



IV CONGRESSO PPGMEC

20
24

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PPGMEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

EMC

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



UFG
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE GOIÁS

Anais do IV PPGMEC-2024 - IV Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (UFG). Goiânia, Goiás, 03-06 de dezembro de 2024

Copyright©2021 by Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás

ISBN (impresso/e-book): 978-85-94498-32-8

Organizador: João Paulo da Silva Fonseca

Revisores: Amanda Albertin Xavier da Silva, Andreia Aoyagui Nascimento, Aristeu da Silveira Neto, Daniel Fernandes da Cunha, Daniel Souza, Demostenes Ferreira Filho, Diogo Appel Colvero, Felipe Pamplona Mariano, Fernanda Christina Teotonio Dias Troysi, Gino Bertolucci Colherinhas, João Paulo da Silva Fonseca, João Paulo da Silva Fonseca, Marlipe Garcia Fagundes Neto, Rodrigo Pinto Lemos, Salviano de Araújo Leão, Zenón José Guzmán Del Prado.

Editores: João Paulo da Silva Fonseca, Leonardo Guerra de Rezende Guedes, Henrique Moura Martins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP

F72 **FONSECA, João Paulo da Silva.**

Ana Anais do IV PPGMEC-2024

IV Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás.

Goiânia, Ed., 2021. E-book, in color, 266.

ISBN (impresso): 978-85-94498-32-8

1. Engenharia. 2. Mecânica 3. Física Aplicada

CDU: 621.3, 621.38, 530



Índice para catálogo sistemático: CDD 620, 530

DIREITOS RESERVADOS aos Organizadores desta obra: É proibida a reprodução total ou parcial da obra, de qualquer forma ou por qualquer meio, sem a autorização prévia e por escrito do autor. A violação dos Direitos Autorais (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

London 7 Editora e Serviços® - London Sim Gestão de Documentos Ltda

Prefixo Editorial: 67929 - contato@london7.com.br, www.london7.com.br

Goiânia, 2024

Sinopse

Esta é a publicação dos Anais do 4º Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás. Vinte e um textos com diferentes abordagens compõem os Anais. O evento contou com a participação de 53 inscritos e 21 artigos científicos apresentados em sessões técnicas, fortalecendo um dos principais objetivos traçados desde a primeira edição do congresso, que é aumentar a interação entre os discentes do programa, estudantes de graduação que desenvolvem trabalhos de iniciação científica, pesquisadores de instituições externas à UFG, bem como facilitar a divulgação dos trabalhos em andamento entre os diferentes grupos de pesquisa, potencializando a disseminação dos conhecimentos que estão sendo desenvolvidos no âmbito das Ciências Mecânicas na região de Goiânia, GO.

Apresentação

O 4º Congresso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás (PPGMEC/UFG) consolida este evento dentro de uma agenda anual, oportunizando aos participantes um momento propício para divulgação e discussão a respeito das pesquisas em desenvolvimento e tendências futuras no âmbito da Engenharia Mecânica. Com uma temática voltada aos relevantes assuntos de sustentabilidade e energias renováveis, os congressistas tiveram a oportunidade de apresentar suas pesquisas, discutir resultados e metodologias com outros participantes, ouvir palestrantes experientes e renomados no Brasil e no exterior, desenvolver suas habilidades em minicursos pensados especificamente para o perfil dos graduandos e pós-graduandos em engenharia da UFG e de Goiás, além de fortalecer suas vivências com a pesquisa científica, tecnológica e de inovação, expandindo suas fronteiras do conhecimento e seu networking para parcerias no futuro.

Esta quarta edição contou com a participação de 53 inscritos e quatro conferencistas convidados, provenientes da Universidade de Aveiro, em Portugal, Universidade de Brasília, Universidade Federal de Santa Catarina e do Grupo Stellantis Brasil. Além das sessões técnicas, nas quais foram apresentados 21 artigos científicos, os congressistas tiveram a grata oportunidade de acompanhar três palestras com temáticas essenciais para a formação de qualquer pesquisador: “O contributo dos materiais residuais no mix de energias renováveis - o caso de Portugal”, proferida pela Prof^a. Dr^a. Ana Paula Duarte Gomes (Universidade Aveiro, Portugal); “Fretting fatigue: tests and numerical modeling”, proferida pelo Prof. Dr. José Alexander Araújo (UnB); e “Avanços e oportunidades de pesquisa em CFD aplicada ao setor automotivo”, proferida pelo Prof. Me. Bruno Garkauskas Neto (Stellantis Brasil).

O evento também oportunizou três excelentes minicursos focados no desenvolvimento científico e tecnológico dos congressistas: “O potencial energético dos resíduos e a produção de biometano”, ministrado pela Prof^a. Dr^a. Ana Paula Duarte Gomes (Universidade Aveiro, Portugal); “Redação de patentes de dispositivos mecânicos” ministrado pelo Prof. Dr. Estevan

Hideki Murai (UFSC); e “Introdução à análise bibliométrica utilizando a ferramenta Bibliometrix”, ministrado pela Prof^a. Dr^a. Fernanda Christina Teotônio Dias Troysi (UFG) e pelo estudante de mestrado, Cristiano Faria de Oliveira (PPGMEC-UFG).

Por fim, a 4^a edição do Congresso do PPGMEC também foi palco do tradicional Simpósio de Autoavaliação do PPGMEC, onde os grupos de trabalho se reuniram para compartilhar os resultados alcançados ao longo do ano de 2024 e do quadriênio 2021-2024, com vistas ao planejamento estratégico do PPGMEC e preenchimento do Módulo Coleta da Plataforma Sucupira pela Coordenação do Programa, previsto para os meses de janeiro e fevereiro de 2025, cujas informações serão utilizadas pela CAPES durante o processo de Avaliação dos cursos/programas integrantes do Sistema Nacional de Pós-Graduação (SNPG).

A Comissão Organizadora agradece à comunidade que atendeu ao evento, contribuindo com trabalhos relevantes e de valoroso conteúdo técnico e científico. Agradecemos à imprescindível contribuição dos revisores voluntários, os quais atenderam prontamente ao convite dessa comissão para avaliarem os trabalhos submetidos. Agradecemos aos voluntários discentes, cuja contribuição foi fundamental na operacionalização do evento, aos servidores Técnicos Administrativos que contribuíram de diversas formas para o sucesso do evento, em especial à secretaria da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG (EMC-UFG), e ao apoio institucional da Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da direção da EMC-UFG e da Pró-reitoria de Pós-Graduação.

Por fim, agradecemos copiosamente à FAPEG e à FUNAPE pelos aportes financeiros concedidos, por meio de Editais públicos, para a realização deste evento. Tais contribuições foram fundamentais para a execução e sucesso do 4º Congresso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFG.

Goiânia, dezembro de 2024.

Comissão Organizadora

SUMÁRIO

REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A USINAGEM DE AÇO DA CLASSE 450 DA NORMA USI AR POR PROCESSOS DE ELETROEROSÃO (EDM E WEDM)	8
O BIODIESEL COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL EM GOIÁS: PANORAMA E PROJEÇÕES FUTURAS	19
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SETORES AGROINDUSTRIAL, DE TRANSPORTE, FARMACÊUTICO, AUTOMOBILÍSTICO E DE MINERAÇÃO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO	33
INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE ESTENDIDA NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE UM PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA).....	46
ANÁLISE DA PERDA TRANSMISSÃO EM SILENCIADORES DE GERADORES COM MÉTODO DAS DUAS CARGAS: PLOTAGEM DE CURVAS ACÚSTICAS DE RESPOSTA E APLICAÇÃO DE FILTROS EM BANDAS DE OITAVA E 1/3 DE OITAVA E PASSA BAIXA.....	60
REVISÃO SISTEMÁTICA: METODOLOGIAS DE PROJETO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE <i>MUFFLERS</i> EM GERADORES DIESEL: FOCO NA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA E TÉCNICAS DE VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	77
ESCOAMENTO EM TORNO DE UM ROTOR “S” ESTÁTICO E 2D, UTILIZANDO OS MÉTODOS DE FRONTEIRA IMERSA E PSEUDOSPECTRAL DE FOURIER	92
METODOLOGIA PARA PARAMETRIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DUROS SOLDADOS PELO PROCESSO FCAW	102
A IMPORTÂNCIA DE UMA METODOLOGIA ASSERTIVA PARA A ELABORAÇÃO DE UM MAPA DE RISCOS PARA AMBIENTES LABORATORIAIS DE UMA UNIVERSIDADE	113

AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE PRÉ-FORMAS DE AÇO INOX SUPER DUPLEX FABRICADAS POR MADA UTILIZANDO RESFRIAMENTO POR QUASE IMERSÃO	126
DESENVOLVIMENTO DE DOMÍNIO EM PDDL PARA PLANEJAMENTO AUTOMATIZADO E REPROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS	140
ESTUDO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE REGRESSÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DA PEEP PARA UM PROTÓTIPO DE VENTILADOR MECÂNICO PULMONAR	156
SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ESCOAMENTOS EM CAVIDADE COM TAMPA DESLIZANTE UTILIZANDO O SOFTWARE OPENFOAM	170
COMPARAÇÃO ENERGÉTICA E DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA ENTRE OS COMBUSTÍVEIS METANO E HIDROGÊNIO	184
UMA METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PROBLEMAS ESTÁTICOS UTILIZANDO TÉCNICA DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	197
ENERGIA RENOVÁVEL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AO SANEAMENTO BÁSICO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA DOS PRINCIPAIS MÉTODOS E TECNOLOGIAS	210
PERSPECTIVAS DO CENÁRIO DE IMPRESSÃO 3D NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	223
ANÁLISE MODAL DE MODELOS EM ESCALA DE TURBINAS EÓLICAS.....	235
ANÁLISE DINÂMICA DE RODA GIGANTE PROJETADA COM OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO (PPGMEC 2024).....	250

REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A USINAGEM DE AÇO DA CLASSE 450 DA NORMA USI AR POR PROCESSOS DE ELETROEROSÃO (EDM E WEDM)

Aires P. Junior¹, Lucca C. G. de Mateus¹, Daniel F. da Cunha¹

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG) Av. Esperança, s/n, Prédio 5B - Campus Samambaia, 74690-900, Goiânia/Goiás, Brasil, airespedro@discente.ufg.br, luccamateus@discente.ufg.br, danielcunha@ufg.br

Resumo. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a usinagem de aços resistentes ao desgaste da norma USI AR utilizando processos de eletroerosão (EDM e WEDM). Foram analisados 7 artigos selecionados em bases de dados científicas, abordando diferentes aspectos dos processos de eletroerosão. Os principais resultados indicam que os parâmetros de processo, como corrente elétrica e tempo de pulso, influenciam significativamente a taxa de remoção de material, a rugosidade superficial e a integridade microestrutural da superfície. O aço de especificação USI AR 400 apresentou melhor desempenho em termos de MRR, enquanto o de especificação USI AR 500, devido à sua elevada dureza, apresentou maior resistência à usinagem, sendo mais suscetível a defeitos superficiais. Conclui-se que a otimização dos parâmetros de processo é fundamental para maximizar a eficiência e a qualidade da usinagem por eletroerosão dos aços desta linha, mas desafios como a formação de camadas de ressolidificação endurecidas e a presença de microtrincas ainda precisam ser abordados em estudos futuros, já que há uma lacuna muito grande nesse tema, especialmente em relação a pesquisas utilizando aços da classe 450.

Palavras-chave: EDM. WEDM. Hardox. Ravur. USI AR.

INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica está constantemente evoluindo, criando soluções para atender as diversas necessidades do mercado. Dentro dessas necessidades, o mercado busca aços resistentes a abrasão e altos impactos mecânicos utilizados em máquinas para terraplenagem, implementos agrícolas e rodoviários, vasos de pressão, plataformas marítimas, chassis, blindagem de veículos militares etc. Para isso, foi criado o aço de alta resistência, baixa liga, resistente ao desgaste, com classes que variam de 400, 450, 500 HBW, entre outros, conforme especificação da norma USI AR. No Brasil, as marcas mais conhecidas que fabricam os aços da

norma USI AR, são a SSAB (empresa que fabrica a chapa Hardox, a mais popular internacionalmente) e Usiminas (empresa que fabrica a chapa Ravur) (USIMINAS, 2020).

A relevância desta pesquisa está na crescente demanda por materiais resistentes ao desgaste, particularmente em setores como mineração, automotivo e de construção civil. O uso de aços Ravur/Hardox em componentes críticos desses campos vem aumentando, devido às suas propriedades superiores de resistência e durabilidade. Entretanto, a usinagem deste tipo de material apresenta desafios significativos, especialmente em termos de acabamento superficial e taxa de remoção de material, aspectos que podem ser otimizados através do processo de eletroerosão.

O processo de eletroerosão, ou Electrical Discharge Machining (EDM), é uma técnica de usinagem não convencional amplamente utilizada para materiais de elevada dureza e difícil usinabilidade. Este processo remove material da peça de trabalho através de descargas elétricas entre o eletrodo e a peça, submersos em um fluido dielétrico. Uma variação importante desse processo é a Wire Electrical Discharge Machining (WEDM), que utiliza um fio como eletrodo, possibilitando cortes precisos e detalhados, mesmo em geometrias complexas. A eletroerosão é eficaz para aços de alta dureza, pois permite usinagem sem a necessidade de contato direto, evitando o desgaste mecânico de ferramentas de corte (MOURALOVA et al., 2019; ALTUĞ, 2019; MOTEVASSELI et al., 2020).

Neste contexto, este trabalho visa realizar uma revisão abrangente de estudos científicos que analisam o desempenho do processo de eletroerosão em diferentes tipos de aço Ravur/Hardox. A análise dos parâmetros de usinagem e suas influências nas características do material são essenciais para compreender como otimizar o processo, minimizando defeitos e maximizando a eficiência do processamento do material.

DESENVOLVIMENTO

Linha de aços Ravur

Existem diferentes tipos de aços Ravur, classificados principalmente pela sua dureza e características específicas, sendo os mais comuns: Ravur 400, Ravur 450 e Ravur 500, cujas propriedades estão expressas na Tab. 1. O aço de classe 400 apresenta dureza na faixa de 370 a 440 HBW e é utilizado em aplicações como caçambas de escavadeiras e lâminas de corte devido à sua alta resistência à abrasão e boa usinabilidade. Já o aço de classe 450 oferece uma dureza levemente superior, combinada com boa resistência ao impacto, sendo utilizado em aplicações que requerem uma maior durabilidade, como peças de equipamentos de mineração. Por fim, o aço de classe 500, que possui uma dureza ainda maior, é aplicado em situações que exigem extrema resistência ao desgaste, como em trituradoras e máquinas de processamento de sucata (MOURALOVA et al., 2019; SZALA et al., 2019; USIMINAS, 2020).

Tabela 1. Dados sobre os três principais aços da linha USI AR. (adaptada de USIMINAS, 2020)

Aço	Grau	Dureza (HRB)	Composição química (% em massa)							
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
USI AR	400	360-440	≤ 0,19		≤ 1,40			-	0,40	-
	450	410-490	≤ 0,25	≤ 0,70	≤ 1,50	0,025	0,010	0,20	0,40	-
	500	450-550	≤ 0,29		≤ 1,20			0,70	0,70	0,40

Nesta investigação, buscou-se investigar o aço da classe 450 HBW (Ravur 450), da marca Ravur Wear Steels que é amplamente reconhecido por sua alta resistência ao desgaste e elevada dureza, sendo utilizado em aplicações que exigem materiais com excelente desempenho sob condições de abrasão e impacto. Desenvolvido pela empresa brasileira Usiminas, este aço pertence à categoria dos aços de alta resistência, sendo composto predominantemente por uma estrutura martensítica, o que garante suas propriedades mecânicas excepcionais (USIMINAS, 2020).

Eletroerosão: Aplicações em Materiais de Alta Resistência ao Desgaste

A eletroerosão é amplamente reconhecida como uma tecnologia eficaz para a usinagem de materiais de alta dureza. Em relação a usinagem de aços resistentes ao desgaste, estudos recentes exploraram a aplicação desse processo em Hardox 400 e 500, equivalentes da norma USI AR, com destaque para a influência de parâmetros como corrente de descarga, tempo de pulso e velocidade do fio sobre a taxa de remoção de material, rugosidade superficial e formação de defeitos (MOURALOVA et al., 2019; KALAVATHI; BHUYAN, 2018). Esses parâmetros demonstraram ser cruciais para equilibrar produtividade e qualidade do acabamento superficial, evidenciando a complexidade de otimizar o processo para materiais com diferentes propriedades e composição.

