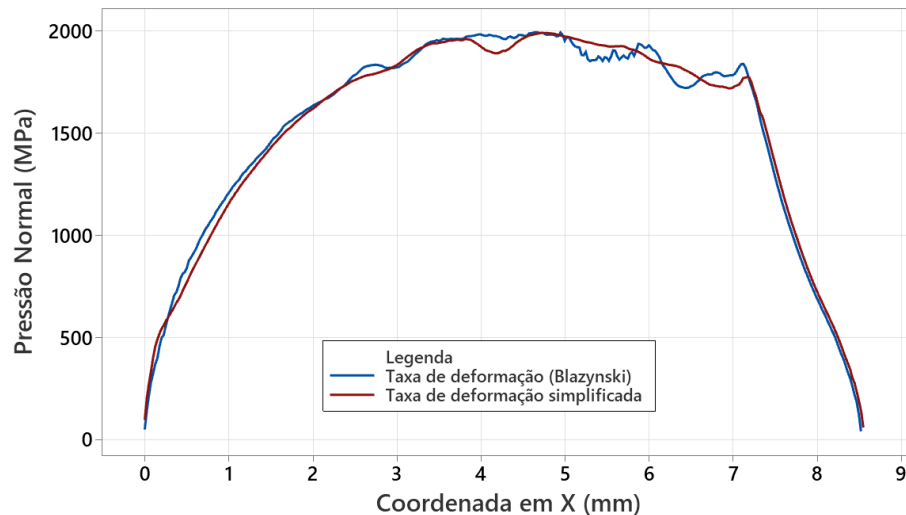


DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

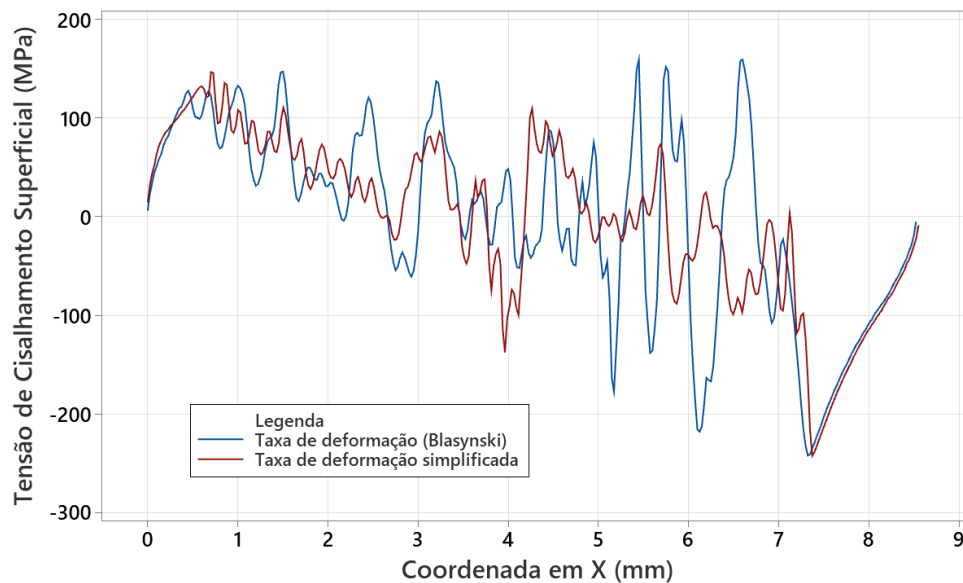
CEFET-MG

Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG



Fonte: Autor

Figura 4 – Tensão de cisalhamento considerando taxas de deformações normais e simplificadas.



Fonte: Autor

Realizando o teste de igualdade da variância das duas curvas que representam as espessuras no plano de simetria no arco de contato, observa-se que o valor de p encontrado foi de 0,730 para o método das comparações múltiplas e 0,951 para o método de Levene. Considerando um nível de significância de (α) 0,05 e uma hipótese de que o desvio padrão de uma amostra sobre a outra é igual a 1, ou seja, os desvios são estatisticamente iguais, observa-se uma confirmação desta hipótese e os valores das duas amostras são estatisticamente iguais.

Já para as duas curvas que representam a pressão normal no arco de contato, no teste de igualdade da variância, observa-se que o valor de p encontrado foi de 0,960 para o método das comparações múltiplas e 0,915 para o método de Levene. Considerando um nível de significância de (α) 0,05 e uma hipótese de que o desvio padrão de uma amostra sobre a outra é igual a 1, ou

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

seja, os desvios são estatisticamente iguais, observa-se uma confirmação desta hipótese e os valores das duas amostras são estatisticamente iguais.

Finalizando com a análise das duas curvas que representam a tensão de cisalhamento, realizando o teste de igualdade da variância, observa-se que o valor de p encontrado foi de 0,004 para método das comparações múltiplas e 0,005 para o método de Levene. Considerando mesmo nível de significância e hipótese, ou seja, os desvios são estatisticamente iguais, observa-se uma negação desta hipótese e os valores das duas amostras não são estatisticamente iguais.

Conclusão

O trabalho explorou o processo de laminação de encruamento usando o MEF. Sua aplicação é fundamental para uma melhor representação do arco de contato, além do benefício da coleta de diferentes variáveis resultantes do processo. De acordo com as análises estatísticas realizadas, pode-se concluir que, a simplificação eliminando os picos de tensão para diferentes valores de taxa de deformação, só não obteve um resultado satisfatório para valores de tensão de cisalhamento. Um aspecto a ser explorado encontra-se na oscilação dos valores, em que, para tal variável, é muito mais significativo dos valores de perfil do arco de contato e pressão normal. Para trabalhos futuros, além das variáveis apresentadas, um estudo dos valores de taxa de deformação nos elementos do arco de contato pode trazer novas conclusões sobre o que acontece no arco de contato e gerar novas maneiras de simplificar a sua utilização neste de simulação. Mesmo aplicando simplificações ao utilizar o MEF, a alta demanda de processamento ainda pode ser um empecilho para aplicações online e novos recursos de otimização ainda são requeridos.

Referências

BLAZYNSKI, T. Z. (Ed.). **Materials at High Strain Rates**. Dordrecht: Springer, 1987.

DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. London: McGraw-Hill, 1988.

KAINZ, A.; KRIMPELSTÄTTER, K.; ZEMAN, K. FE-Simulation of thin strip and temper rolling processes. Em: **ABAQUS Austria User's Conference**, 2003.

LENARD, J. G. **Primer on flat rolling**. 2ª ed. Elsevier, 2014.

MAZUR, V. L. Temper rolling of sheet metal. **Steel in translation**, 42(4): 348-352, 2012. 108.

PAWELSKI, H. Modelling of temper rolling considering surface change of strip. Em: **PIETRZYK, M.; KUSIAK, J.; MAJTA, J.; HARTLEY, P.; PILLINGER, I. Metal Forming**. Balkema, 285-301, 2000.

SHIGAKI, Y.; SILVA, J. M.; MOREIRA, L. P.; ROMIE, R. N. M. A.; MAGALHÃES, F. C. Elastoplastic finite element analysis of the temper rolling process. Em: **XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**, Brasília, 2016.

SHIGAKI, Y.; MONTMITONNET, P.; NAKHOUL, R. Numerical treatments of slipping/no-slip zones in cold rolling of thin sheets with heavy roll deformation. **Lubricants**, 3: 113-131, 2015.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Invólucros Plásticos para DPS: Desenvolvimento, Simulação Computacional e Otimização Topológica segundo UL 1449

Victor Gonçalves Souza¹ (0000-0002-8699-3458), Cristina Almeida Magalhães¹ (0000-0001-6427-5941)

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – CEFET/MG

Resumo

A concepção e execução de projetos de engenharia exigem o uso racional de recursos, assegurando eficiência, segurança e sustentabilidade. No contexto dos Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), equipamentos projetados para proteger sistemas elétricos contra sobretensões transitórias oriundas de descargas atmosféricas ou manobras na rede, a carcaça plástica exerce papel essencial na integridade e confiabilidade do sistema. O DPS atua limitando a tensão de surto a níveis seguros e desviando a corrente excedente ao aterramento, restabelecendo as condições normais após o evento. Contudo, observa-se uma lacuna na literatura quanto à definição da espessura ótima desses invólucros, capaz de garantir resistência mecânica adequada, redução de massa e viabilidade econômica. Este estudo propõe o desenvolvimento de invólucros plásticos em policarbonato para DPS, aplicando modelagem tridimensional em software CAD, simulação computacional em ambiente CAE e técnicas de otimização topológica, conforme a norma UL 1449. A metodologia compreende a construção de modelos virtuais, análise de impacto com esfera e avaliação de espessuras, visando identificar a configuração estrutural mais eficiente. Espera-se contribuir para a redução de custos, aumento da confiabilidade e avanço no uso de ferramentas computacionais no desenvolvimento de produtos. Além disso, propõe-se um modelo replicável aplicável a outros dispositivos e projetos de engenharia.

Palavras-chave: CAE, escalabilidade impacto mecânico, sustentabilidade, validação estrutural.

1. Introdução

O uso consciente de insumos, muitos deles derivados de recursos naturais não renováveis, impõe ao projetista a responsabilidade de definir, já na fase inicial do desenvolvimento, materiais e geometrias que conciliem desempenho técnico, economia e confiabilidade. Nesse contexto, a etapa de projeto se apresenta como decisiva para o sucesso do produto, pois dela dependem fatores como robustez, segurança, viabilidade econômica e aderência às normas vigentes. Uma vez que, em grande parte dos casos, a melhoria do produto se desenvolve com sustentação em práticas empíricas e experiências validadas anteriormente (SILVA, 2024). Entretanto, em métodos tradicionais, baseados apenas na experiência empírica do projetista, podem levar a incertezas e retrabalhos (SILVA, 2024). Tal realidade aponta para a necessidade de métodos mais sistemáticos, precisos e confiáveis, capazes de orientar o processo criativo e reduzir os riscos associados. Para superar essas limitações, a simulação computacional e a otimização topológica se consolidaram

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

como ferramentas indispensáveis, permitindo testar diferentes cenários de carga e impacto antes da fabricação de protótipos físicos (SILVA et al., 2017; BENDSØE; SIGMUND, 2003).

A inserção da ciência computacional no processo de desenvolvimento de produtos não representa apenas um ganho em velocidade, mas também em abrangência e confiabilidade. Estudos destacam a importância do uso de modelos numéricos em conjunto com a caracterização de materiais, como o policarbonato, amplamente empregado em aplicações elétricas pela sua resistência ao impacto e propriedades dielétricas (RAHMAN et al., 2015; LI et al., 2023). Modelos tridimensionais, quando integrados a ferramentas de análise por elementos finitos, permitem avaliar cenários variados de carga, impacto e deformação, antecipando possíveis falhas e direcionando o aprimoramento geométrico. Essa abordagem contribui para encurtar o ciclo de desenvolvimento, reduzir custos com protótipos físicos e otimizar o uso de recursos, ao mesmo tempo em que fortalece a confiabilidade do produto.

É nesse contexto que se insere a presente pesquisa, cujo foco é a criação, simulação e avaliação computadorizada de um invólucro plástico para Dispositivos de Proteção Contra Surtos (DPS). A proposta busca definir uma geometria otimizada, com espessuras mínimas que garantam resistência mecânica adequada frente aos ensaios exigidos pela norma UL 1449. Um dos pontos críticos investigados é a capacidade do invólucro de suportar o teste de impacto de esfera sem ruptura. Caso ocorra fratura, a carcaça deve, ainda assim, evitar a exposição de partes energizadas, prevenindo riscos de choque elétrico ao usuário. O projeto adequado de invólucros plásticos para DPS deve conciliar desempenho técnico, economia e confiabilidade (ONESTO, 2021).

2. Metodologia

- 1) Caracterização de normas e materiais,
- 2) Construção de um modelo tridimensional virtual;
- 3) Simulações computacionais com aplicação de técnicas de otimização topológica (OT) e de forma (OF).

Essa organização permite integrar requisitos normativos, fundamentos de projeto e ferramentas computacionais de alto desempenho, culminando em um modelo otimizado de invólucro plástico para Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS).

2.1 Caracterização de normas e materiais

A etapa consiste no estudo detalhado das normas internacionais aplicáveis aos DPS, com foco nos requisitos técnicos e de segurança. A principal referência será a UL 1449 – *Standard for Surge Protective Devices* (UL, 2019) norma de referência para ensaios de impacto e esmagamento em DPS (LSP GLOBAL, 2023). Entre os parâmetros avaliados estão: resistência ao impacto, proteção contra contato com partes energizadas, dimensões mínimas, classe de inflamabilidade e propriedades dielétricas.

O impacto por esfera, em particular, aplica energia de 6,8 J em ensaios destrutivos, sendo um critério de validação fundamental (TRANSECTOR, 2023). Complementarmente, será avaliado o Ensaio de Esmagamento (Crush Test), que aplica forças de compressão para verificar a integridade estrutural após a retirada da carga.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Complementarmente, será realizada a caracterização dos materiais poliméricos utilizados em invólucros onde serão comparados polímeros como policarbonato, ABS, poliamidas e polipropileno (ZHANG et al., 2015), considerando variações com aditivos como fibra de vidro e retardantes de chama.

Estudos demonstram a alta resistência do policarbonato a impactos, inclusive em altas taxas de deformação, o que o torna especialmente adequado para aplicações normativas (MIT, 2002; WANG et al., 2015). Para cada material, serão analisadas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tração, flexão e impacto) e térmicas (deflexão térmica, inflamabilidade), seguindo as normas UL 746C (UL, 2017) e equivalentes da ASTM. A precisão das simulações dependerá diretamente da fidelidade dos modelos de materiais empregados.