O Hardox 400, devido à sua menor dureza, apresenta melhor usinabilidade e estabilidade durante o processo de eletroerosão, com menor formação de defeitos superficiais, conforme evidenciado por Mouralova et al. (2019). Por outro lado, para os aços de maior dureza, como o Hardox 500, Kalavathi e Bhuyan (2018) apontaram que este material apresenta maior suscetibilidade a microtrincas e rugosidade superficial elevada, especialmente em condições de alta energia de descarga, exigindo ajustes precisos nos parâmetros de usinagem para minimizar defeitos.

Assim, sugere-se que a microestrutura do material desempenha um papel essencial no desempenho da eletroerosão, embora ainda pouco compreendido. Altuğ (2019) investigou o impacto de tratamentos térmicos na usinagem de aço equivalente ao USI AR 400, observando que o revenimento a 200 °C resultou em melhor rugosidade superficial, enquanto o revenimento a 300 °C proporcionou maior taxa de remoção de material, evidenciando o impacto da microestrutura alterada pelos tratamentos térmicos.

Estado Atual e Perspectivas

Atualmente, os estudos indicam um consenso sobre a eficácia da eletroerosão para a usinagem de aços da linha USI AR, especialmente na classe 400, devido à sua boa resposta aos

parâmetros de processo, com maior estabilidade da usinagem. Por outro lado, o de classe 500 apresenta desafios adicionais devido à sua dureza elevada, como a formação de defeitos na forma de microtrincas e camadas refundidas.

No entanto, a ausência de investigações sobre o aço de classe 450 limita o entendimento de seu comportamento na eletroerosão. Estudos futuros são necessários para explorar seu potencial como uma solução intermediária entre as outras duas opções comerciais, balanceando dureza e usinabilidade.

METODOLOGIA

Para a elaboração desta revisão bibliográfica, foi realizada uma busca sistemática em duas bases de dados acadêmicas: Periódicos Capes e Google Acadêmico. O objetivo foi identificar artigos relevantes sobre o processo de eletroerosão (*Electrical Discharge Machining* - EDM) aplicados aos principais aços da norma USI AR, incluindo tanto a eletroerosão por penetração (EDM) quanto a eletroerosão a fio (WEDM). A busca foi conduzida utilizando a combinação de palavras-chave: "Hardox" AND ("EDM" OR "WEDM"). Optou-se por buscar pela palavra-chave "Hardox" já que é o termo comercial internacionalmente mais conhecido e que foi possível conseguir resultados de busca. A pesquisa foi realizada no dia 08 de novembro de 2024, e os seguintes resultados foram obtidos:

- Periódicos Capes: A busca retornou um total de 7 artigos. Destes, foram selecionados 4 artigos que apresentaram alta relevância e adequação ao tema proposto.
- Google Acadêmico: Foram encontrados 243 resultados utilizando o mesmo conjunto de palavras-chave. Após uma análise inicial dos títulos e resumos, foram selecionados 3 artigos que atendiam aos critérios de inclusão, evitando duplicatas e focando na relevância para o tema.

Um total de 7 artigos foi incluído nesta revisão, sendo 4 do Periódicos Capes e 3 do Google Acadêmico. A análise dos estudos foi realizada utilizando uma abordagem mista, combinando uma análise qualitativa das informações teóricas e metodológicas dos artigos

com uma análise quantitativa dos dados experimentais apresentados nas pesquisas. Percebe-se a carência de estudos neste tema pela pequena quantidade de artigos encontrados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos artigos revisados nesta pesquisa revelou informações importantes sobre o desempenho e a aplicação dos processos de eletroerosão (EDM e WEDM) na usinagem dos aços USI AR. Embora a série USI AR inclua o tipo 450, não foi encontrado nenhum estudo que analisou especificamente este tipo, sendo encontrados artigos abordando apenas as classes 400 e 500, o que representa uma lacuna significativa na literatura científica. A seguir, são discutidos os principais achados de cada estudo.

Altug (2019) – Investigation of Hardox 400 Steel Exposed to Heat Treatment Processes in WEDM

Altug (2019) investigou o impacto de diferentes tratamentos térmicos na usinagem do Hardox 400 por WEDM. Os experimentos mostraram que a microestrutura resultante dos diferentes processos de revenido influenciou diretamente a rugosidade superficial (R_a) e a largura de corte ($kerf$). A têmpera gerou alta dureza devido à formação de martensita, enquanto o revenimento reduziu a dureza e aumentou a fase α -ferrítica, melhorando a condutividade entre o eletrodo e a peça. As menores larguras de corte ($kerf$) foram obtidas nas amostras com menor dureza, favorecendo a precisão. A melhor rugosidade superficial foi alcançada com revenimento a 200 °C, e a maior taxa de remoção de material ocorreu com revenimento a 300 °C. O estudo conclui que a microestrutura alterada pelos tratamentos térmicos influencia diretamente a eficiência do WEDM, com a dureza e a condutividade sendo os fatores mais determinantes.

Mouralova et al. (2019) – The Influence of WEDM Parameters Setup on the Occurrence of Defects When Machining Hardox 400 Steel

Mouralova et al. (2019) exploraram os defeitos que surgem durante a usinagem do Hardox 400 por WEDM. Utilizando um experimento com design de superfície de resposta, os

autores investigaram o impacto de parâmetros como tempo de repouso (T-off), corrente e velocidade do fio. Os resultados mostraram que a alta corrente e um T-off reduzido aumentaram a formação de cavidades e microtrincas. A análise microestrutural indicou que esses defeitos estão associados à rápida solidificação da camada fundida, criando tensões residuais. O estudo concluiu que a otimização dos parâmetros de processo pode reduzir significativamente esses defeitos, melhorando a qualidade da superfície.

Kalavathi e Bhuyan (2018) – Optimization of Process Parameters in WEDM Process on Two Workpieces of Materials Hardox 400 and Hardox 500

Kalavathi e Bhuyan (2018) conduziram um estudo comparativo utilizando WEDM em Hardox 400 e Hardox 500, variando o tempo de pulso ligado (115 a 130 μ s), tempo de pulso desligado (48 a 60 μ s), corrente de pico (11 e 12 A) e taxa de alimentação do fio (WF). Os resultados mostraram que o Hardox 400 apresentou uma usinagem mais estável e previsível, enquanto o Hardox 500 foi mais suscetível a uma maior rugosidade superficial, microfissuras e zonas afetadas pelo calo. Para otimizar o processo, os autores utilizaram o método Taguchi. A análise ANOVA indicou que a corrente e o tempo de pulso ligado foram os fatores mais significativos, influenciando diretamente a MRR e a rugosidade superficial. Além disso, os gráficos de efeitos principais indicaram que os níveis ótimos para maximizar a MRR foram atingidos com altos valores de T-on e corrente, e baixos valores de T-off, o que é esperado devido ao aumento da energia de descarga nessa condição de usinagem.

Motevasseli et al. (2020) – Investigation of Parameters Affecting Surface Integrity and Material Removal during Electrical Discharge Machining of HARDOX-400 Steel

O estudo de Motevasseli et al. (2020) focou na usinagem do Hardox 400 utilizando EDM convencional, analisando parâmetros como corrente elétrica (5, 10 e 15 A) e tempo de pulso (50-12 μ s, 100-25 μ s e 200-50 μ s). Os autores observaram que o aumento da corrente resultou em uma maior taxa de remoção de material (MRR), porém, a integridade da superfície foi prejudicada, com o surgimento de microtrincas e uma espessa "white layer". Esta camada é

formada devido a ressolidificação do material removido, apresentando alta dureza, mas sendo suscetível a falhas devido à presença de tensões residuais. O estudo concluiu que a combinação de baixa corrente e curto tempo de pulso é essencial para minimizar esses defeitos, especialmente em aplicações que exigem alta qualidade de acabamento superficial. Além disso, o desgaste do eletrodo e a rugosidade aumentaram com o aumento da corrente e do tempo de pulso

Szala et al. (2019) – Abrasion Resistance of S235, S355, C45, AISI 304 and Hardox 500 Steels with Usage of Garnet, Corundum and Carborundum Abrasives

O estudo de Szala et al. (2019) avaliou a resistência ao desgaste do Hardox 500 em comparação com outros aços, utilizando abrasivos como granada, alumina e carbeto de silício. Embora não tenha se focado diretamente no processo de EDM, o artigo fornece uma visão valiosa sobre a resistência do Hardox 500 à abrasão, que impacta diretamente sua usinabilidade. O Hardox 500 demonstrou excelente resistência ao desgaste, mas essa mesma característica resulta em maiores desafios de usinagem. O estudo sugere que a dureza aumentada do Hardox 500 pode levar a uma maior formação de defeitos superficiais durante o corte. O estudo concluiu que o Hardox 500 é indicado para aplicações onde o desgaste por abrasivos mais macios (como granada) é predominante, mas apresenta rendimento inferior com o abrasivo de alumina.