2.2 Construção de um modelo tridimensional virtual

A segunda etapa contempla o desenvolvimento de um modelo tridimensional em software CAD, fundamentado nos requisitos normativos e nos critérios geométricos estabelecidos pela ISO/TR 14638:2015, que orienta a Especificação Geométrica de Produtos (GPS). A GPS abrange parâmetros como dimensões, ângulos, posição, batimento, rugosidade e tolerâncias, fundamentais para garantir a precisão e a viabilidade industrial.

O modelo CAD será concebido considerando não apenas a forma geométrica, mas também aspectos práticos de fabricação por injeção plástica. Elementos como reforços estruturais, variações de espessura, encaixes, travas internas e interfaces para componentes ativos serão projetados de modo a equilibrar robustez estrutural, funcionalidade e viabilidade de moldagem. Além disso, serão geradas variações geométricas (espessuras, reforços, disposições de nervuras) que servirão como base para a comparação de desempenho em etapas posteriores.

Essa etapa será realizada em softwares CAD com licenças acadêmicas, garantindo acessibilidade e compatibilidade com os módulos de análise subsequentes. Na segunda etapa, os modelos tridimensionais serão desenvolvidos em CAD, considerando requisitos da ISO/TR 14638:2015 para especificação geométrica funcional (ISO, 2015). Essa modelagem contempla espessuras mínimas, nervuras, reforços e detalhes de injeção plástica (XU et al., 2010).

2.3 Simulações computacionais com aplicação de técnicas de otimização topológica (OT) e de forma (OF)

Por fim, na terceira etapa, os modelos serão importados para softwares CAE, onde serão realizadas simulações via MEF (*Finite Element Method*). Diferentes pontos de impacto serão analisados para garantir ampla cobertura dos requisitos normativos (PAPALAMBROS; HAFTKA, 2000). A otimização topológica será aplicada para reduzir massa e maximizar rigidez, eliminando regiões de baixa contribuição estrutural (ZHANG et al., 2024; SOUZA; LOPES, 2021).

Os resultados gerados – tensões, deformações, deslocamentos máximos e fatores de segurança – serão confrontados com os limites admissíveis do material caracterizado. Essa análise permitirá identificar geometrias promissoras e eliminar versões com desempenho insuficiente. Em seguida, serão aplicadas as técnicas de Otimização Topológica (OT) e Otimização de Forma (OF). A OT será utilizada para propor geometrias mais eficientes, eliminando volumes de material que não

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

contribuem significativamente para a rigidez ou resistência do invólucro. Já a OF permitirá ajustes sutis em regiões críticas para reduzir concentrações de tensão e melhorar a distribuição de esforços.

Funções objetivo serão definidas conforme critérios de projeto, como minimizar massa, maximizar rigidez e limitar deslocamentos ou tensões críticas. Para tanto, poderão ser empregados métodos de densidade, *level set* ou algoritmos genéticos, dependendo da convergência e aplicabilidade observadas nos testes preliminares. O modelo resultante será reajustado no ambiente CAD, considerando as restrições de fabricação por injeção plástica (linhas de partição, ângulos de saída, pontos de injeção e extração do molde). Esse modelo otimizado será novamente submetido a simulações no CAE, de modo a validar se os critérios de segurança e robustez continuam atendidos mesmo após a redução de massa.

Por fim, será avaliada a viabilidade de produção em larga escala, considerando aspectos técnicos (complexidade geométrica, integridade estrutural) e econômicos (custo de moldes e volume de produção). Essa análise permitirá verificar a aplicabilidade industrial das soluções propostas, consolidando a ponte entre pesquisa acadêmica e prática profissional.

3. Resultados esperados

Espera-se que os resultados confirmem a eficácia da metodologia adotada. Entre os desdobramentos previstos estão:

- **Modelo CAD otimizado e viável industrialmente:** atendendo às exigências normativas e de fabricação (ISO, 2015).
- **Comprovação virtual da resistência ao impacto:** validada por simulações de elementos finitos (MIT, 2002).
- **Definição de parâmetros geométricos críticos:** como espessura mínima e reforços, baseados em critérios de desempenho estrutural (XU et al., 2010).
- **Identificação de pontos críticos de tensão:** permitindo ajustes geométricos estratégicos (ZHANG et al., 2024).
- **Modelo com redução de massa de 20–40%:** em linha com resultados de otimização topológica em projetos similares (SILVA et al., 2017).
- **Metodologia replicável:** aplicável em outros dispositivos elétricos (PAPALAMBROS; HAFTKA, 2000).

4. Conclusão

A pesquisa propõe o desenvolvimento de um invólucro plástico para DPS em polycarbonato, fundamentado em modelagem computacional, simulação e otimização. A metodologia combina CAD, CAE, MEF e OT, assegurando conformidade com a **UL 1449** (UL, 2019) e alinhamento a práticas de engenharia sustentável (SILVA, 2024). Os resultados esperados incluem maior assertividade no design, redução de custos e prazos, além da replicabilidade da metodologia em diferentes contextos industriais (ZHANG et al., 2024). Dessa forma, o trabalho contribui tanto para o avanço acadêmico quanto para a inovação em engenharia aplicada à proteção elétrica.

Referências

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology Optimization: Theory, Methods and Applications**. Berlin: Springer, 2003.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

COSTA, J. F.; ALMEIDA, C. *Metodologias de Investigação Científica – passos para elaboração de artigos científicos*. **Revista IEP**, v. 2, n. 1, p. 1-20, 2024.

ISO. **ISO/TR 14638: Geometrical product specifications (GPS) — Masterplan**. Geneva: ISO, 2015.

LI, Y. et al. Characterization of mechanical and dielectric properties of 3D printed glass fibre reinforced Polycarbonate. Uppsala University, 2023.

LSP GLOBAL. **Differences in Surge Protective Device UL1449 vs. IEC61643**. 2023. Disponível em: <https://lsp.global>.

MIT. **Mechanics of Notched Izod Impact Testing of Polycarbonate**. Cambridge: MIT Press, 2002.

ONESTO. **Dispositivos de proteção contra surtos tipo 1, tipo 2 e tipo 3**. 2021. Disponível em: <https://www.onesto-ep.com>.

PAPALAMBROS, P. Y.; HAFTKA, R. T. Structural optimization based on CAD–CAE integration. **Computer-Aided Design**, v. 32, p. 377–395, 2000.

RAHMAN, A. et al. Mechanical Properties and Fracture Microstructure of Polycarbonate. **Polymer Testing**, v. 45, p. 67–78, 2015.

SILVA, R. F. et al. Topology Optimization aided structural design. **Heliyon**, v. 3, n. 5, p. 10149–10163, 2017.

SILVA, V. G. **Estrutura do artigo científico**. SciELO Educação, 2024.

SOUZA, V. G.; LOPES, F. R. *Plastic work constrained elastoplastic topology optimization*. **Int. Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 122, p. 145–168, 2021.

TRANSECTOR. **UL 1449 SPD Testing Terminology Explained**. 2023. Disponível em: <https://www.transtector.com>.

UL. **UL 746C: Polymeric Materials – Use in Electrical Equipment Evaluations**. Northbrook: UL Standards, 2017.

UL. **UL 1449: Standard for Surge Protective Devices**. 4th ed. Northbrook: UL Standards, 2019.

WANG, X. et al. Mechanical property characterization and simulation of polycarbonate FDM material. **Composites Part B**, v. 80, p. 50–57, 2015.

XU, W. et al. Structural optimization: 7 design tips for lighter designs. **Computer-Aided Engineering**, v. 47, p. 311–324, 2010.

ZHANG, L. et al. Topology optimization of finite strain elastoplastic materials. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 418, p. 116435, 2024.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Modelo matemático com código do GT-POWER de um motor de ignição por centelha turbo alimentado com etanol E100

Dionata Domingos Martins (0009-0003-8415-9691), Fernando Antonio Rodrigues Filho (0000-0003-1786-4158)¹

(Laboratório de motores de combustão interna, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET- MG).

Resumo:

A indústria automotiva continua em busca por tecnologias voltadas a eficiência de conversão de combustível e redução das emissões de poluentes. Motores com reduzido volume deslocado, menor que 1500 cm³, sobrealimentados e abastecidos com biocombustíveis, estão sendo desenvolvidos com o objetivo de atender o controle de emissões, mantendo um bom desempenho. Motores sobrealimentados são propícios a apresentarem elevadas temperaturas no ar de admissão e conseqüentemente tendem a enfrentar problemas com knock, limitando dessa forma tanto a razão volumétrica de compressão quanto a pressão máxima de sobrealimentação. A primeira reduz a eficiência térmica do motor e a outra os valores máximos de torque e potência do motor. Visando reduzir a temperatura do ar de admissão, propõem-se a utilização de um injetor de etanol a montante da válvula borboleta. Dotado de elevado calor de vaporização (cerca de 920 [kJ/kg]), a evaporação deste combustível no coletor de admissão provoca um efeito refrigerante diminuindo a temperatura do ar e deixando o motor menos propenso a detonação. Um sistema de detecção de knock é utilizado para avaliar a eficácia do método na mitigação do knock. Sensores de temperatura estão instalados a montante e a jusante do compressor e do eletro injetor de etanol. Testes com e sem injeção de etanol a montante da válvula borboleta serão realizados para diversas condições operacionais do motor. Além da análise experimental um modelo matemático 1D será desenvolvido visando a obtenção das curvas de torque e potência do motor. Este modelo será calibrado e validado a partir de dados experimentais obtidos na bancada dinamométrica do CEFET-MG.

Palavras-chave: Motor de combustão Interna, Etanol, Sobrealimentação, Simulação numérica, GT-Power, Detonação

1. Introdução

A busca pela melhoria da eficiência energética de automóveis tem sido objeto de alta relevância no cenário mundial. Normas ambientais para redução da emissão de poluentes como HC, CO₂, NO_x, impuseram à indústria automobilística desenvolver meios para mitigar a emissão desses gases e aumentar a eficiência de seus motores. Pacotes tecnológicos como *downsizing*, turbo-compressão, injeção direta e comando de válvulas eletromagnético, entre outros, são hoje uma realidade [5] .

1.1 Motores sobrealimentados

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

A sobrealimentação de motores de combustão interna é praticada há muito tempo como um método para melhorar a potência do motor [1]. O Objetivo da sobrealimentação de um motor é aumentar a densidade da carga de ar antes que ela entre nos cilindros, assim, a massa de ar aumentada será induzida e, em seguida, comprimida em cada cilindro.

1.2 Modelo (1D)

De acordo com [2] a modelagem unidimensional (1D) de motores é uma prática bem estabelecida na indústria. Sua resposta para o processo de troca gasosa em um motor de combustão interna apresenta maior incerteza quanto as soluções tridimensionais da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), no entanto, para fins industriais, o modelo (1D) é utilizado para solucionar processos com baixa resolução. Em abordagens (1D), implementadas em software comercial, a combustão é simulada por funções de Wiebe.

2 Metodologia

2.1 Equações solucionadas pelo modelo (1D)

O modelo matemático de fluxo envolve a solução das equações de Navier-Stokes, nomeadamente as equações de conservação do momento (2.1), energia (2.2) e continuidade (2.3) para escoamentos unidimensionais.

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{1}{dx} \left(dpA + \sum_{\text{limites}} (\dot{m}u) - 4C_f \frac{\rho u}{2} \frac{dxA}{D} - K_p \left(\frac{1}{2} \rho u |u| \right) A \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{d(\dot{m}e)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum_{\text{limites}} (\dot{m}H) - h_c A_s (T_f - T_p) \quad (2.2)$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{\text{limites}} \dot{m} \quad (2.3)$$

2.2 Processo de vaporização do combustível

O processo de vaporização de uma gota de combustível inicia-se muito lentamente, pois, a maioria do calor transferido das redondezas da gota é utilizada no seu aquecimento até o momento em que a gota atinge sua temperatura de saturação e, então, o calor é utilizado apenas para vaporizar o líquido [4]. A variação da energia do combustível é determinada por:

$$\Delta Q_c = m_{vc} \cdot c_c \cdot (T_{sat} - T_{ini}) + L \cdot m_c \quad (2.4)$$

De forma análoga, a variação de energia do ar é:

$$\Delta Q_{ar} = m_{ar} \cdot c_{ar} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.5)$$

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Realizando um balanço de energia tem-se:

$$\Delta Q_{ar} = \Delta Q_c \quad (2.6)$$

Logo:

$$m_{ar} \cdot c_{ar} \cdot (T_1 - T_2) = m_{vc} \cdot c_c \cdot (T_{sat} - T_{ini}) + L \cdot m_c \quad (2.7)$$

A queda de temperatura do ar $\Delta T_{ar} = (T_1 - T_2)$, é causada pela vaporização da quantidade de m_{vc} do combustível, o calor perdido pelo ar é utilizado apenas para aquecer e vaporizar a m_{vc} do combustível. A fração mássica de combustível vaporizado é a razão entre a massa de vapor de combustível pela massa de combustível admitido [8] :

$$m_{vc} = X \cdot m_c \quad (2.8)$$

Substituindo pelo termo m_{vc} de (2.8) obtém-se:

$$m_{ar} \cdot c_{ar} \cdot \Delta T_{ar} = X \cdot m_c \cdot (L + c_c \cdot (T_{sat} - T_{ini})) \quad (2.9)$$

A fração mássica de combustível vaporizado é:

$$X = \frac{m_{ar} \cdot c_{ar} \cdot \Delta T_{ar}}{m_c \cdot [L + c_c \cdot (T_{sat} - T_{ini})]} \quad (2.10)$$

2.3 Eficiência volumétrica

Motores de quatro tempos têm um ciclo de admissão distinto, a eficiência volumétrica indica a capacidade de respiração do motor. O sistema de admissão deve ser projetado de tal forma que o motor consiga absorver o máximo de ar possível. A eficiência volumétrica (2.11) é definida como a razão entre a taxa de fluxo de volume real de ar no sistema de admissão e a taxa à qual o volume é deslocado pelo sistema [1] .