Altug (2019) – Investigation of Machinability of Welded Jointed Hardox Steel in WEDM

Neste segundo estudo, Altuğ (2019) investigou a usinagem de chapas de Hardox 400 soldadas por plasma e MAG, utilizando WEDM. Foram analisados parâmetros como largura de corte (*kerf*) e rugosidade superficial nas zonas afetadas pelo calor (HAZ) e na zona de fusão (WM). O método de soldagem influenciou significativamente a microestrutura e, consequentemente, a usinabilidade na eletroerosão. A soldagem por plasma com menor amperagem apresentou melhor desempenho em termos de menor largura de corte (*Kerf*), enquanto a soldagem MAG mostrou-se mais eficaz para obter menores valores de rugosidade

superficial. Esse artigo é uma boa fonte de dados sobre como as características microestruturais, dureza e condutividade elétrica da peça de trabalho influenciam nos parâmetros de usinagem a serem utilizados.

Kumar et al. (2017) – Optimization of Process Parameters Using WEDM Process

Kumar et al. (2017) aplicaram métodos estatísticos, como Taguchi e ANOVA, para otimizar os parâmetros de usinagem do Hardox 400 e 500 por WEDM. Os autores investigaram o impacto da corrente de pico, tempo de pulso e taxa de alimentação do fio na taxa de remoção de material (MRR). A MRR aumentou com o aumento do tempo de pulso ligado e da corrente de pico. No estudo, os parâmetros ótimos encontrados para maximizar a MRR foram o nível mais alto de corrente de pico (12 A), o maior tempo de pulso ligado testado (130 μ s), o menor tempo de pulso desligado testado (48 μ s) e o nível mais alto de velocidade de avanço do fio. O Hardox 500 apresentou maiores desafios devido à sua dureza, exigindo ajustes precisos para minimizar defeitos superficiais. Os autores ressaltam que uma alta taxa de remoção de material e um bom acabamento superficial nunca podem ser alcançados simultaneamente no processo de eletroerosão.

CONCLUSÕES

Os estudos analisados sobre a usinagem de aços resistentes ao desgaste classe 400 e 500 análogos à linha Ravur por EDM e WEDM evidenciaram diferenças significativas no comportamento de cada material e na influência dos parâmetros de usinagem. Em geral, a classe 400 apresentou uma usinagem mais estável e previsível, com melhores resultados de MRR e menores defeitos superficiais, enquanto o de grau 500, devido à sua maior dureza e resistência, mostrou maiores desafios, especialmente na formação de microtrincas e na rugosidade e integridade da superfície.

O aço com um menor valor de dureza favorece a precisão e a estabilidade do processo, e altas correntes e tempos de repouso curtos aumentam a formação de defeitos superficiais

devido à rápida solidificação e tensões residuais. Altos valores de corrente e tempo de pulso ligado maximizaram a MRR, mas também aumentam os defeitos superficiais e o desgaste do eletrodo, o que mostra a necessidade de um equilíbrio cuidadoso entre produtividade, qualidade do acabamento e custo com ferramenta.

Sendo assim, sugere-se que o aço Ravur 450, um intermediário entre as classes 400 e 500, apresente um comportamento no processo de usinagem proporcional aos observados nesta revisão. Provavelmente exibirá uma taxa de remoção de material ligeiramente menor que a do grau 400, mas com menos formação de microtrincas e menor espessura de ressolidificação em comparação ao de classe 500. Espera-se que ele possa oferecer um bom balanço entre resistência ao desgaste e facilidade de corte, sendo uma opção promissora para aplicações que exigem tanto alta resistência quanto boa usinabilidade.

Os parâmetros de usinagem para o processo de EDM entre os artigos variaram entre 5 e 15 A como corrente, 50 a 200 μ s como tempo de pulso ligado e 12 a 50 μ s como tempo de pulso desligado, utilizando polaridade positiva no eletrodo. Já para o processo de WEDM, os parâmetros variaram para a corrente de 4 a 35 A, tempo de pulso ligado de 30 a 400 μ s e alimentação do fio de 4 a 14 m/min. Essa grande variação vem das diferenças entre os diâmetros de eletrodo utilizados e particularidades de cada ensaio. Estes parâmetros servirão de base para trabalhos futuros que serão realizados com amostras de Ravur 450, de forma a preencher a lacuna de pesquisa que foi identificada utilizando esta classe de material.

Agradecimentos. Os autores agradecem à Universidade Federal de Goiás (UFG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) pelo apoio institucional e pelas oportunidades de pesquisa oferecidas ao longo do mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTUŽ, M. Investigation of Hardox 400 steel exposed to heat treatment processes in WEDM. Politeknik Dergisi, v. 22, n. 1, p. 237-244, 2019.

- ALTUĞ, M. Investigation of machinability of welded jointed Hardox steel in WEDM. Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering, v. 20, n. 1, p. 92-103, 2019.
- KALAVATHI, V.; BHUYAN, R. K. Optimization of process parameters in WEDM process on two workpieces of materials Hardox-400 and Hardox-500. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), v. 8, n. 4, p. 71-82, 2018.
- KUMAR, J. A.; RAVURI, V. S. L.; REDDY, M. V. K. Optimization of process parameters using WEDM process. International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR), v. 4, n. 5, p. 44-50, 2017.
- MOTEVASSELI, H.; AFSARI, A.; KHOSRAVIFARD, A. Investigation of parameters affecting surface integrity and material removal during electrical discharge machining of Hardox-400 steel. Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production, v. 9, n. 2, p. 73-84, 2020.
- MOURALOVA, K.; PROKES, T.; BENES, L.; BEDNAR, J. The influence of WEDM parameters setup on the occurrence of defects when machining Hardox 400 steel. Materials, v. 12, n. 22, p. 3758, 2019.
- SZALA, M.; SZAFRAN, M.; MACEK, W.; MARCHENKO, S.; HEJWOWSKI, T. Abrasion resistance of S235, S355, Č45, AISI 304 and Hardox 500 steels with usage of garnet, corundum and carborundum abrasives. Advances in Science and Technology Research Journal, v. 13, n. 4, p. 151-161, 2019.
- USIMINAS. Chapas Grossas. Belo Horizonte: Usiminas, 2020. Disponível em: https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2020/01/CAT.-CHAPAS-GROSSAS-PORT_v3-1.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616434>

O BIODIESEL COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL EM GOIÁS: PANORAMA E PROJEÇÕES FUTURAS

**Diogo A. Colvero^{1*}, Frank Willis S. Sena², José Carlos M. Ramalho³, Ana Paula D. Gomes³, Rodrigo C. Silveira⁴
e Glaucilene D. Carvalho⁴.**

*¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.
Alameda Ingá, quadra B, bloco 5, s/n - Chácara Califórnia, 74690-900, Goiânia/GO, Brasil.
diogocolvero@ufg.br*

*²Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.
Avenida Universitária, Quadra 86- Setor Leste Universitário, 74605-220, Goiânia/GO, Brasil.
frankwillisambiental@discente.ufg.br*

*³Universidade de Aveiro –Portugal.
Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal.
jc_ramalho@hotmail.com, pgomes@ua.pt*

*⁴Secretaria-Geral de Governo do Estado de Goiás.
Praça Cívica - R. 82, 400 - 5º andar Ala Leste - St. Central, Goiânia - GO, 74015-908
rodrigo.silveira@goias.gov.br, glaucilene.carvalho@goias.gov.br*

Resumo. A preocupação com as questões ambientais e a previsão da futura escassez dos combustíveis fósseis tem desafiado a humanidade a buscar novas fontes de energia. Neste panorama, o biodiesel tem conquistado destaque no Brasil, apresentando-se como uma fonte renovável e menos poluente do que o diesel fóssil. Sendo que um dos estados brasileiros que tem se destacado na produção desse biocombustível é Goiás. Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar o cenário atual da produção de biodiesel goiano, apresentando a capacidade instalada, as principais matérias-primas usadas e as projeções futuras de produção deste biocombustível para o estado. Para isso, foi aplicada uma metodologia de avaliação bibliométrica para obter os principais estudos, dados e relatórios de fontes especializadas. Além disso, para estimar as projeções futuras do biodiesel em Goiás, foram definidos três cenários. Os resultados obtidos apontam que Goiás deve ampliar sua capacidade de produção instalada nos próximos seis anos para atender a crescente demanda futura por biodiesel no estado. Estima-se também, que em 2045 Goiás deverá produzir 4,5 milhões de m³ de biodiesel, ampliando sua produção em 380% em comparação com o ano de 2023.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Estado de Goiás, Brasil. Descarbonização. Cenários do biodiesel.

INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis são a principal fonte energética brasileira, representando 35,1% de toda a energia consumida no país (EPE, 2024a). Embora sejam amplamente utilizados em todo o Brasil, esses combustíveis não renováveis provocam impactos ambientais, pois

produzem uma alta carga de Gases de Efeito Estufa – GEE durante a sua combustão. Além disso, são recursos finitos, o que exige a busca por alternativas. Assim, surgiu a demanda mundial por estudos que visassem a gradual substituição por combustíveis renováveis (Saravanan, Pugazhendhi, Mathimani, 2020).

Neste sentido, o Brasil foi um dos países que ganhou destaque global na produção de biocombustíveis, sendo visto pela comunidade internacional como um caso de sucesso. O principal fator atribuído a esse sucesso está na criação de políticas públicas que regulamentam o uso destes biocombustíveis, como é o caso do biodiesel (Saravanan, Pugazhendhi, Mathimani, 2020). O biodiesel, além de biodegradável, é economicamente viável, o que o torna uma excelente alternativa aos combustíveis fósseis (Malabadi et al., 2023).

Em termos de políticas públicas, a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), no final de 2004, definiu um novo patamar para a produção deste combustível renovável em todo o país. Sendo que, a partir da promulgação de leis federais, definiu-se a substituição obrigatória de percentuais do petrodiesel por biodiesel, já em 2005 (Saravanan, Pugazhendhi, Mathimani, 2020). Diante disso, o estado de Goiás, por sua elevada capacidade agrícola, aliado a políticas públicas de incentivo aos biocombustíveis, passou a ter lugar de destaque no cenário brasileiro de produção de biodiesel. Tanto que, atualmente é o terceiro maior produtor nacional de biodiesel, com quase 1,2 milhões de m³ produzidos em 2023 (ANP, 2024).

Desta forma, o objetivo deste estudo foi fornecer um panorama atual sobre o biodiesel goiano, mostrando as principais matérias-primas, a capacidade instalada de produção e as projeções futuras deste biocombustível para o estado. Análises estas realizadas levando em consideração as mais recentes atualizações legais sobre o biodiesel.

DESENVOLVIMENTO

Panorama do biodiesel em Goiás

O estado de Goiás possui um relevante potencial econômico no setor de biodiesel, fato que pode ser corroborado pelo crescimento do mercado de combustível renovável e pelas políticas que incentivam a produção de biocombustíveis no país (Rodrigues, 2021). Este cenário de incentivo ao biodiesel estimula o aumento na produção deste biocombustível (Rodrigues, 2021). Destaca-se ainda que, uma política de apoio à produção e uso de combustíveis alternativos está alinhada às tendências globais de minimização das emissões e da promoção de fontes de energia renováveis. Panorama este que tem papel importante na viabilidade econômica da produção de biodiesel em Goiás e no país (Julio et al., 2021; Penteado, 2005).

Dados do Painel Dinâmico Matéria-Prima, da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, apontam que, assim como já ocorre no Brasil, Goiás tem como principal fonte para a produção do biodiesel o óleo de soja, representando cerca de 67% de toda a matéria-prima usada na produção. Seguido de 17,5% de outros materiais graxos (que se referem à mistura de matérias-primas tradicionais em tanque e reprocessamento de subprodutos gerados na produção de biodiesel), de 7,1% de gordura bovina e de 6,7% de outras fontes que incluem as gorduras de frango e porco, óleos de milho e algodão e, também, o óleo de fritura usado (ANP, 2023).

Produção de biodiesel em Goiás

Goiás vem ampliando sua produção do biodiesel ao longo do tempo. Conforme dados da ANP (2024), em 2014, o estado produziu 0,643 milhões de m³ de biodiesel. Já em 2023 a produção estadual foi de 1,184 milhões de m³, um crescimento de 83,8% no período. Este percentual de crescimento é menor do que o observado no cenário nacional no mesmo período, que foi de 120%. Em termos globais isso significa um decréscimo na fatia de produção

do biodiesel de Goiás em relação ao cenário nacional. Enquanto em 2014 Goiás produziu 18,8% do biodiesel brasileiro, em 2023 este percentual caiu para 15,7%.

Apesar de ter crescido em menor velocidade que a média nacional, a relevância do mercado do biodiesel em Goiás fica evidenciada pelos importantes polos de produção deste combustível no estado. Segundo BiodieselBR (2024), as usinas de biodiesel são estratégicas na produção deste biocombustível no estado, além de contribuírem com a matriz energética brasileira. Conforme dados obtidos no portal da ANP, Goiás conta com oito unidades produtoras de biodiesel. Sendo que, estas usinas estão situadas nos seguintes municípios: Anápolis, Formosa, Ipameri, Palmeiras de Goiás, Porangatu, Rio Verde, São Miguel do Araguaia e São Simão. Na Tab. 1 está apresentada a evolução anual da produção de biodiesel em Goiás, desde 2014.

Tabela 1: Produção de biodiesel¹ (B100) em Goiás entre 2014 e 2023

Produção de Biodiesel (B100) – (em milhões de m³) – Goiás										Crescimento: 2014 a 2023 (%)
Ano										
2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
0,644	0,695	0,650	0,717	0,758	0,865	0,878	0,964	1,104	1,184	83,85

¹Biodiesel (B100), especificado conforme a Resolução ANP n.º 920/2023.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em ANP (2024)

Capacidade instalada de produção de biodiesel em Goiás

Das oito unidades instaladas e autorizadas pela ANP para a produção de biodiesel em Goiás, a usina situada no município goiano de Porangatu possui a maior capacidade produtiva do estado, com 1.800 m³/dia (0,657 milhões de m³/ano). Este quantitativo representa 32,6% do potencial de produção deste biocombustível no estado, que atualmente é de 2,0183 milhões de m³/ano. Na Tab. 2 estão apresentadas a capacidade instalada de produção, por município, bem como a capacidade total instalada no estado.

Tabela 2: Capacidade instalada de produção de biodiesel¹ (B100), por município produtor do estado de Goiás – 2023

Município	Capacidade Instalada (milhões m³/ano)	Município	Capacidade Instalada (milhões m³/ano)
Anápolis	0,341	Porangatu	0,657
Formosa	0,237	Rio Verde	0,219
Ipameri	0,228	São Miguel do Araguaia	0,035
Palmeiras de Goiás	0,073	São Simão	0,228
Capacidade total instalada – Goiás:		2,0183 milhões de m³/ano	
¹ Biodiesel (B100), especificado conforme a Resolução ANP n.º 920/2023.			

Fonte: Elaborado pelos autores com base em ANP (2024)

METODOLOGIA

Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliométrica, para identificar estudos sobre o biodiesel no estado de Goiás. Esta análise foi feita nas bases de dados da *Scopus* e *Web of Science*, de modo a restringir estudos dos últimos cinco anos e inserindo as seguintes palavras-chaves: *biodiesel*, *state of the art*, *state of Goias*. Entretanto as bases retro citadas não retornaram nenhum resultado para a pesquisa, evidenciando a lacuna existente sobre a temática em Goiás. Desta forma, buscaram-se dados e informações em relatórios, anuários e bases de dados abertos das agências governamentais responsáveis por acompanhar o setor produtor de biodiesel brasileiro.