$$\eta_v = \frac{\dot{m}/\rho}{V_d N/2} \quad (2.11)$$

2.4 Análise termodinâmica do compressor

A Figura 1 ilustra a vista frontal de um compressor do tipo centrífugo utilizado no modelo:

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

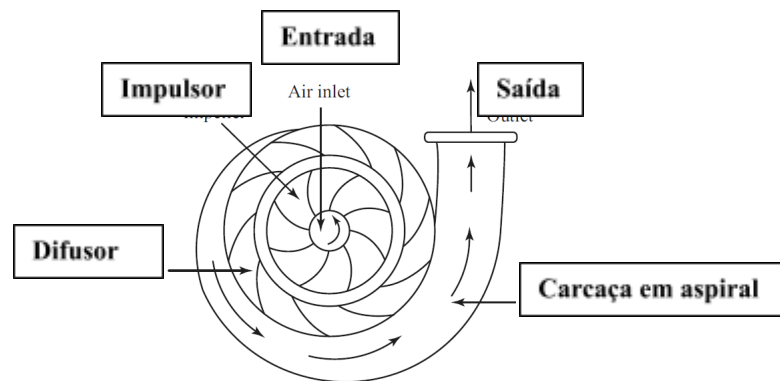
FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Figura 1 – Compressor centrífugo



Fonte: Adaptado de GANESAN (2012)

Para um processo de compressão adiabática, o trabalho realizado no compressor é determinado por:

$$w = - \int v dp = h_2 - h_1 \quad (2.12)$$

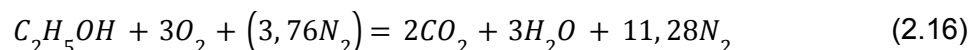
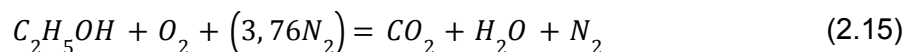
$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = \frac{c_p T_1}{\eta_c} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (2.13)$$

A potência por unidade de massa necessária para acionar o compressor é então determinada:

$$w = \frac{\dot{m}_a c_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{60 \times \eta_c} \quad (2.14)$$

2.2 Processo de combustão do etanol

Para a combustão completa com a quantidade teórica de ar, os produtos consistem em dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre, o nitrogênio que acompanha o oxigênio no ar e qualquer nitrogênio contido no combustível. Nenhum oxigênio livre aparece nos produtos [6]. Os passos (2.15) e (2.16) formam a estequiometria da combustão do etanol (C_2H_5OH), a razão ar/combustível é então determinada por (2.17):



III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

$$\frac{A}{C} = \frac{N_{ar} M_{ar}}{N_c M_c} \quad (2.17)$$

2.5 Função de Wiebe

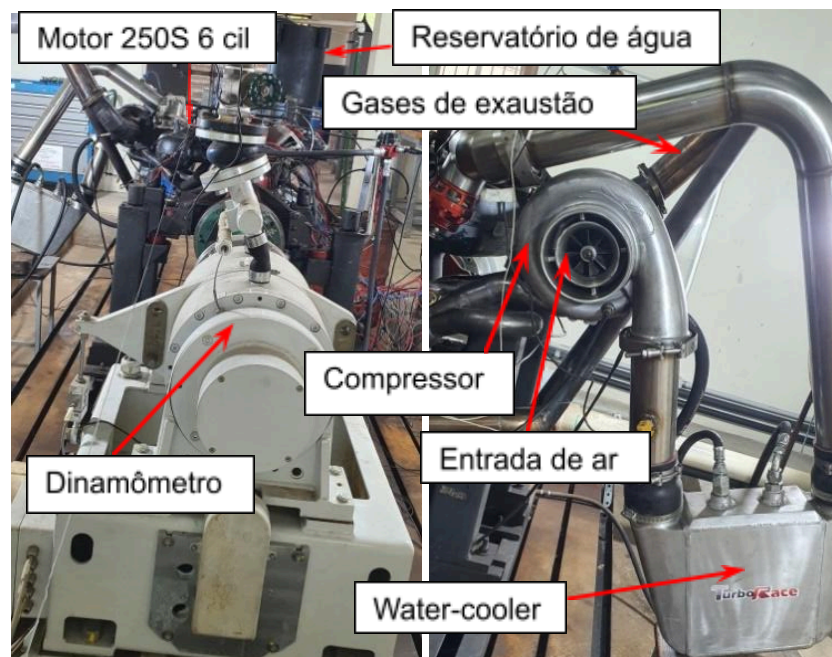
O processo de combustão é um dos fenômenos mais complexos a serem modelados por modelos matemáticos [7], a função de Wiebe pode ser usada para modelar a liberação de energia em uma ampla variedade de sistemas de combustão, sua forma matemática é descrita em (2.18):

$$x_b(\theta) = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\theta - \theta_s}{\Delta\theta}\right)^m\right] \quad (2.18)$$

2.6 Esquema para análise experimental

A Figura 2 ilustra a instrumentação utilizada para testes no motor:

Figura 2 – Esquema de montagem para testes no motor



Fonte: Autor

3 Resultados esperados

Os resultados esperados da pesquisa são:

- Mitigação da detonação decorrente da injeção de etanol a montante da válvula borboleta
- Aumento de eficiência volumétrica
- Redução da temperatura do ar de admissão.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Referências

- [1] GANESAN, V., 2012, **Internal Combustion Engines**, 4^a ed., New York, USA, McGraw-Hill.
- [2] DEMESOUKAS., **0D/1D combustion modeling for the optimization of spark ignition engine combustion systems**, 2015. 230 (Doutorado). University of Orléans
- [3] DE MELO, T. C. C., Modelagem Termodinâmica de um Motor do Ciclo Otto tipo Flex-Fuel funcionando com Gasolina, Alcool, e Gás Natural, 2007. 169 (Mestrado). **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, COPPE.
- [4] CHIN, J S, DURRETT, R, & LEFEBURE, A M (1984). The interdependence of spray characteristics and evaporation history of fuel sprays. **J. Eng. Gas Turb.; (United States)**, 106:3. Disponível em : <https://doi.org/10.1115/1.3239618>
- [5] SÁ, S. R. de; LIMA, J. A. de. Análise do avanço de ignição em MBT e sua influência na eficiência energética automotiva. **Revista Principia**, [S. l.], v. 1, n. 56, p. 144–152, 2021. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id4406.
- [6] MORAN, J.M. **Fundamentals Of Engineering Thermodynamics**. 8^a ed. John Wiley & Sons, 2014.
- [7] STEPANENKO, D., KNEBA, Z. Thermodynamic modeling of combustion process of the internal combustion engines – an overview. **Combustion Engines**. 2019, 178(3), 27-37. DOI: 10.19206/CE-2019-306
- [8] Feitosa, M.V.;, Hildebrand Jr., L.(1998a) “Determinação da fração de combustível vaporizado em motores de combustão interna”. **VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas**, Vol. 2, pp. 748-751, nov., Rio de Janeiro, Brasil.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Lista de símbolos

a fator de eficiência de Wiebe [adm]

A área da seção transversal [m²]

$\frac{A}{c}$ razão ar combustível [adm]

c_{ar} calor específico do ar [kJ/(kg.K)]

c_c calor específico do combustível [kJ/(kg.K)]

C_f coeficiente de atrito [adm]

c_p calor específico a pressão constante [kJ/(kg.K)]

D diâmetro [m]

h entalpia [kJ/kg]

h_c coeficiente de transferência de calor [W/(m².K)]

H entalpia [kJ/kg]

K_p coeficiente de perda de pressão [adm]

L calor latente de vaporização do combustível [kJ/kg]

m fator de forma de Wiebe [adm]

\dot{m} vazão mássica [kg/s]

m_{ar} massa de ar [kg]

m_c massa de combustível [kg]

m_{vc} massa de combustível vaporizado [kg]

M_{ar} massa de ar teórico [kg]

M_c massa de combustível teórico [kg]

N numero de revoluções [rpm]

N_{ar} número de mols do ar [mol]

N_c numero de mols do combustível [mol]

p pressão [kPa]

Q_{ar} Energia do ar [kJ/kg]

Q_c Energia do combustível [kJ/kg]

ρ densidade [kg/m³]

θ ângulo do eixo de manivelas [graus]

θ_s ângulo de início da combustão [graus]

η_c eficiência do compressor [%]

η_v eficiência volumétrica [%]

T temperatura [K]

T_{ar} temperatura do ar [K]

T_f temperatura do fluido [K]

T_{ini} temperatura inicial do combustível [K]

T_{sat} temperatura de sturação do combustível [K]

T_p temperatura da parede [K]

u velocidade [m/s]

V volume [m³]

V_d volume deslocado [m³]

w trabalho do compressor [J]

\dot{w} potência de compressão [kW]

x_b fração de energia liberada [%]

X fração de combustível vaporizado [%]

γ razão entre calores específicos [adm]

Lista de abreviações

1D unidimensional

CFD dinâmica dos fluidos computacional

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Otimização topológica ESO aplicada na engenharia mecânica - Uma revisão sistemática pela metodologia PRISMA

Diogo Alexandre Silva Santos¹ (0009-0000-0244-4009), Cristina Almeida Magalhães² (0000-0001-6427-5941)

1,2 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, CEFET/MG

Resumo: A otimização topológica (OT) pelo método ESO (Evolutionary Structural Optimization) consolida-se como ferramenta essencial no projeto estrutural. Esta revisão sistemática (PRISMA) de 47 artigos (2020-2025) confirma a hegemonia da variante BESO, aplicada em mais da metade dos estudos analisados. Isso é justificado pela sua eficácia em problemas complexos. As aplicações concentram-se na engenharia estrutural, com contribuições relevantes nos setores automotivo e aeroespacial, nas quais se observam melhorias substantivas em propriedades como leveza e rigidez. Os achados apontam que os elevados custos computacionais e as limitações para fabricação das geometrias complexas permanecem como obstáculos significativos. Nesse contexto, a integração com inteligência artificial e manufatura aditiva surge como área emergente e promissora, indicando um caminho para superar essas barreiras e automatizar o ciclo de projeto e fabricação.

Palavras-chave: BESO, engenharia estrutural, manufatura aditiva, otimização topológica, prisma.

Introdução

A Otimização Topológica (OT) é um método de projeto estrutural que determina a configuração ideal distribuindo material de forma eficiente dentro de um domínio de projeto, satisfazendo cargas, desempenho e restrições de volume (TANG et al., 2014). Diferente da otimização de tamanho e forma, a OT independe do projeto inicial, oferecendo um espaço de projeto mais amplo (GAO et al., 2024). O método ESO (Evolutionary Structural Optimization) destaca-se por sua abordagem intuitiva, baseada na remoção iterativa de elementos finitos ineficientes ("hard-kill"), visando reduzir o peso e/ou aumentar a rigidez (SIMONETTI et al., 2020). Trata-se de um processo heurístico que determina a forma e a topologia da estrutura simultaneamente. Este artigo realiza uma revisão sistemática baseada na metodologia PRISMA sobre a OT pelo método ESO, devido à escassez de revisões sistemáticas com esse tema na literatura. O foco do presente trabalho é analisar criticamente os avanços metodológicos, as aplicações práticas e as limitações do método ESO e de suas variantes, como o SESO (Smoothing ESO) e o BESO (Bidirectional ESO).

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Metodologia

O presente estudo é uma Revisão Sistemática conduzida conforme as diretrizes do método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que assegura transparência, rigor científico e repetitividade. A estratégia de busca foi executada nas bases de dados Scopus, Science Direct e Periódicos CAPES, utilizando os termos "Evolutionary Structural Optimization" com o operador booleano AND "Topology Optimization". Foram estabelecidos critérios de inclusão (artigos publicados entre 2020-2025; estudos que abordem ESO clássico ou suas variantes; aplicações em engenharia estrutural, aeronáutica, automotiva ou manufatura aditiva) e exclusão (somente artigos em inglês, experimentais, revisados por pares e de acesso livre). O processo seguiu as etapas PRISMA: (1) busca inicial e identificação de artigos; (2) triagem por título/resumo e avaliação de texto completo; (3) extração de dados padronizada; (4) síntese e análise temática. O corpus final da análise foi composto por 47 artigos.

Resultados e Discussão

A análise dos 47 artigos revelou a distribuição das publicações por base de dados e temas, conforme sumarizado na Tabela 1. Nota-se que um mesmo artigo pode ser classificado em múltiplas categorias.

Tabela 1: Distribuição dos artigos analisados por base de dados e temas.

Grupo	Qtde Artigos	Com BESO	Com SESO	Com IA	Com manuf. Aditiva	Aplicações estruturais	Automotivo	Aeroespacial
CAPEs	10	7	1	0	1	7	1	1
SCOPUS	10	6	1	1	3	6	3	2
SCIENCE DIRECT	27	15	1	3	6	20	10	5
Total	47	27	3	4	10	33	14	8

Fonte: próprio autor

Variações do ESO e Eficiências Comparativas:

A variante BESO foi a mais recorrente, presente em 27 artigos, demonstrando robustez em aplicações complexas como controle de frequência natural, vibração e confiabilidade estrutural. Sua eficiência advém da capacidade bidirecional de adicionar e remover material. Variações como SA-BESO (Self-Adaptive) e métodos híbridos com SIMP foram identificadas. O SESO foi menos frequente (3 artigos), com aplicação em problemas multiobjetivos.

Setores Industriais e Resultados

A engenharia estrutural foi o setor predominante (33 artigos), com ganhos em rigidez e redução de peso em vigas e estruturas contínuas. No setor automotivo (14 artigos), otimizaram-se absorvedores de impacto e chassis, obtendo maior eficiência energética e redução de massa. No setor aeroespacial (8 artigos), o foco foi na redução de vibrações e diminuição do peso, com topologias compatíveis com manufatura aditiva.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Desafios Computacionais e de Fabricação

Desafios computacionais, como alta demanda por recursos em simulações não lineares, foram reportados em 18 artigos. Estratégias de mitigação incluem filtros morfológicos e integração com algoritmos heurísticos. Doze estudos destacaram obstáculos de fabricação, como a presença de elementos não fabricáveis. As soluções propostas envolvem a imposição de restrições de espessura mínima e a suavização geométrica.