Na sequência, para a projeção da demanda futura por biodiesel adotou-se um método regressivo. Inicialmente, realizou-se um levantamento das informações disponíveis para a demanda de diesel fóssil para os próximos anos. Sendo que, a partir de projeções da adição obrigatória de biodiesel ao petrodiesel, obteve-se um volume estimado da demanda de biodiesel para o Brasil nos próximos anos.

Essas projeções dos percentuais de biodiesel que serão adicionados ao diesel fóssil foram divididas em cenários. Sendo que a criação de cenários possibilita que sejam organizadas as projeções de situações alternativas futuras de acordo com diferentes

perspectivas, além de permitir que sejam analisados os resultados dos cenários propostos (Reichert, 2013). Neste estudo foram adotados três cenários, estabelecidos a partir das seguintes diretrizes legais:

- O Cenário 1 apresenta a projeção da produção de biodiesel B15 (15% de adição do biodiesel ao diesel), por ser a cota que entrará em vigor em 2025 conforme a Lei n.º 14.993 de 8 outubro de 2024 (Brasil, 2024);
- O Cenário 2 considera a projeção de nova cota mínima de 20% de adição do biodiesel (B20) ao óleo diesel, que deve vigorar a partir de 2030 conforme Brasil (2024);
- O Cenário 3 considera a cota máxima de 25% de adição do biodiesel (B25) ao diesel, também estabelecida por Brasil (2024).

Após a determinação dos cenários, com base nas informações da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e na avaliação da tendência de participação média do estado de Goiás na produção nacional em anos anteriores, obteve-se uma taxa média percentual de participação do estado na produção brasileira. Desta forma, aplicando essa taxa média obtida na projeção de demanda nacional futura, obteve-se um volume estimado de produção para o estado de Goiás nos próximos 20 anos.

Para realizar a previsão da saturação da atual capacidade instalada em função da demanda prevista, considerou-se o Cenário 1 (B15). Este cenário é o que tem a menor adição de biodiesel ao diesel e está em consonância com a previsão legal temporal mais próxima, já que ele deve vigorar a partir de 2025. Esta análise possibilitou especificar o período em que a cadeia produtora atual se tornará insuficiente, de modo a permitir que o estado de Goiás se planeje para atender a demanda de produção do biodiesel para os próximos anos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Projeção da demanda futura por biodiesel em Goiás

Segundo EPE (2024b), a demanda nacional total por óleo diesel B (óleo diesel com adição de biodiesel) em 2034 será de 84 milhões de m^3 . Este valor representa um crescimento médio da demanda de 1,5 milhões de m^3 ao ano. Sendo que, para se chegar à demanda de biodiesel em Goiás, fez-se necessário, primeiramente, obter os valores projetados para o Brasil. Considerando a taxa de crescimento médio anual prevista pela EPE (2024b), e projetando a demanda total de óleo diesel para um horizonte de 20 anos (horizonte temporal indicado por MMA (2012) para projeções de cenários futuros), obteve-se a demanda nacional de óleo diesel.

A partir da projeção da real demanda nacional do óleo diesel B calcularam-se três cenários para a produção do biodiesel no Brasil, variando as taxas obrigatórias de adição conforme os dados levantados na evolução histórica da adição percentual do biodiesel ao diesel.

A estimativa de produção de biodiesel para o Brasil, entre os anos de 2025 e 2045 foram, para o Cenário 1 (B15), de 11 a 15 milhões de m^3 por ano. No Cenário 2 (B20), as estimativas apontam de 14 a 20 milhões de m^3 por ano. Já no Cenário 3 (B25), as projeções variaram de 18 a 25 milhões de m^3 de biodiesel. Esses valores serviram de referência para estimar a demanda futura de biodiesel em Goiás.

Estimativa da demanda de biodiesel para o estado de Goiás

A projeção da demanda de biodiesel para o estado de Goiás foi calculada em função da participação percentual do estado na produção nacional. De acordo com dados da série histórica disponibilizada pela ANP (2024), entre os anos de 2014 a 2023, a participação de Goiás na produção brasileira de biodiesel variou de 13,6% (em 2020) a 18,8% (em 2014), conforme apresentado na Tab. 3. Sendo que no ano de 2023 este percentual foi de 15,7%.

Tabela 3: Análise histórica da participação percentual do estado de Goiás na produção nacional de biodiesel (B100)

Participação percentual do estado de Goiás na produção nacional de biodiesel (B100)										
Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Participação na produção nacional (%)	18,8	17,7	17,1	16,7	14,2	14,6	13,6	14,2	17,6	15,7
Média da participação na produção nacional (%)	16,0									
Diferença para a Média (%)	2,8	1,7	1,1	0,7	-1,8	-1,4	-2,4	-1,8	1,6	-0,3

Fonte: Elaborado pelos autores com base em ANP (2024)

Com os dados apresentados na Tab. 3 foi possível calcular uma tendência média de 16% da participação goiana na produção nacional. Dado corroborado em estudo de EPE (2022), que define exatamente o percentual de 16% para a participação de Goiás na produção nacional de biodiesel.

Além da participação percentual do estado na produção nacional, outro dado utilizado para calcular a projeção da produção de biodiesel em Goiás é oriundo do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 elaborado pela EPE (2022). Neste relatório está projetado um incremento de 1% no percentual de biodiesel produzido em Goiás em relação à participação no cenário nacional, a cada período de 10 anos, a contar de 2030. Desta forma considerou-se que a produção do estado de Goiás manterá uma participação média de 16% da produção nacional até 2030 e, a partir deste ano, aplicou-se uma regressão no valor projetado para produção brasileira no horizonte de 20 anos, considerando os mesmos três cenários nacionais: B15 (15% de biodiesel), B20 (20% de biodiesel) e B25 (25% de biodiesel). Os dados apresentados na Fig. 1 apontam que até 2045, Goiás passará da produção atual de 1,18 milhões de m³ de biodiesel (em 2023) para valores que irão variar entre 2,7 milhões de m³/ano (Cenário 1 – B15) a 4,5 milhões de m³/ano (Cenário 3 – B25).

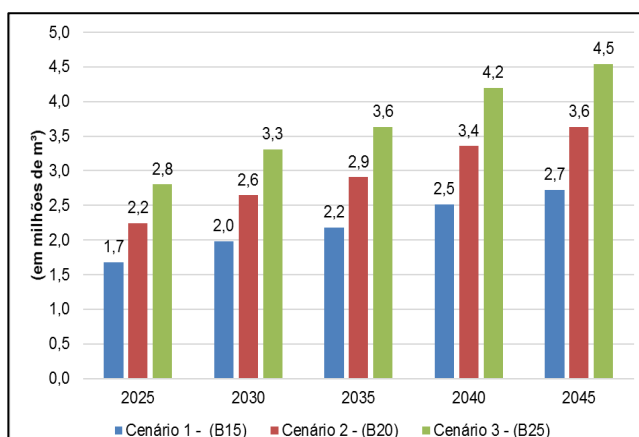


Figura 1: Projeção da produção goiana de biodiesel, de 2025 a 2045, para três diferentes cenários Fonte: Elaborado pelos autores

Embora as projeções apresentadas sejam bastante promissoras, elas não fogem às expectativas, tanto nacionais quanto internacionais, sobre o futuro do biodiesel brasileiro. O país tem ampliado consideravelmente sua produção desde 2005, quando foram implementadas políticas legais que regulam a adição obrigatória do biodiesel ao diesel fóssil (Nikas et al., 2022). Diante disso, conforme apresentado neste estudo, a previsão é que o cenário de crescimento se mantenha nos próximos anos.

Produção de biodiesel goiana versus capacidade estadual instalada

A avaliação comparativa entre o atual volume produzido em função da capacidade de produção instalada, permitiu analisar dois outros fatores: primeiro foi o potencial que o estado de Goiás possui para a expansão da produção de biodiesel e; segundo, deu subsídios para estimar o ano em que a estrutura atual de produção no estado precisará ser ampliada. Na Tab. 4 está apresentada a relação entre a produção de biodiesel e a capacidade instalada, para o ano de 2023. Como resultado desta relação, conseguiu-se identificar os volumes e os percentuais de produção instalados que não são utilizados nas unidades produtoras de biodiesel.