Integração com IA e Manufatura Aditiva

A integração com tecnologias emergentes mostrou-se promissora. Quatro artigos aplicaram IA (incluindo redes neurais, como U-Net) para acelerar a convergência. Dez artigos exploraram a sinergia com Manufatura Aditiva, adaptando topologias para impressão 3D. Dois trabalhos integraram IA e MA de forma combinada, apontando para a automação do ciclo projeto-fabricação.

Conclusão

Conclui-se que o método ESO mantém sua maturidade e relevância no campo da otimização topológica, com a variante BESO estabelecida como a mais difundida e eficaz para aplicações industriais complexas. Os setores estrutural, automotivo e aeroespacial são os principais beneficiários, com ganhos documentados em desempenho e eficiência material. Contudo, os elevados custos computacionais e as limitações de fabricabilidade permanecem como desafios significativos. O desenvolvimento futuro do método está intrinsecamente ligado à superação dessas barreiras por meio da integração sinérgica com Inteligência Artificial e Manufatura Aditiva, uma fronteira estratégica para pesquisa e aplicação industrial.

Referências:

GAO, Y. ZHOU, S. LI, M. *Structural Topology Optimization Based on Deep Learning*. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 154, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108125>. Acesso em: 14 de maio 2025.

TANG, Tianshu; WANG, Leijia; ZHU, Mingqiao; ZHANG, Huzhi; DONG, Jiarui; YUE, Wenhui; XIA, Hui. *Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems*. **Materials (Basel)**, [S.l.], v. 17, n. 23, p. 5970, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/23/5970>. Acesso em: 14 de maio 2025.

SIMONETTI, H. L., ALMEIDA, V. S., NEVES, F. de A. das, & ALMEIDA, V. D. D. (2021). OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE ESTRUTURAS TRIDIMENSIONAIS USANDO MMA. **Revista CIATEC-UPF**, 13(3), 93-110. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/view/12150>. Acesso em: 15 de maio 2025.

1. ANDRADE, Fábio Moraes de; MAGALHÃES, Cristina Almeida. *Evolutionary structural optimization in energy absorption structures*. 2022. **Advances in Engineering Software**. Volume 169. 2022. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2022.103145.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

2. LI, Yongxin; ZHOU, Guoyun; CHANG, Tao. *Topology Optimization with Aperiodic Load Fatigue Constraints Based on Bidirectional Evolutionary Structural Optimization*. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2021. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 130, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmcs.2022.017630>.
3. ZHANG, Hu-zhi; LUO, Peng; YUAN, Jian; HUANG, Yao-sen; LIU, Jia-dong. *Reinforcement layout design for deep beam based on BESO*. **Structural Engineering and Mechanics**. Volume 84. 2022. DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2022.84.4.547>.
4. ZHAO, Ang; LI, Pei; LIU, Kui; CUI, Yehui. Topology optimization design of frame structures based on the Direct FE2 method. **Materials & Design**. Volume 254, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114091>
5. WANG, Jie; GAO, Tong; LI, Ming; ZHU, Jihong; SONG, Longlong, ZHANG, Weihong. *Topology optimization of modular structures with multiple assemblies and applications to airborne shelves*. **Chinese Journal of Aeronautics**. Volume 37. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.12.014>
6. LI, Yu; WU, Hao; XIE, Xinjie; ZHANG, Liming; YUAN, Philip F.; XIE, Yi Min. *FloatArch: A cable-supported, unreinforced, and re-assemblable 3D-printed concrete structure designed using multi-material topology optimization*. **Additive Manufacturing**. Volume 81. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104012>
7. DU, Jiazheng; CONG, Xue; ZHANG, Ying. *Topology Optimization of Strength-Safe Continuum Structures Considering Random Damage*. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 136. 2023. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmcs.2023.025585>.
8. MONTEIRO, Kaike; ZHU, Carlos; SANTOS, Ana Francisca; SILVA, Luís Simões da; TANKOVA, Trayana. *Integrated topological optimization and production of an additively manufactured steel T-joint*. **Structures**. Volume 74. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108511>
9. YAN, Xin; BAO, Ding Wen; XIONG, Yulin; SNOOKS, Roland; XIE, Yi Min. *Structural topology optimisation based on a multi-agent model*. **Engineering Structures**. Volume 296. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116978>.
10. XIONG, Yulin; LU, Hongjia; YAN, Xin; HE, Yunzhen; XIE, Yi Min. Achieving diverse morphologies using three-field BESO with variable-radius filter. **Engineering Structures**. Volume 322. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119049>.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

11. ZHANG, Lei; DING, Zhe; SHA, Wei; ZHANG, Yan; XIAO, Mi; GAO, Liang; LIAO, Wei-Hsin. *Level set-based topological design of multiphase micro-architected materials*. **Materials & Design**. Volume 225. 2023. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111448.
12. LI, Zuyu; LUO, Zhen; ZHANG, Lai-Chang; WANG, Chun-Hui. *Topological design of pentamode lattice metamaterials using a ground structure method*. **Materials & Design**. Volume 202. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109523>.
13. ZHANG, Jingqi; CHEN, Yugang; ZHAI, Jingyu; HOU, Zengxuan; HAN, Qingkai. *Topological optimization on constrained layer damping treatment for vibration suppression of aircraft panels*. **Aerospace Science and Technology**. Volume 112. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106619>.
14. RAD, Majid Movahedi; HABASHNEH, Muayad; LÓGÓ, János. *Reliability based bi-directional evolutionary topology optimization of geometric and material nonlinear analysis with imperfections*. **Computers & Structures**. Volume 287. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107120>.
15. RAD, Majid Movahedi; HABASHNEH, Muayad; LÓGÓ, János. *Elasto-plastic limit analysis of reliability based geometrically nonlinear bi-directional evolutionary topology optimization*. **Structures**. Volume 34. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.105>.
16. LIN, Sen; CHOU, Nengzhuo; ZHAO, Yujia; QIN, Yangfan; JIANG, Hao; CUI, Junjia; LI, Guangyao; XIE, Yi Min. *Topological optimization of magnetic pulse welding coils with a connectivity-constrained particle swarm optimization algorithm*. **Materials & Design**. Volume 224. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111337>.
17. BROWN, Bailey; HMEIDAT, Nadim; JIA, Xiu; WILT, Jackson; ROBERTS, Michael; COMPTON, Brett G.; VERMAAK, Natasha.. *Experimental investigations of the effectiveness of simultaneous topology/orientation optimization via SOMP and principal stress directions*. **Materials & Design**. Volume 217, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110647>
18. YAN, Jun; XU, Qi; FAN, Zhirui; DUAN, Zunyi; DU, Hongze; GENG, Dongling. *Thermoelastic Structural Topology Optimization Based on Moving Morphable Components Framework*. **Engineering Structures**, 2023.
19. LI, Y. et al. Reliability-based optimization under aperiodic loads. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 128. 2021. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2021.016950>.
20. CHAWLA, Komal; HASSEN, Ahmed Arabi; GARG, Nikhil; POKKALLA, Deepak Kumar; YAO, Desheng; SMITH, Tyler; RODRIGUEZ, Brittany; WHITE, Brandon; ZHENG, X.Rayne; LEE, Ellen C.; WU, H.Felix; KIM, Seokpum. *Property optimized*

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

energy absorber for automotive bumpers utilizing multi-material and structural design strategies. **Materials & Design**. Volume 253. 2025 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113724>.

21. WANG, Lifu; SHI, Dongyan; ZHANG, Boyang; LI, Guangliang; LIU, Peng. *Real-time topology optimization based on deep learning for moving morphable components*. **Automation in Construction**. Volume 142. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104492>.
22. CHEN, Xu; YANG, Qiang; QU, Linfeng; WANG, Yingxin; WANG, Fu; LI, Dichen. *Stress-concentration reduction and mechanical performance improvement of Cf/SiC composite-to-superalloy joints by using topology optimization*. **Materials & Design**. Volume 216. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110537>.
23. TAUZOWSKI, Piotr; BLACHOWSKI, Bartłomiej; LÓGO, János. *Topology optimization of elasto-plastic structures under reliability constraints: A first order approach*. **Computers & Structures**. Volume 243. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106406>.
24. MAO, Zibin; ZHAO, Qinghai; ZHANG, Liang. *Probabilistic-Ellipsoid Hybrid Reliability Multi-Material Topology Optimization Method Based on Stress Constraint*. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 140. 2024. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2024.048016>.
25. ANNUNZIATA, Salvatore; LOMAZZI, Luca; GIGLIO, Marco; MANES, Andrea. *Topological optimization of ballistic protective structures through genetic algorithms in a vulnerability-driven environment*. **Defence Technology**. Volume 40. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.05.011>.
26. LONG, Kai; YANG, Xiaoyu; SAEED, Nouman; CHEN, Zhuo; XIE, Yi Min. *Topological Design of Microstructures of Materials Containing Multiple Phases of Distinct Poisson's Ratios*. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 126. 2020. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2021.012734>.
27. GOMES-SILVA, F; ZAERA, R.; ORTIGOSA, R.; MARTÍNEZ-FRUTOS, J. *Topology optimization of lattice structures for target band gaps with optimum volume fraction via Bloch-Floquet theory*. **Computers & Structures**. Volume 307. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107601>.
28. KOLLMANN, Hunter T.; ABUEIDDA, Diab W.; KORIC, Seid; GULERYUZ, Erman; SOBH, Nahil A. *Deep learning for topology optimization of 2D metamaterials*. **Materials & Design**. Volume 196. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109098>.
29. WANG, Lifu; SHI, Dongyan; ZHANG, Boyang; LI, Guangliang; HELAL, Wasim M.K.; QI, Mei. *Deep learning driven real time topology optimization based on improved*

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

convolutional block attention (Cba-U-Net) model. Engineering Analysis with Boundary Elements. Volume 147. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2022.11.034>.

30. LI, Xinqing; ZHAO, Qinghai; ZHANG, Hongxin; ZHANG, Tiezhu; CHEN, Jianliang. *Robust Topology Optimization of Periodic Multi-Material Functionally Graded Structures under Loading Uncertainties. Computer Modeling in Engineering and Sciences.* Volume 127. 2021. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2021.015685>.
31. CONDE, Fábio M.; COELHO, Pedro G.; GUEDES, José M. *Multi-scale topology optimization of structures with multi-material microstructures using stiffness and mass design criteria. Advances in Engineering Software.* Volume 187. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023.103566>.
32. ZUO, Wenkang; CHEN, Man-Tai; CHEN, Yangyu; ZHAO, Ou; CHENG, Bin; ZHAP, Jincheng. *Additive manufacturing oriented parametric topology optimization design and numerical analysis of steel joints in gridshell structures. Thin-Walled Structures.* Volume 188. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110817>.
33. LIN, Xing-Tao; XU, Shuhao; CHEN, Xiangsheng. *Optimization of building structures based on additive manufacturing: A review. Journal of Building Engineering.* Volume 112. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113813>.
34. HAN, Yongsheng; WNAG, Qian. *Numerical simulation of stress-based topological optimization of continuum structures under casting constraints. Engineering with Computers.* Volume 38. 2021. DOI: 10.1007/s00366-021-01512-6.
35. HAN, Haitao; GUO, Yuchen; CHEN, Shikui; LIU, Zhenyu. *Topological constraints in 2D structural topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization.* Volume 63. 2021. DOI: 10.1007/s00158-020-02771-5.
36. SHI, L. et al. *Voxel-based evolutionary topological optimization of connected structures for natural frequency optimization. Computers and Structures,* 2022.
37. CHEN, Liping; ZHANG, Hui; WUANG, Wei; QILIANG, Zhang. *Topology Optimization Based on SA-BESO. Applied Sciences.* Volume 13. 2023. DOI: 10.3390/app13074566.
38. BAO, Ding Wen; YAN, Xin; XIE, Yi Min. *Encoding topological optimisation logical structure rules into multi-agent system for architectural design and robotic fabrication. International Journal of Architectural Computing.* Volume 20. 2022. DOI: 10.1177/14780771221082257.
39. CHEN, Anbang; LIN, Xiaoshan; ZHAO, Zi-Long; XIE, Yi Min. *Layout optimization of steel reinforcement in concrete structure using a truss-continuum model. Frontiers*

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:
Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

of **Structural and Civil Engineering**. Volume 17. 2023. DOI:
<https://doi.org/10.1007/s11709-023-0963-0>.