Os dados obtidos mostram que apenas as usinas de São Simão, Rio Verde e Ipameri operam atualmente utilizando mais de 75% da capacidade instalada. Por outro lado, a usina de São Miguel do Araguaia é a que menos utiliza sua capacidade instalada, com mais de 97% de

capacidade de produção não utilizada, para o ano de 2023. De modo geral é possível observar que o estado de Goiás teria condição de ampliar sua capacidade de produção de biodiesel em mais de 40%. Este dado permitiu estimar o período em que ocorrerá a saturação da capacidade instalada, requerendo assim a ampliação das usinas existentes, ou a construção de novas usinas no estado.

Tabela 4: Estimativa da produção de biodiesel (B100), por município goiano com usina – 2023

Município produtor	Produção estadual (m³/dia milhões m³/ano)	Capacidade Instalada (m³/dia milhões m³/ano)	Volume não usado (m³/dia milhões m³/ano)	Percentual não usado (%)
Anápolis	470 0,172	933 0,341	463 0,169	49,6
Formosa	363,5 0,133	650 0,237	286,5 0,104	44,1
Ipameri	490 0,179	625 0,228	135 0,049	21,6
Palmeiras de Goiás	140 0,051	200 0,073	60 0,022	30,0
Porangatu	732,1 0,267	1800 0,657	1067,9 0,390	59,3
Rio Verde	516 0,188	600 0,219	84 0,031	14,0
São Mig. do Araguaia	2,8 0,001	95 0,035	92,2 0,034	97,1
São Simão	528,7 0,193	625 0,228	96,3 0,035	15,4
Total – Goiás	3243,1 1,184	5528 2,018	2284,9 0,834	41,3

Fonte: Elaborado pelos autores

Previsão de saturação da estrutura de produção em função da capacidade não utilizada e da demanda futura.

Essa análise foi desenvolvida para possibilitar um diagnóstico temporal que prevê o ano em que o estado de Goiás precisará investir na ampliação da sua capacidade de produção, seja pela expansão das usinas existente ou pela construção de novas plantas de produção de biodiesel. A Fig. 2 reúne as informações da capacidade instalada e da demanda por biodiesel prevista para os próximos dez anos, para o Cenário 1 (B15).

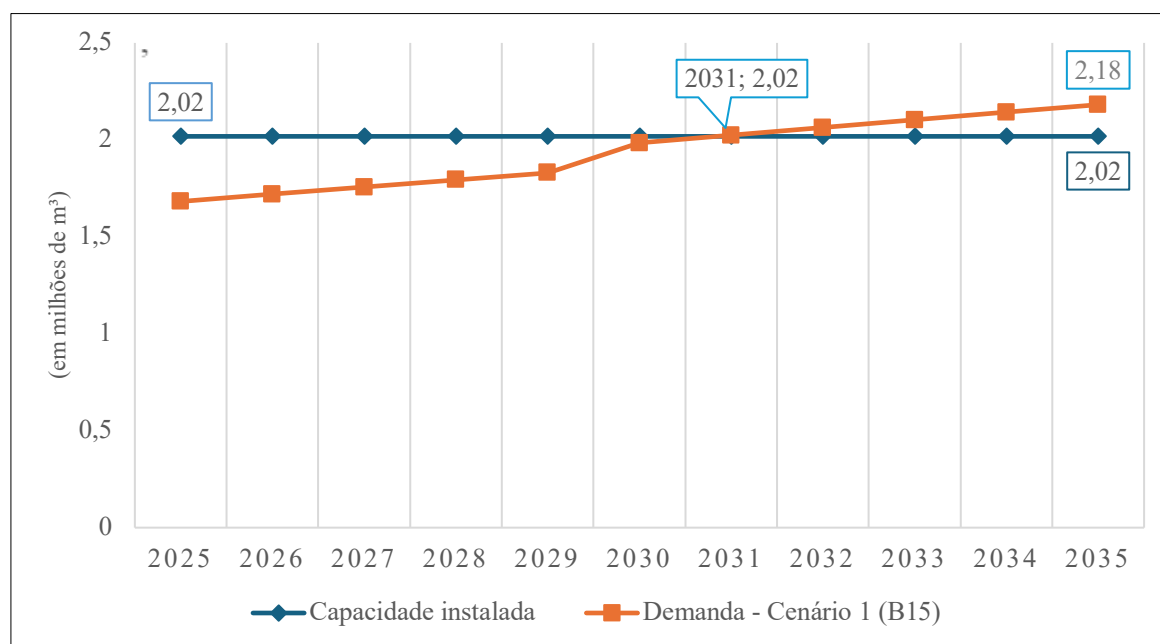


Figura 2: Projeção da saturação da cadeia produtora estadual em função da demanda. Fonte: Elaborado pelos autores

A partir da análise apresentada na Fig. 2 é possível perceber que a influência das políticas públicas de descarbonização, através do incentivo ao uso do biodiesel (com a adição de cotas percentuais obrigatórias), requererá do sistema produtor goiano uma expansão em, no máximo, seis anos. Isso significa que a capacidade total de biodiesel será atingida no primeiro semestre de 2031.

Destaca-se ainda que, de acordo com a ANP (2024), as empresas produtoras de biodiesel de Rio Verde e de Palmeiras de Goiás solicitaram a ampliação de suas capacidades de produção de 0,219 milhões m³/ano e 0,073 milhões m³/ano para 0,237 milhões m³/ano e 0,219 milhões m³/ano, respectivamente. Estas ampliações, se ocorrerem, aumentarão em 0,167 milhões m³/ano a capacidade estadual de produção de biodiesel. Acrescendo este valor à atual capacidade instalada, o estado passaria a ter 2,182 milhões de m³/ano o que permitiria adiar a saturação do sistema produtor para o ano de 2035, no cenário B15.

CONCLUSÕES

Embora Goiás seja um importante produtor nacional de biodiesel, praticamente não há estudos em torno do tema para o estado. Isso permite concluir que o assunto está longe de ser esgotado, podendo surgir diversas análises para o aprofundamento do atual cenário do biodiesel goiano.

Sobre o aspecto da produção e projeção futura, o cenário goiano é bastante promissor, sendo que as evoluções das taxas de adição obrigatória permitem estimar que no Cenário 3 (com 25% de adição do biodiesel ao diesel) o estado precisará produzir em 2045 um volume de 4,5 milhões de m³ de biodiesel, o que acarretará um aumento de 380% em comparação com o produzido em 2023. Ainda em função das projeções futuras, foi possível quantificar que o estado deve investir na ampliação do seu sistema produtor nos próximos seis anos, pois a expectativa é que 100% de sua atual capacidade de produção instalada já seja requerida no primeiro semestre de 2031.

Estes fatores deverão aquecer o mercado produtor goiano, estimulando ampliações das plantas de produção existentes, além de favorecer o surgimento de novas plantas produtoras. Este panorama deverá alavancar o mercado de insumos/matérias-primas, além de promover uma redução nos impactos negativos ao meio ambiente, oriundos do uso de biodiesel em detrimento ao petrodiesel.

Agradecimentos. Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e à Secretaria-Geral de Governo (SGG) pelo apoio financeiro. Os autores agradecem ainda a Eletrobrás e ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 2023. Rio de Janeiro/RJ: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2023. Disponível em:< <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de->

conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>. Acesso em: 18 out. de 2024.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 2024. Rio de Janeiro, RJ: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024. Disponível em:<<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024>>. Acesso em: 18 out. de 2024.

BIODIESELBR. Usinas de biodiesel no estado de Goiás. 2024. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/usinas_brasil/estados/goias>. Acesso em: 25 out. 2024.

BRASIL. Lei n.º 14.993, de 8 de outubro de 2024: dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; altera as Leis n.ºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999, 8.723, de 28 de outubro de 1993, e 13.033, de 24 de setembro de 2014; e revoga dispositivo da Lei n.º 10.438, de 26/04/2002. Diário Oficial da União, Brasília/DF, 2024. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm>. Acesso em: 20 out. 2024.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032: Oferta de Biocombustíveis. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro/RJ, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE%202032%20-%20Oferta%20de%20Biocombustiveis_27dez2022_envio.pdf> Acesso em: 16 out. 2024.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro/RJ, 2024a. Disponível em:< https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf> Acesso em: 23 out. de 2024.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Projeções de oferta e demanda de diesel nos próximos anos. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro/RJ, 2024b. Disponível em: https://abiove.org.br/abiove_content/Abiove/AP-EPE-DPG-SDB-2024-53_Abiove_Oferta-e-demanda-de-diesel.pdf, Acesso em: 28 out. 2024.