40. TENG, Xiaoyan; LI, Qiang; JIANG, Xudong. A Smooth Bidirectional Evolutionary Structural Optimization of Vibrational Structures for Natural Frequency and Dynamic Compliance. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 135. 2022. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.023110>.
41. JIANG, Xudong; MA, Jiaqi; TENG, Xiaoyan. A Modified Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization Procedure with Variable Evolutionary Volume Ratio Applied to Multi-Objective Topology Optimization Problem. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 135. 2022. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2022.022785>.
42. HUANG, Yixing; WU, Dong; ZHANG, Kai; YANG, Haiyang; DONG Wen; CHEN, Mingji; FANG, Daining. *Topological designs of mechanical-electromagnetic integrated laminate metastructure for broadband microwave absorption based on bi-directional evolutionary optimization*. **Composites Science and Technology**. Volume 213. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108898>.
43. CRESPIANO, Emanuele; ADRIANSSESNS, Sigrid; FRADDOSIO, Aguinaldo; OLIVEIRI, Carlo; PICCIONI, Mario Daniele. *A multi-objective optimization approach for novel shell/frame systems under seismic load*. **Structures**. Volume 65. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106625>.
44. ZHANG, Heng; TAKEZAWA, Akihiro; DING, Xiaohong; XU, Shipeng; DUAN, Pengyun; LI, Hao; GUO, Honghu. *Bi-material microstructural design of biodegradable composites using topology optimization*. **Materials & Design**. Volume 209. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109973>.
45. ADAM, Abdourahamane Salifou; MRAD, Hatem; MAROUANI, Haykel; FOUAD, Yasser. *Experimental and Numerical Investigation on High-Pressure Centrifugal Pumps: Ultimate Pressure Formulation, Fatigue Life Assessment and Topological Optimization of Discharge Section*. **Computer Modeling in Engineering and Sciences**. Volume 137. 2023. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.030777>.
46. LI, Chenyang; LI, Yamin; YUAN, Shangqin; LI, Shaoying; ZHU, Jihong; ZHANG, Weihong. *Strength-based concurrent design for structural topology and building orientation of additively manufactured lattice structure*. **Chinese Journal of Aeronautics**. Volume 38. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.103373>.
47. BIBA, Nikolay; VLASOV, Andrey; KRIVENKO, Dmitry; DUZHEV, Alexey; STEBUNOV, Sergey. *Closed Die Forging Preform Shape Design Using Isothermal Surfaces Method*. **Procedia Manufacturing**. Volume 47. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.219>.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Revisão dos estudos sobre os efeitos da temperatura e da estabilidade na obtenção de hidrogênio por reforma a vapor do etanol

Josiel Coelho Gomes de Oliveira¹ (ORCID 0000-0002-7216-4296), Wagner Sade² (ORCID 0000-0001-7457-9068).

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

²(Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG)

Resumo: O hidrogênio (H_2) tem se destacado como vetor energético essencial na transição para uma economia de baixo carbono, sendo a reforma a vapor do etanol (RVE) uma rota promissora para sua produção sustentável. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática sobre os efeitos da temperatura na conversão do etanol, seletividade para H_2 , desempenho e estabilidade catalítica, bem como a influência da pressão operacional. Os resultados evidenciam que a faixa entre 550 e 650°C otimiza a conversão e seletividade para H_2 em catalisadores convencionais de níquel suportado, embora em detrimento da estabilidade de longo prazo devido à sinterização e à deposição de coque. Avanços no design catalítico, com o uso de promotores metálicos (Co, Cu, Sn) e suportes redutíveis (CeO_2 , La_2O_3), ampliaram a estabilidade em temperaturas elevadas (até 800°C), enquanto catalisadores avançados, como Co-Ni-Y e NiSn/Ce-La, possibilitaram operação eficiente em temperaturas moderadas ou baixas (350 a 450°C), com alta durabilidade e menor consumo energético. Os resultados reforçam a importância de integrar condições operacionais otimizadas e formulações catalíticas inovadoras para viabilizar a RVE em escala industrial.

Palavras-chave: catalisadores; estabilidade catalítica, seletividade.

Introdução

O H_2 é amplamente reconhecido como um vetor energético essencial para a transição rumo a uma economia de baixo carbono, devido ao seu elevado poder calorífico (120 MJ/kg), versatilidade e ausência de emissões poluentes quando utilizado em células a combustível, cujo único subproduto é a água (Meng et al., 2023; Patel et al., 2024). Inicialmente restrito a aplicações industriais, como a produção de amônia e o refino de petróleo, o hidrogênio tem tido destaque no cenário energético global, impulsionado pela necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa e diversificar a matriz energética (Chen et al., 2023; Rosha et al., 2023).

Atualmente, cerca de 90% do hidrogênio produzido mundialmente provém de fontes fósseis, principalmente pela reforma a vapor do metano (RVM), processo tecnicamente consolidado, porém intensivo em emissões de dióxido de carbono (CO_2), (Patel et al., 2024). Diante dos desafios ambientais e das metas de descarbonização, torna-se fundamental a busca por rotas de produção

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:

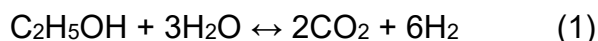


Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

de hidrogênio renováveis, capazes de associar viabilidade técnica, menor impacto ambiental e competitividade econômica (Meng et al., 2023; Chen et al., 2023).

Nesse contexto, o etanol, derivado de biomassa, desponta como uma alternativa sustentável para a produção de hidrogênio. Sua alta razão hidrogênio-carbono ($H/C = 3$), como mostrado na reação química 1, baixa toxicidade, facilidade de armazenamento e ampla disponibilidade o tornam especialmente atraente, sobretudo em países com forte vocação agrícola, como o Brasil (Chen et al., 2023; El-Salamony, 2023). Além disso, por ser obtido de fontes vegetais, o etanol possibilita um ciclo potencialmente neutro em carbono, já que o CO_2 liberado em sua conversão pode ser compensado pela absorção durante o crescimento da biomassa (Rosha et al., 2023).



Entre as rotas termoquímicas, a reforma a vapor do etanol (RVE) destaca-se por sua elevada eficiência e compatibilidade com a infraestrutura industrial existente. Trata-se de uma reação endotérmica, que tem como característica, absorver calor do meio externo é capaz de gerar até seis mols de H_2 por mol de etanol, sendo frequentemente citada como uma das alternativas mais promissoras para a produção sustentável de hidrogênio (Meng et al., 2023; El-Salamony, 2023). Além disso, a RVE permite o uso direto do bioetanol fermentado, evitando etapas adicionais de purificação que elevam os custos de outros processos (Chen et al., 2023).

A eficiência da RVE, contudo, está fortemente relacionada às condições operacionais, em especial à temperatura de reação. Temperaturas elevadas favorecem a quebra das ligações C-C e C-H, aumentando a conversão do etanol e a geração de H_2 . No entanto, também intensificam reações secundárias e promovem a deposição de carbono nos catalisadores (substância que aumenta a velocidade de uma reação química sem ser consumida permanentemente no processo), comprometendo sua estabilidade. Já temperaturas mais baixas reduzem tais efeitos, mas podem limitar a conversão e a seletividade para o hidrogênio, exigindo catalisadores de maior atividade (Chen et al., 2023; Rosha et al., 2023).

Assim, compreender a influência da temperatura na produção de hidrogênio por RVE é essencial para otimizar a eficiência do processo e viabilizar sua aplicação em escala industrial. Este artigo tem como objetivo analisar, com base em estudos recentes, os efeitos da temperatura sobre a conversão do etanol e o desempenho a estabilidade catalítica, contribuindo para o avanço de tecnologias de produção de hidrogênio renovável.

Metodologia:

O presente trabalho foi elaborado a partir de uma revisão de literatura, contemplando a análise de dados nacionais e internacionais obtidos em artigos científicos publicados. As fontes de pesquisa incluíram os bancos de dados Science Direct e Google Acadêmico, além de periódicos especializados, como International Journal of Hydrogen Energy, Fuel, Chemical Engineering Journal, Canadian Journal of Chemical Engineering, Chinese Journal of Chemical Engineering e Energy Conversion and Management. Para assegurar a atualidade das informações, foram priorizados estudos e referências publicadas a partir de 2022. Operadores booleanos (AND, OR, AND, NOT) foram utilizados para refinar as pesquisas.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Resultados e Discussão:

A seguir, são apresentados os resultados da literatura sobre a conversão do etanol em H_2 e as faixas de temperatura associadas à máxima eficiência do processo.

Efeitos da temperatura sobre a conversão de etanol

Trata-se de uma reação endotérmica que demanda suprimento contínuo de energia térmica; entre 600 e 800°C, a conversão pode atingir valores próximos de 100%, ao passo que temperaturas inferiores resultam em intermediários como acetaldeído e metano. Em condições inadequadas, reações paralelas e deposição de coque no catalisador reduzem a eficiência, tornando imprescindível o controle da temperatura para otimizar a produção e minimizar subprodutos.

Chen et al. (2023) destacam que temperaturas entre 500 e 650°C maximizam a conversão de etanol na reforma a vapor, embora valores muito elevados favoreçam a formação de CO pela reação inversa do deslocamento gás-água. Grzybek et al. (2023) observaram aumento progressivo da conversão até 600°C, faixa associada à maior seletividade para H_2 , enquanto temperaturas superiores intensificaram a desidratação do etanol, gerando subprodutos indesejados.

Liu et al. (2022) relataram conversão quase total a 650°C, atribuída à intensificação da quebra de ligações C–C e à maior produção de H_2 . Corroborando, Aker et al. (2023) obtiveram conversão completa a 600°C com catalisadores Ni-Co/ Al_2O_3 , reforçando essa faixa como ideal. Oliveira et al. (2023) mostraram que, em sistemas de reforma com captura in situ de CO_2 , temperaturas mais baixas (450 a 500°C) foram suficientes para alta conversão, devido ao deslocamento do equilíbrio termodinâmico. Bepari et al. (2022) também reportaram 97% de conversão a 550°C, confirmando a forte dependência da taxa de reação em relação à temperatura.

Shao et al. (2025) indicaram que temperaturas entre 400 e 600°C favorecem a conversão e reduzem o coque; acima de 620°C, porém, cresce o risco de sinterização e a formação de CO. Amini et al. (2025) evidenciaram o potencial de novas formulações catalíticas ao obter 91% de conversão e 100% de rendimento em H_2 a apenas 375°C com catalisadores bimetálicos Co-Ni promovidos com ítrio.

A reforma a vapor do etanol utilizando catalisadores a base de níquel (Ni) suportados em alumina (Al_2O_3) pode ocorrer no reformador em temperaturas entre 450 e 500°C e com pressões próximas de 1 atm conforme Camilo *et al*, 2017.

Por fim, Martins et al. (2025), em modelagem técnico-econômica, apontaram a faixa de 600 a 700°C como a mais eficiente para maximizar a conversão na integração da reforma a vapor em biorrefinarias de cana-de-açúcar. Os resultados reforçam que a temperatura ideal e a escolha do catalisador são determinantes para otimizar o processo, conforme mostrado na Figura 1.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

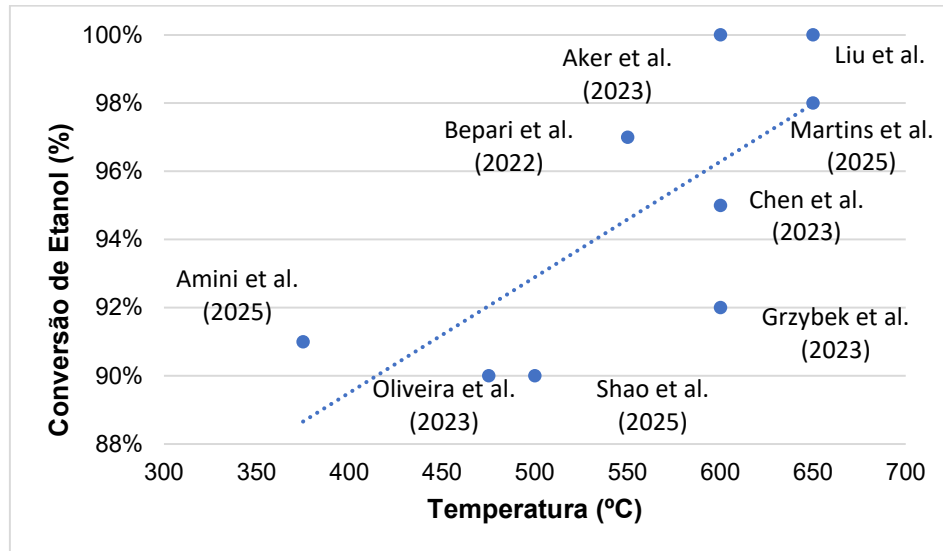


Figura 1 – Relação de temperatura e conversão de etanol, na REV.
Fonte: Autor.

Desempenho e estabilidade catalítica em função da temperatura

Yoshida et al. (2014), considerou que o desempenho catalítico pode ser compreendido como a eficiência e a eficácia de um catalisador em promover reações químicas. Em outras palavras, refere-se à capacidade do material catalítico de acelerar a reação sem ser consumido durante o processo, desempenhando papel fundamental na viabilização de diversas aplicações industriais.

A estabilidade do catalisador, por sua vez, refere-se à sua habilidade de manter atividade e seletividade ao longo do tempo, mesmo sob condições reacionais severas. Esse aspecto é particularmente crítico em processos contínuos e de longa duração, como a RVE, nos quais a desativação do catalisador por sinterização, deposição de coque ou envenenamento pode comprometer significativamente a eficiência e a viabilidade econômica da produção de hidrogênio. (YOSHIDA, 2014)

Chen et al. (2023) destacaram que temperaturas entre 500 e 650°C promovem alto desempenho catalítico e estabilidade, mas valores superiores aceleram a desativação por coque e sinterização. Resultados semelhantes foram obtidos por Liu et al. (2022), que observaram alta conversão a 650°C, embora com maior risco de acúmulo de carbono e perda estrutural (degradação física e química do material, que reduz sua atividade, seletividade e durabilidade). Essa faixa representa um compromisso entre cinética favorável e controle de desativação (conjunto de medidas que preservam a atividade e durabilidade do catalisador), exigindo estratégias como regeneração periódica ou aditivos estabilizantes.

Grzybek et al. (2023) relataram estabilidade de catalisadores ZSM-5 até 600°C, mas temperaturas maiores induziram desidratação excessiva e subprodutos. Bepari et al. (2022) confirmaram 550°C

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

como equilíbrio entre conversão e estabilidade. Aker et al. (2023) evidenciaram durabilidade por 30h a 600°C com Ni-Co/Al₂O₃, enquanto Dorofeeva et al. (2024) mostraram que Cu em Ni-LaCeOx melhorou a estabilidade a 800°C, reduzindo carbono.

A adição de promotores metálicos (Co, Cu) reforça o papel da interação metal-suporte (combinação entre as partículas metálicas ativas do catalisador e o material que as sustenta fisicamente, denominado suporte) na resistência ao coque, ampliando a faixa operacional. Oliveira et al. (2023) demonstraram que a reforma com captura de CO₂ assegura estabilidade entre 450 e 500°C. A remoção contínua de CO₂ é feita através de torres de material cerâmicos. Amini et al. (2025) relataram 91% de conversão a apenas 375 °C com Co-Ni promovidos com ítrio, sugerindo potencial para operação eficiente em baixas temperaturas.

Seriyala et al. (2024) observaram que catalisadores NiSn/Ce-La a 420°C mantiveram alta estabilidade, atribuída às vacâncias de oxigênio do óxido de cério dopado, que reduziram depósitos carbonáceos. O papel desses suportes redutíveis é central para catalisadores regeneráveis.

De forma geral, catalisadores Ni suportados (Ni/Al₂O₃) apresentam bom desempenho entre 500 e 650°C. A incorporação de promotores metálicos e suportes redutíveis amplia a estabilidade até 800°C, enquanto formulações inovadoras (Co-Ni/Y, NiSn/Ce-La) viabilizam operação em baixas temperaturas. A Figura 2 mostra a relação entre temperatura e catalisador na reforma do etanol, destacando avanços recentes em engenharia catalítica. No eixo das y das ordenadas a estabilidade do catalisador está relacionada com sua vida útil.

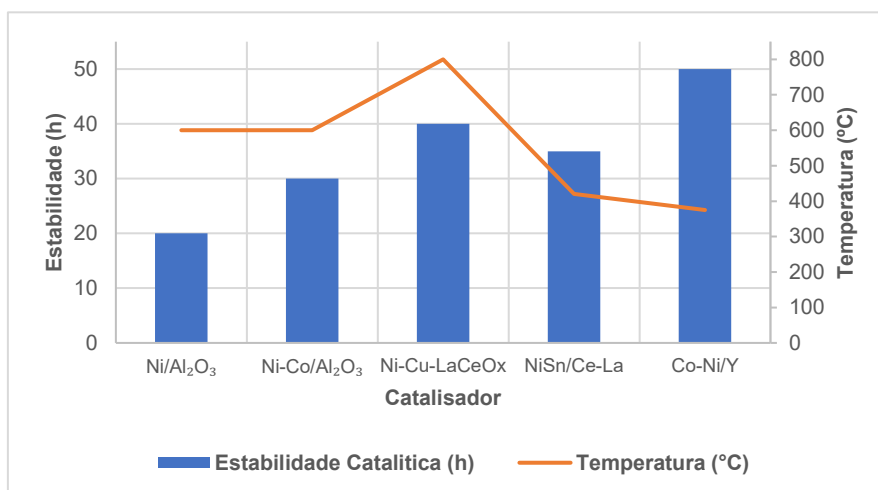


Figura 2 - Relação de temperatura e estabilidade catalítica, na REV.
Fonte: Autor.

Nos catalisadores convencionais de Ni/Al₂O₃, a faixa entre 550 e 650°C assegura altas conversões, mas com maior risco de sinterização e coque, limitando a estabilidade a cerca de 20 h. Catalisadores promovidos (Ni-Co/Al₂O₃ e Ni-Cu-LaCeOx) incorporam metais (Co, Cu) e suportes redutíveis (La-CeOx), ampliando a dispersão metálica e a resistência ao coque, possibilitando operação estável entre 700 e 800°C, com conversões próximas de 100% e durabilidade de 30 a 40 h. Já catalisadores avançados (NiSn/Ce-La e Co-Ni/Y) permitem operação entre 350 e 450°C, graças a vacâncias de oxigênio e promoção por ítrio, alcançando uma faixa de 91 a 100% de conversão e 35 a 50 h de estabilidade, conciliando eficiência energética e durabilidade. A Figura 3 apresenta a relação de temperatura para diferentes tipos de catalisadores.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

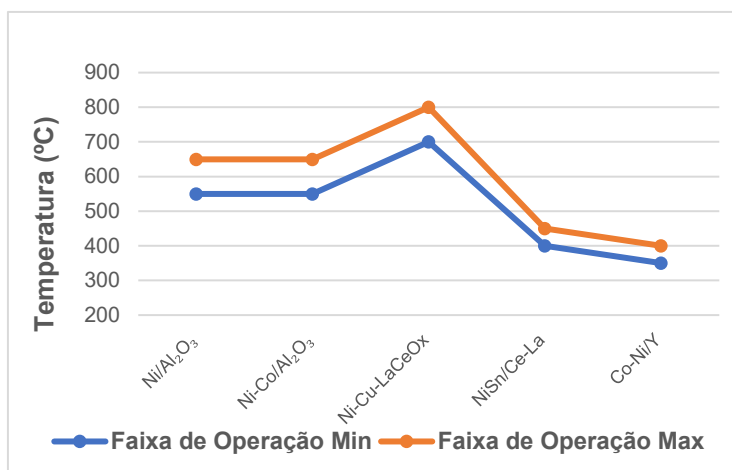


Figura 3 – Relação de temperatura para diferentes catalisadores, na REV.

Fonte: Autor.

Conclusão:

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que a temperatura foi um dos principais fatores na reforma a vapor do etanol (RVE), influenciando diretamente a conversão, a seletividade do H₂ e a estabilidade catalítica. Em catalisadores convencionais de Ni suportados em Al₂O₃, a faixa de 550 a 650°C foi a melhor, pois garantiu elevadas taxas de conversão e seletividade. Contudo, operar acima desse limite aumenta a sinterização e a deposição de coque, reduzindo a estabilidade a longo prazo.

A melhoria dos catalisadores com a adição de promotores metálicos (Co, Cu, Sn) e suportes redutíveis (CeO₂, La₂O₃) ampliou a janela operacional, mitigando mecanismos de desativação e permitindo estabilidade mesmo em temperaturas mais elevadas, até 800°C. Paralelamente, catalisadores avançados, como Co-Ni/Y e NiSn/Ce-La, possibilitaram operação em faixas mais baixas (350 a 450°C), conciliando eficiência energética e a vida útil dos catalisadores.

Quando foram combinadas as condições de baixa pressão (1 atm) e temperaturas moderadas de 450 a 650°C com a utilização de catalisadores, a cinética da reforma foi melhor, o rendimento de H₂ aumentou e os efeitos de degradação foi minimizado. Assim, a integração entre as condições operacionais otimizadas e formulações inovadoras foram essenciais para consolidar a RVE como rota sustentável e competitiva para produção de H₂.

Referências

AKER, V.; AYAS, N. Boosting hydrogen production by ethanol steam reforming over Ni-Co/Al₂O₃ catalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, p. 19892–19904, 2023.

AMINI, V.; GHARAHSIRAN, V. S.; YOUSEFPOUR, M. Hydrogen production via ethanol steam reforming over yttrium-modified Co-Ni catalysts: The role of promoter. **Heliyon**, v. 11, p. e3317, 2025.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

BEPARI, S.; SARKAR, J. J.; PRADHAN, N. C. Kinetics of ethanol steam reforming over Ni/olivine catalyst. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 8220–8234, 2022.

CAMILO, G. L., CUNHA, D. F., SILVA, F. A., Análise termodinâmica da reforma a vapor do etanol, X SEI, UTFPR, 2017.

CHEN, W.-H. et al. A critical and systematic review of sustainable hydrogen production from ethanol/bioethanol. **Fuel**, v. 333, p. 126526, 2023.

DOROFEEVA, N. V. et al. Cu-promoted Ni-LaCeOx/SBA-15 catalysts for ethanol steam reforming. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 1880–1892, 2024.

EL-SALAMONY, R. A. Catalytic steam reforming of ethanol to produce hydrogen: Modern and efficient catalyst modification strategies. **Chemistry Select**, v. 8, p. e202301234, 2023.

GRZYBEK, G. et al. Adjustment of the ZSM-5 zeolite support towards the efficient hydrogen production via ethanol steam reforming. **Fuel**, v. 332, p. 126038, 2023.

LIU, H. et al. Ni-hydrocalumite derived catalysts for ethanol steam reforming on hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, p. 7455–7466, 2022.

MARTINS, I. S. et al. Techno-economic analysis of hydrogen production in the sugarcane industry by steam reforming of ethanol with carbon capture. **Energy Conversion and Management**, v. 300, p. 118262, 2025.

OLIVEIRA, C. C. et al. Hydrogen production from sorption enhanced steam reforming of ethanol using bifunctional Ni and Ca-based catalysts doped with Mg and Al. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, p. 6770–16783, 2023.

PATEL, S. K. S. et al. Recent developments in hydrogen production, storage, and transportation: Challenges, opportunities, and perspectives. **Fire**, v. 7, p. 93, 2024.

SERIYALA, A. K. et al. Tin and lanthanum modified Ni/CeO₂ catalyst systems for low temperature steam reforming of ethanol. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 15530–15541, 2024.

SHAO, M. et al. Recent advances in the catalysts for hydrogen production via ethanol steam reforming. **Chem Cat Chem**, v. 17, p. e202500051, 2025.

YOSHIDA, H.; YAMAOKA, R.; ARAI, M. Stable hydrogen production from ethanol through steam reforming reaction over nickel-containing smectite-derived catalyst. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 16, n. 1, p. 350–362, 2014.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Seleção de Resina de Baixo Custo para Moldes Poliméricos Fabricados por Manufatura Aditiva Tipo DLP para Injeção de Termoplásticos

Thiago Van Petten de Vasconcelos¹ (0009-0009-0327-6698), Artur Caron Mottin¹ (0000-0001-6793-9926)

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

Resumo

A crescente demanda por produtos inovadores e a busca pela redução do tempo de lançamento no mercado têm impulsionado a evolução das tecnologias de design e manufatura. A tecnologia CAD/CAM e os sistemas CNC revolucionaram o processo criativo, permitindo a criação de protótipos virtuais tridimensionais e a automação da produção, especialmente para pequenos lotes e peças personalizadas. Contudo, apesar dos avanços, a injeção de termoplásticos permanece como o método dominante para a produção em larga escala. A utilização de pequenos moldes poliméricos formados por manufatura aditiva tipo DLP para a injeção de termoplásticos, visando a redução do tempo de produção e dos custos. Um desafio adicional reside no alto custo das resinas atualmente utilizadas no mercado, muitas delas importadas, impactando o custo final de aquisição. A resina BASF ULTRACUR3D® RG3280 é uma das mais utilizadas, mas com um custo elevado e composição com aproximadamente 67% de carga cerâmica. Com intuito de selecionar uma resina de baixo custo para aplicação em moldes poliméricos, fabricados por manufatura aditiva tipo DLP, para injeção de termoplásticos, visando a produção em pequenos lotes e a fabricação de protótipos, comparando-a com a resina comercial de referência. A metodologia inclui o projeto, impressão, pós-processamento, ensaios de injeção e caracterização dos materiais e peças, buscando demonstrar que a solução de baixo custo é viável.

Palavras-chave: Impressão 3D, ferramental rápido, PLA, polímeros biodegradáveis.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Introdução

A crescente demanda por produtos inovadores e a busca pela redução do tempo de lançamento no mercado têm impulsionado a evolução das tecnologias de design e manufatura. A tecnologia CAD/CAM e os sistemas CNC revolucionaram o processo criativo, permitindo a criação de protótipos virtuais tridimensionais e a automação da produção, especialmente para pequenos lotes e peças personalizadas. A Manufatura Aditiva, conhecida como impressão 3D, se destaca nesse cenário, oferecendo a liberdade de criação de geometrias complexas e a fabricação rápida de peças diretamente de modelos digitais (ABNT NBR ISO ASTM 52900, 2022).

Apesar dos avanços em tecnologias como a impressão 3D, a injeção de termoplásticos permanece como o método dominante para a produção em larga escala. No entanto, o processo de fabricação de moldes metálicos tradicionais é um gargalo, pois demanda alto custo e longo tempo de produção. O ferramental rápido, que utiliza métodos alternativos para a fabricação de moldes, surge como uma solução para essa problemática, permitindo a criação de protótipos e peças em pequenos lotes de forma mais eficiente (Harada, 2004).

Nesse contexto, propondo a utilização de pequenos moldes poliméricos formados por manufatura aditiva tipo DLP (*Digital Light Processing*) para a injeção de termoplásticos. O objetivo é reduzir o tempo de produção, os custos e o impacto ambiental, oferecendo uma alternativa mais acessível para a produção de pequenos lotes de peças e protótipos. O desafio reside no alto custo das resinas fotossensíveis utilizadas no mercado. A resina BASF ULTRACUR3D® RG3280, por exemplo, tem um custo elevado e contém aproximadamente 67% de carga cerâmica, o que impacta o custo final. O uso de carga cerâmica é um ponto de atenção, especialmente quando se busca a sustentabilidade com o uso de polímeros biodegradáveis como o Poli(Ácido Lático) (PLA) (Wiltgen; Lopes, 2022).

Diante dessa lacuna, propõe-se a seleção e avaliação da viabilidade de duas resinas comerciais alternativas de baixo custo, comparando-as com a resina de referência da BASF, buscando demonstrar que é possível reduzir os custos sem comprometer o desempenho necessário para a aplicação em pequenos lotes de injeção (Jiang *et al.*, 2023).

Metodologia

A metodologia adotada para este estudo é dividida em quatro etapas principais, buscando garantir uma abordagem rigorosa e a validação dos resultados.

1. Projeto e Fabricação de Moldes: Os moldes para injeção serão projetados em software de modelamento 3D. Serão utilizadas duas cavidades para a injeção de peças, uma com um corpo de prova cilíndrico e outra com um corpo de prova tipo halter, de acordo com as normas ASTM D638 e ASTM D790. Serão impressos três moldes: um com a resina de referência BASF ULTRACUR3D® RG3280 e outros dois com resinas de menor custo e sem carga cerâmica. O processo de impressão utilizará a tecnologia DLP devido à sua alta velocidade, precisão e acabamento superficial.

2. Pós-processamento e Condicionamento: Após a impressão, os moldes passarão por um processo de pós-processamento, que inclui a limpeza para remoção de resina não curada e o pós-cura em câmara UV para otimizar as propriedades mecânicas e a estabilidade dimensional.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Um tratamento térmico adicional em estufa será aplicado para aumentar a rigidez e a dureza da resina. Para melhorar as propriedades tribológicas e a durabilidade, os moldes serão submetidos a um banho de óleo de silicone (Calgaham, 2021).

3. Injeção e Avaliação da Durabilidade: A injeção será realizada em uma injetora de bancada com dois tipos de PLA: um PLA virgem (sem corante) e um PLA-B (com masterbatch de urucum). Serão realizados ciclos de injeção até a falha do molde, que será caracterizada pela perda de qualidade dimensional da peça injetada. Os ciclos de injeção serão realizados dentro dos mesmos parâmetros que o feito no molde metálico e ao realizado com a resina de referência, dessa forma, os parâmetros de avaliação ficam congelados e dentro de um mesmo padrão e abordagem. (Pagnan, 2018).

4. Caracterização das Peças Injetadas: As peças injetadas serão submetidas a uma série de ensaios e análises para caracterização e comparação. Os ensaios mecânicos incluirão Tração (ASTM D638) e Flexão (ASTM D790) para determinar a resistência das peças. Análises físico-químicas serão realizadas para compreender a composição e as propriedades térmicas e morfológicas, incluindo:

- MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura): Para analisar a morfologia da superfície e da fratura das peças (ASTM D638:14).

Resultados e Discussão

Esse trabalho visará demonstrar a viabilidade das resinas de baixo custo para a fabricação de moldes poliméricos por DLP. A análise dos dados irá comparar a vida útil dos moldes (número de ciclos de injeção) e a qualidade dimensional e mecânica das peças injetadas com cada uma das resinas. A caracterização físico-química e morfológica fornecerá uma compreensão profunda do comportamento do material e da influência do molde na qualidade do produto final.

Conclusão

A pesquisa visa fornecer evidências claras de que a fabricação de moldes poliméricos por DLP, utilizando resinas de baixo custo e sem carga cerâmica, é uma alternativa promissora e economicamente viável. A validação dessas novas resinas expandirá o uso do ferramental rápido para a produção de peças plásticas em pequena escala, protótipos funcionais e peças de reposição. Essa abordagem não apenas democratiza o acesso a uma tecnologia de produção avançada, mas também contribuirá para um processo de manufatura mais sustentável, especialmente com a injeção de polímeros biodegradáveis como o PLA. Os resultados deste estudo podem servir como um guia prático para a seleção de materiais e otimização de processos, impulsionando a inovação na indústria e oferecendo novas oportunidades para a produção local e personalizada (Wiltgen; Lopes, 2022).

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Referências

ABNT NBR ISO ASTM 52900. **Manufatura Aditiva - Princípios Gerais - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2022.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista Ciências Exatas**, v. 24, n. 2, p.12-20, 2018.

CHALGHAM, A. Investigation of Mechanical Properties of DLP Printed Parts with Varying Post-Curing Conditions. 2021. Tese (Mestrado em Engenharia).

CALGAHAM, A. Influence of UV Post-Curing on Mechanical Properties of DLP 3D Printed Resins. 2021. Tese (Mestrado em Engenharia).

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos**. São Paulo: Artliber, 2004.

JIANG, T. et al. Study of Forming Performance and Characterization of DLP 3D Printed Parts. **Materials**, v. 16, n. 10, p. 3847, 2023.

PAGNAN, C. S. Percepção dos usuários frente a produtos fabricados via impressão 3D em PLA colorido com masterbatch de urucum (Bixa Orellana L.). 2018. 157 f. **Tese (Doutorado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2018.

WILTGEN, F.; LOPES, M. Manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa. **RETEC**, Ourinhos, v. 15, n. 1, p. 45-63, jan./jun. 2022.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFET-MINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Simulação e experimento de fabricação de peças por estampagem incremental de chapas para moldes de rotomoldagem

Henrique Rodrigues Braga¹ (0009-0001-6848-4932), João Marinho² (0009-0004-9484-2205), Tiago Fraga² (0009-0009-3769-2374), Yukio Shigaki² (0000-0003-0962-3573), Jânes Landre Jr. (0000-0001-6640-3601)¹

1 Centro de Usinagem PUC MG, PPGEM, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

2 Laboratório de Simulação Numérica, DEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo

Baseando-se nos altos custos da confecção de moldes empregados no processo de rotomoldagem, que são fabricados comumente por usinagem, fundição e/ou estampagem convencional, e também na dificuldade de se obter detalhes precisos nesses componentes por conformação, este trabalho estuda o emprego da técnica de estampagem incremental de ponto único (SPIF) na fabricação de moldes para rotomoldagem. Por não depender de matrizes como na estampagem convencional, a SPIF é uma técnica de conformação de chapas consideravelmente barata e versátil, principalmente para a produção de poucas peças ou de prototipagem. Para o entendimento da viabilidade desse método, foi proposta a fabricação de um molde real de um produto rotomoldado, que foi dividido em partes fabricáveis por estampagem incremental. Definiu-se uma liga de aço IF (Interstitial Free) para a produção prática, e paralelamente, elaborou-se um modelo de simulação por elementos finitos do processo de fabricação. O experimento prático resultou em uma peça completa e bem acabada, comprovando a viabilidade e versatilidade do SPIF. Por outro lado, os resultados parciais da simulação não concordaram com o modelo real, o que provavelmente se deve à não conformidade das configurações e parâmetros aplicados. O trabalho de simulação, que em princípio deveria nortear a fabricação, ainda está em desenvolvimento. Em um contexto geral, a SPIF é claramente um promissor complemento às técnicas tradicionais de fabricação de moldes e espera-se que contribua efetivamente para a redução de custos na fabricação de moldes para rotomoldagem.

Palavras-chave: Estampagem incremental de chapas; Single point incremental forming (SPIF); fabricação de moldes para rotomoldagem; Simufact.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

1 Introdução

A rotomoldagem é um método de fabricação de suma importância na indústria, e um dos principais desafios dessa técnica é lidar com os altos custos dos moldes usados, que são geralmente fabricados por usinagem, fundição e estampagem convencional de chapas, sendo esta última geralmente a opção de melhor relação custo/ benefício. (POLICENA, 2022).

Visando a diminuição do custo desses moldes, este trabalho propõe o uso da técnica de estampagem incremental de ponto único (*Single Point Incremental Forming* - SPIF) em chapas metálicas para a fabricação destes moldes. A SPIF baseia-se em conformar uma chapa através do contato em um único ponto de uma ferramenta que percorre uma trajetória referente a face de uma peça, incrementando aos poucos a profundidade dessa geometria. (VIEIRA, 2015).

A SPIF se caracteriza principalmente pela prototipagem rápida e pelo baixo custo na fabricação de pequenos lotes de peças, pois dispensa o uso das tradicionais matrizes presentes no processo de estampagem convencional, não há desperdício de material como nos processos de usinagem e envolve um baixo gasto de energia em comparação com a fabricação de fundidos. Entretanto, a SPIF tem desafios como: a restrição na geometria da peça a ser fabricada, que precisa necessariamente ter um formato cônico; precisão dimensional devido ao retorno elástico; acabamento superficial, entre outros fatores limitantes (POPP et al., 2024; CUNHA, 2023; SCHREIBER, 2022).

1.1 Objetivo

A estampagem incremental é uma tecnologia relativamente recente e ainda pouco empregada na indústria, assim sendo, este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade desse processo na fabricação de moldes para rotomoldagem. Para tal, propõe-se a fabricação de um produto real, um molde de um tanque comercial de um equipamento agrícola, avaliando por meio de simulações numéricas, experimentos práticos e pesquisa bibliográfica algumas variáveis dessa técnica, como a viabilidade de diferentes materiais, parâmetros de fabricação como velocidade, incremento e rotação da ferramenta e também o desenvolvimento da metodologia da confecção deste produto.

2 Metodologia

2.1 Divisão do molde em partes fabricáveis

Baseado nas limitações geométricas referentes à técnica de SPIF, o primeiro passo é a análise do desenho do objeto a ser produzido e a sua divisão em partes fabricáveis com o auxílio de um software de desenho, levando em consideração o ângulo máximo de parede em relação ao plano inicial da chapa, e então o seccionamento dessas partes como ilustra a Figura 01.

2.3 Preparação da trajetória da ferramenta

Proveniente dos modelos de cada parte já seccionada, ainda no ambiente do software de desenho, são elaboradas, geometrias negativas às superfícies das peças, como mostra a Figura 02(a). A partir desses modelos tridimensionais, em um software CAM (*Computer Aided Manufacturing*), a trajetória da ferramenta é preparada usando a operação de fresamento por

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

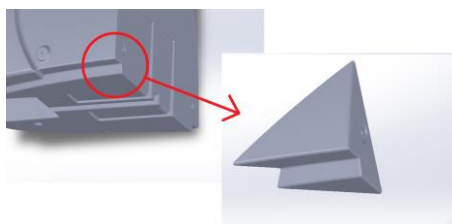
CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

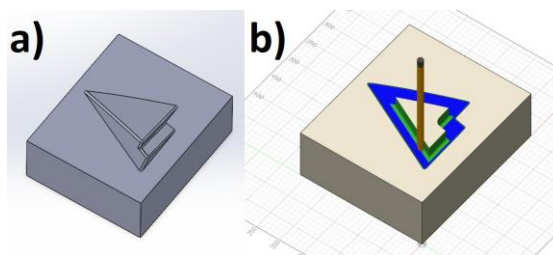
contorno. Nessa etapa, parâmetros importantes foram definidos, sendo: ferramenta de ponta semi esférica de 6 mm de raio; velocidade da estampagem de 750 mm/min; rotação da ferramenta em 60 rpm; incremento de 0,3 mm em forma helicoidal. A Figura 02(b) exibe a interface do software CAM durante a elaboração de uma trajetória de ferramenta.

Figura 01: Exemplo de parte seccionada do objeto original.



Fonte: Autor

Figura 02: Preparação da trajetória da ferramenta



Fonte: Autor

O software CAM a partir da trajetória traçada fornece um arquivo do tipo *G-code*, que é usado para configurar a análise no software FEM (*Finite Element Method*), além de ser responsável por controlar a fresadora CNC na fabricação real da peça.

2.4 Simulação por FEM

O *Simufact Forming* foi o software adotado para a simulação numérica. No ambiente do software foram usadas as configurações citadas na seção anterior, além dos seguintes itens:

- Material: Aço USI-IF (limite de escoamento de 180 MPa, módulo de Young de 205 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e densidade de 7800 kg/m³)
- Coeficiente de atrito entre ferramenta e chapa: 0,1
- Tamanho do elemento de malha inicial: 4 mm
- Número de elementos ao longo da espessura: 1
- Critério de remalha: deformação do elemento igual a 100%

A fim de prever a falha do material, foram incorporadas às propriedades do material a curva

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFET-MINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

limite de conformação (CLC) obtida a partir de dados experimentais de uma chapa laminada a frio conforme a norma TIS 50-2548 do trabalho de KESVARAKUL e LIMPADAPUN (2019).

2.5 Experimento prático

A fabricação prática do componente foi executada em uma fresadora CNC, com as mesmas configurações citadas na simulação numérica e usando os parâmetros definidos na seção 2.3. Óleo lubrificante ISO VG 68 foi utilizado para reduzir o atrito entre a ferramenta e a chapa. A Figura 03 mostra o processo de fabricação.

Figura 03: Fabricação prática da peça

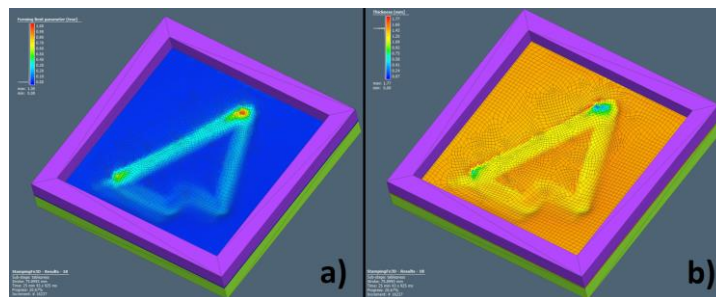


Fonte: Autor

3 Resultados e Discussão

Os resultados parciais da simulação numérica são apresentados nas formas de parâmetro limite de conformação, Figura 04(a) e no mapa de espessura, Figura 04(b).

Figura 04: Resultados parciais da simulação por FEM



Fonte: autor

Nota-se a ocorrência de falha localizada em uma região indicada pelas cores vermelha e amarela na Figura 04(a). Embora a simulação tenha indicado a ocorrência de falha do material e regiões com redução crítica de espessura, esses resultados não foram observados no experimento prático, como mostra a Figura 03. Essa divergência pode ser explicada por uma combinação de fatores relacionados às limitações do modelo numérico e as características reais do processo de estampagem incremental, exigindo, ainda, seu aperfeiçoamento.

4 Conclusão

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

As configurações usadas na simulação por FEM precisam ser melhor compreendidas para a concordância com o experimento prático e, conseqüentemente, apoie a compreensão dos fenômenos dessa técnica de fabricação.

Apesar do estudo estar em andamento, conclui-se que o processo SPIF é altamente funcional e de baixo custo, porém fatores como a limitação geométrica podem dificultar a fabricação de componentes de formatos específicos devido aos posteriores processos de corte e união necessários. Sendo assim, essa técnica pode ser usada como um complemento poderoso aos tradicionais métodos de confecção de moldes para rotomoldagem.

5 Agradecimentos

Agradecemos à Fapemig e ao CNPq pela concessão de bolsas de iniciação científica para os estudantes de graduação Tiago Henrique Fraga e João Vítor Marinho e Silva, respectivamente, e à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – Fundep, Rota 2030 – Linha IV pelo financiamento do projeto “Melhorias no projeto, fabricação e montagem de moldes de tanques rotomoldados”, aprovado na Chamada Pública PD&I 01/2022, linha IV – Ferramentarias Brasileiras Mais Competitivas.

Referências

CUNHA, João Victor Marzinetti. *Influência dos parâmetros de estampagem incremental na microestrutura e propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex AISI 2205 e austenítico AISI 304*. 2023. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

FREITAS, Leandro Gonçalves de. *Estudo do campo de tensão e deformação em uma chapa fina durante o seu processo de conformação por estampagem incremental de ponto simples*. 2021. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

KESVARAKUL, Ramil; LIMPADAPUN, Khompee. Comparison of predicted forming limit curves with measured experimental data on hot-dip zinc-coated cold-rolled steel by incremental forming process. **Key Engineering Materials**, v. 821, p. 256–262, 2019.

RODRIGUES POLICENA, M.; ANDREIS POSSER, J. E. . *Estudo dos processos de rotomoldagem e injeção na fabricação de produtos poliméricos termoplásticos*. **Revista Liberato**, [S. l.], v. 23, n. 40, p. 149–164, 2022.

POPP, Gabriela-Petruța; RACZ, Sever-Gabriel; BREAZ, Radu-Eugen; OLEKSIK, Valentin Ștefan; POPP, Mihai-Octavian; MORAR, Dana-Elena; CHICEA, Anca-Lucia; POPP, Ilie-Octavian. *State of the Art in Incremental Forming: Process Variants, Tooling, Industrial Applications for Complex Part Manufacturing and Sustainability of the Process*. **Materials**, v. 17, n. 23, p. 5811, 2024.

SCHREIBER, Rafael Gustavo; MONDO, Lucas Santos Savi; TEIXEIRA, Andrison Rodrigues; DALEFFE, Anderson; SCHAEFFER, Lírio. *Predicting maximum force in SPIF for different materials*. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 27, n. 4, 2022.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

Simulação termo hidráulica dos impactos da adição de hidrogênio nas condições de fluxo de um sistema de distribuição de gás natural

Fabricio Geraldo Silva Barros¹, Prof. Dr. José Leônicio Fonseca de Souza²
(0000-0003-2319-0540)

1,2 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, CEFET-MG

Resumo: O hidrogênio é um vetor energético crucial para a descarbonização da economia. No Brasil, a extensa rede de distribuição de gás natural (cerca de 40.000 km) representa uma oportunidade única para uma transição sustentável, evitando investimentos robustos em nova infraestrutura. No entanto, a mistura de hidrogênio ao gás natural em dutos projetados para este último altera parâmetros operacionais fundamentais, como pressão e vazão, impactando diretamente o potencial de entrega de energia do sistema. Através da modelagem e simulação no software Flownex, é possível analisar os efeitos de diferentes percentuais de mistura na operação da rede. Os resultados poderão mostrar a necessidade de adequações específicas para garantir a eficiência e segurança no transporte de energia por meio dessa nova mistura.

Palavras-chave: Mistura, Escoamento, Gasodutos.

Introdução:

Com o aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, principalmente dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), constituindo a principal causa das mudanças climáticas. Sendo esses gases emitidos principalmente pela queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) para geração de energia, transporte, indústria e aquecimento, tornou-se necessária mundialmente uma transição das fontes energéticas atuais para fontes menos poluentes. A transição energética dá-se ao processo de mudança de um sistema energético baseado hoje principalmente em combustíveis fósseis para um sistema baseado em fontes de energia renovável e sustentável (como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa). Esse processo visa principalmente reduzir as emissões de gases de efeito estufa (EXAME, 2023; ONU, 2023).

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

A inserção gradual de hidrogênio em redes existentes de gás natural tem se mostrado uma estratégia promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO_2), sem demandar alterações estruturais imediatas na infraestrutura de transporte e distribuição. De acordo com Cristello et al. (2023), misturas de até 30% de hidrogênio podem ser implementadas em gasodutos convencionais, resultando em reduções de aproximadamente 36,3% nas emissões de CO_2 associadas ao uso energético do gás, mesmo considerando o emprego de hidrogênio azul produzido por reforma a vapor do metano com captura e armazenamento de carbono (Steam Methane Reforming – SMR + Carbon Capture and Storage – CCS). Essa abordagem representa uma solução intermediária tecnicamente viável e economicamente atrativa no contexto da transição energética, permitindo o aproveitamento das redes atuais enquanto se avança para o uso futuro de hidrogênio puro. Além disso, a substituição parcial do metano por hidrogênio contribui diretamente para a mitigação das emissões de combustão, uma vez que o hidrogênio não gera CO_2 durante sua oxidação, reforçando o papel estratégico dessa tecnologia na descarbonização do setor energético e no cumprimento de metas globais de neutralidade climática.

A injeção de hidrogênio em gasodutos é um processo recente e inovador com o objetivo de reduzir as emissões de carbono e aproveitar a infraestrutura existente para facilitar e antecipar a transição energética para uma economia de hidrogênio. Diversos países possuem projetos regulamentados e em operação com mistura de hidrogênio e gás natural em seus dutos. A utilização da infraestrutura de gasodutos de gás natural representa uma economia considerável de custos, visto que não há necessidade da construção de novos dutos. Construir novas redes de distribuição dedicadas exclusivamente ao hidrogênio seria extremamente dispendioso e demorado. Ao injetar hidrogênio nos gasodutos atuais, pode-se fazer uso imediato e eficiente dessas infraestruturas, evitando gastos adicionais massivos. Este reaproveitamento também facilita uma transição mais rápida e eficiente, permitindo que o hidrogênio seja integrado ao sistema energético sem a necessidade de grandes modificações nas redes de distribuição e no comportamento dos consumidores. No Brasil, a injeção compulsória do hidrogênio nas redes de gás é o conceito central do PL 725/2022, de autoria do ex-senador Jean Paul Prates (PT/RN). A Lei do Hidrogênio ainda em tramitação prevê que, até 2032, seja adicionado o percentual mínimo de 5% de hidrogênio na rede de gasodutos — e uma injeção de 10% até 2050. (EPBR,2022).

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

A rede de distribuição de gás natural é um sistema complexo e altamente integrado, composto por diversos equipamentos que garantem a entrega segura e eficiente do gás natural aos consumidores. Desde os robustos gasodutos de transporte até os sofisticados sistemas de monitoramento e dispositivos de segurança, cada componente desempenha um papel crucial na manutenção da integridade da rede e na segurança do fornecimento de gás. A compreensão e a manutenção adequada desses equipamentos são essenciais para garantir a continuidade do serviço e a proteção dos usuários e do meio ambiente. Entre os diversos equipamentos do sistema de distribuição destacam-se as estações de redução e controle de pressão, as estações componentes essenciais no sistema de distribuição de gás natural. Elas desempenham um papel para garantir que o gás seja entregue com segurança e eficiência desde as linhas de transporte até os consumidores finais. A operação dessas estações envolve a redução da pressão do gás transportado em alta pressão para níveis seguros e padronizados. (SIVINI,2006)

Com essas estações nos sistemas, a injeção de hidrogênio pode influenciar seu funcionamento e parâmetros de controle de pressão e vazão. A menor densidade volumétrica do hidrogênio implica que, para uma mesma massa, o volume de hidrogênio é maior que o volume de metano. Isso significa que, ao injetar hidrogênio em um sistema projetado para gás natural, a pressão interna pode ser alterada. A relação entre pressão e densidade no fluxo de gás pode resultar em variações de pressão, consequentemente, diferença na capacidade de entrega de energia ao consumidor final (GUANDALINI et al., 2017).

O entendimento do comportamento da injeção de hidrogênio é importante porque permite a adaptação dos sistemas de distribuição de gás natural para acomodar as propriedades únicas do hidrogênio. A integração de hidrogênio em redes existentes de gás natural apresenta desafios entre as oportunidades de descarbonização e questões técnicas. A transição para sistemas energéticos de baixo carbono mediante a injeção de hidrogênio em gasodutos existentes de gás natural apresenta-se como uma estratégia viável, porém complexa, que demanda considerações técnicas e operacionais cuidadosas, conforme demonstrado pelos estudos. Os trabalhos de Mahajan et al. (2022) no projeto HyDeploy comprovaram que misturas contendo 15-20% de hidrogênio representam o ponto ótimo entre benefícios ambientais e viabilidade técnica, permitindo reduções significativas nas emissões de CO₂ sem exigir modificações estruturais radicais na infraestrutura existente.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

O presente estudo tem como objetivo estudar o comportamento termo-hidráulico de um sistema de distribuição de gás natural, avaliando os efeitos da inserção de hidrogênio como fonte complementar de energia em diferentes percentuais de mistura. Busca-se compreender como a adição progressiva de hidrogênio afeta as características do escoamento, em especial propriedades como densidade, compressibilidade, velocidade e perda de carga, fundamentais para a segurança e eficiência operacional do sistema. Entre os objetivos específicos, destaca-se a análise do impacto da concentração de hidrogênio sobre a eficiência do transporte e o desempenho energético dos gasodutos, bem como a avaliação dos modelos matemáticos e correlações disponíveis no software de simulação empregado, de modo a selecionar os métodos mais adequados para representar com precisão as condições reais de operação. Dessa forma, o estudo pretende contribuir para o avanço do conhecimento sobre a viabilidade técnica da mistura de hidrogênio em redes de gás natural, fornecendo subsídios para futuras aplicações industriais e acadêmicas.

Metodologia:

O estudo propõe a modelagem computacional do escoamento em um sistema de distribuição de gás natural, utilizando o software Flownex® Simulation Environment (SE). A metodologia é dividida nas seguintes etapas:

1 **Fundamentação do Modelo Matemático:** O núcleo da metodologia é a solução numérica das equações de conservação fundamentais da dinâmica dos fluidos e da transferência de calor para escoamento unidimensional. As equações governantes implementadas e resolvidas pelo Flownex são: Conservação de Massa: Para regime permanente e transiente. Conservação de Momento: Inclui termos para gradiente de pressão, gravidade e atrito viscoso (calculado pelo fator de atrito de Colebrook-White). A formulação é adaptada para escoamento compressível usando pressão e temperatura de estagnação. Conservação de Energia: Resolvida em termos da entalpia específica de estagnação, considerando trocas de calor com o exterior.

2. **Construção do Modelo Computacional:** Geometria do Sistema: O modelo representará a rede de dutos do sistema da GASMIG (Gasoduto Vale do Aço), incluindo suas três linhas tronco principais com seus respectivos diâmetros, comprimentos e materiais. Propriedades do Fluido e Condições de Contorno: Fluido: Gás natural, com suas propriedades definidas (densidade relativa, viscosidade). Equação de Estado: Condições de Contorno: Pressão de entrada (entre 33 e 38

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS



Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

kgf/cm²), temperatura do gás (22,7°C) e temperatura ambiente (22,08°C). Rugosidade do Duto: Estimada com base em dados técnicos, considerando um aumento anual devido ao envelhecimento. Regime: A simulação será em regime transiente.

3. Validação do Modelo: Esta é uma etapa crucial para garantir a precisão do modelo. Os resultados das simulações (pressão, vazão, temperatura) serão comparados com dados reais coletados do sistema físico da GASMIG. Os dados reais serão obtidos por meio de instrumentos certificados: medidores de pressão, medidores de vazão e termopares. A validação usará métricas estatísticas (como erro percentual e coeficiente de determinação R²) para quantificar a aderência do modelo à realidade. Se necessário, o modelo será calibrado mediante ajuste de parâmetros (como coeficientes de atrito) para melhorar a concordância com os dados medidos.

4. Simulação de Cenários com Mistura de Hidrogênio: Após a validação para o gás natural “puro”, a metodologia prevê a análise de sensibilidade com a inserção de misturas de hidrogênio. Com base em pesquisas de referência, diferentes proporções de hidrogênio serão adicionadas ao gás natural no modelo. O impacto dessas variações na pressão, vazão, velocidade e temperatura do escoamento será analisado para identificar possíveis desafios operacionais. Ferramenta: Todo o processo de modelagem, simulação e análise será realizado no ambiente integrado do software Flownex® SE.

Referências:

EXAME. **Aquecimento Global: o que é, causas, efeitos, consequências.** Disponível em: <https://exame.com>. Acesso em: 22 jun. 2024.

ONU. **Combate às Mudanças Climáticas.** Disponível em: <https://www.un.org>. Acesso em: 22 jun. 2024.

EPBR. **Injeção de hidrogênio na rede em debate no Brasil.** Disponível em: <https://epbr.com.br/europa-prepara-malha-de-gasodutos-para-chegada-do-hidrogenio/>. Acesso em: 22 jun. 2024.

SIVINI, P. G. L. **Desenvolvimento de banco de dados de confiabilidade: uma aplicação em estações redutoras de pressão de gás natural**, 2006.

III SiPGEM

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

Realização:

Apoio:



DEM
Departamento de
Engenharia
Mecânica
CEFET-MG

FCM
FUNDAÇÃO
CEFETMINAS

CEFET-MG

Local:

Campus Nova Gameleira - CEFET-MG

GUANDALINI, G.; COLBERTALDO, P.; CAMPANARI, S. Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections. **Applied Energy**, 2017.

MAHAJAN, D. et al. Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. **Energies**, v. 15, n. 10, p. 3582, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15103582>. Acesso em 17 Jun. 2025

CRISTELLO, J. B.; YANG, J. M.; HUGO, R.; LEE, Y.; PARK, S. S. Feasibility analysis of blending hydrogen into natural gas networks. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, p. 17605–17629, 2023. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.01.156](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.156). Acesso em 15 Out. 2025.

Editoração e Projeto Gráfico
Artur Caron Mottin