- JULIO, A. A. V.; MILESSI, T. S.; MAYA, D. M. Y.; LORA, E. S.; PALACIO, J. C. E. Assessment of the sustainability and economic potential of hydrotreated vegetable oils to complement diesel and biodiesel blends in Brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, V.17, bbb.2378, 2021. DOI 10.1002/bbb.2378.
- MALABADI, B. R.; MR, S.; KOLKAR, K. P.; CHALANNAVAR, R. K. Biodiesel production: an updated review of evidence. *International Journal of Biological and Pharmaceutical Sciences Archive*, 2023. DOI: 10.53771/ijbpsa.2023.6.2.0104.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação. Apoiando a implementação da política nacional de resíduos sólidos: do nacional ao local. Ministério do Meio Ambiente, Brasília/DF, 2012.
- NIKAS, A.; KOASIDIS, K.; KOBERLE, A.C.; KOURTESI, G.; DOUKAS, H. A comparative study of biodiesel in Brazil and Argentina: An integrated systems of innovation perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V.156, 112022, 2022. DOI:10.1016/j.rser.2021.112022.
- PENTEADO, M. C. do P. de S. Identificação dos gargalos e estabelecimento de um plano de ação para o sucesso do Programa Brasileiro do Biodiesel. Thesis, 159 p. Identificação dos gargalos e estabelecimento de um plano de ação para o sucesso do Programa Brasileiro do Biodiesel, 2005. DOI 10.22430/22565337.1568. 2005.
- REICHERT, G. A. Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre (Doctoral dissertation). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2013.
- RODRIGUES, A. C. C. Policy, regulation, development and future of biodiesel industry in Brazil. *Cleaner Engineering and Technology*, v.4, 100197, 2021. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100197.
- SARAVANAN, A. P.; PUGAZHENDHI, A.; MATHIMANI, T. A comprehensive assessment of biofuel policies in the BRICS nations: Implementation, blending target and gaps. *Fuel*, v.272, 117635, 2020. DOI 10.1016/j.fuel.2020.117635

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616436>

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SETORES AGROINDUSTRIAL, DE TRANSPORTE, FARMACÊUTICO, AUTOMOBILÍSTICO E DE MINERAÇÃO: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

Gino B. Colherinhas¹, Felipe P. Mariano¹, Paulo H. N. Pimenta², Getúlio S. S. Junior³, Gabriela M. Fraga³

¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás

Goiânia/GO, Brasil

gino@ufg.br, fpmariano@ufg.br

²Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Goiás

Goiânia/GO, Brasil

paulo.pimenta@ifg.edu.br

³Secretaria-Geral de Governo do Estado de Goiás SGG

Goiânia/GO, Brasil

gabriela.fraga@goias.gov.br, getulio.santos@goias.gov.br

Resumo. Este artigo realiza uma análise bibliométrica das principais estratégias de eficiência energética nos setores agroindustrial, de transporte, farmacêutico, automobilístico e de mineração, com o objetivo de identificar medidas aplicáveis ao estado de Goiás. A pesquisa utiliza palavras-chave específicas para cada setor e discute os artigos mais citados para evidenciar tecnologias e práticas que promovem a sustentabilidade e a redução do consumo energético. Entre os principais artigos encontrados, no setor agroindustrial, a aplicação de sistemas solares se mostra promissora para a eficiência ambiental; no setor de transportes, as políticas de incentivo à eficiência energética reduzem as emissões de carbono; no setor farmacêutico, a mecanossíntese contribui para diminuir o impacto ambiental da produção; no setor automotivo, o uso de baterias de fosfato de ferro-lítio melhora a eficiência dos veículos elétricos; e na mineração, as inovações na indústria do carvão impulsionam práticas mais sustentáveis. Os resultados apontam para a viabilidade de aplicar tais estratégias em Goiás, fornecendo uma base para futuras implementações e políticas públicas voltadas à sustentabilidade e ao desenvolvimento econômico regional.

Palavras-chave: Eficiência energética. Setores produtivos. Análise bibliométrica. Goiás. Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A promoção da eficiência energética (EE) é essencial para o desenvolvimento sustentável, especialmente em setores de alta intensidade energética como o agroindustrial, de transporte, farmacêutico, mineração e automotivo. O Estado de Goiás, devido à sua diversidade econômica e ao papel estratégico de suas mesorregiões, apresenta um cenário propício para a implementação de estratégias que visam otimizar o uso de energia e reduzir

impactos ambientais. Este estudo visa identificar estratégias que promovem a eficiência energética nesses setores e serve como base para uma avaliação prévia da viabilidade técnica e econômica para a implementação dessas estratégias no Estado de Goiás.

A EE tem se tornado um tema central em diversos setores industriais, impulsionada pela crescente demanda por sustentabilidade e pela necessidade de otimização dos recursos energéticos. A implementação de estratégias que visam à redução do consumo energético é fundamental para aumentar a competitividade. Com isso, este artigo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica das publicações científicas que abordam estratégias para eficiência energética em setores estratégicos produtivos.

Para realizar a análise bibliométrica, foi utilizado o software Bibliometrix, uma ferramenta especializada em análises estatísticas e gráficas de dados bibliográficos. Desenvolvido em R, o Bibliometrix permite importar dados de bases de dados como Scopus e Web of Science, realizar análises descritivas, de rede (coautoria, co-citação) e visualizar tendências de pesquisa. Ele é amplamente utilizado em estudos de mapeamento da produção científica, identificando autores, instituições, países e temas mais relevantes dentro de uma área de estudo.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo envolveu a realização de buscas de artigos na base de dados Scopus com filtros específicos: período de publicação de 2021 a 2024, artigos completos e de revisão, no idioma inglês.

A primeira busca foi realizada utilizando os seguintes termos-chave para identificar documentos sobre eficiência energética de forma mais ampla, abrangendo diversos setores industriais:

- ("Energy Efficiency" OR "Energy Saving" OR "Energy Conservation" OR "Energy Optimization") AND ("Agribusiness" OR "Agroindustry" OR "Transportation" OR "Pharmaceutical" OR "Automotive" OR (mining AND NOT "Data mining"))

Em seguida, foram realizadas buscas refinadas para setores industriais específicos, utilizando palavras-chave específicas para cada setor:

- Agroindústria: ("Energy Efficiency" OR "Energy Saving" OR "Energy Conservation" OR "Energy Optimization") AND ("Agribusiness" OR "Agroindustry")
- Transporte: ("Energy Efficiency" OR "Energy Saving" OR "Energy Conservation" OR "Energy Optimization") AND ("Transportation")
- Farmacêutico: ("Energy Efficiency" OR "Energy Saving" OR "Energy Conservation" OR "Energy Optimization") AND ("Pharmaceutical")
- Automotivo: ("Energy Efficiency" OR "Energy Saving" OR "Energy Conservation" OR "Energy Optimization") AND ("Automotive")
- Mineração: ("Energy Efficiency" OR "Energy Saving" OR "Energy Conservation" OR "Energy Optimization") AND (mining AND NOT "Data mining")

A Tabela 1 apresenta um resumo dos documentos encontrados na base de dados do Scopus e os que foram efetivamente utilizados na análise bibliométrica

Tabela 1. Resumo dos Documentos Encontrados e utilizados pelo Bibliometrix

Setor	Documentos Encontrados	Utilizados pelo Bibliometrix
Geral (Vários setores)	1.905	1.886
Agroindústria	18	18
Transporte	1.265	1.253
Farmacêutico	89	89
Automotivo	296	294
Mineração	267	265

Entre os setores analisados, o setor de transporte apresentou o maior número de publicações relacionadas à eficiência energética, com 1.265 artigos encontrados, seguido pelo setor automotivo, com 296 artigos. Esses números refletem o foco crescente das pesquisas em eficiência energética em áreas de alta demanda energética e impacto ambiental, como o transporte e a produção automotiva. Por outro lado, setores como agroindústria e farmacêutica apresentaram um número significativamente menor de publicações, com 18 e 89 documentos encontrados, respectivamente.

Esses resultados indicam que, embora a EE seja um tema amplamente discutido, há setores industriais que ainda possuem uma produção científica limitada nesse campo, o que pode representar oportunidades para futuras pesquisas e inovação tecnológica.

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A produção científica anual mostra o crescimento das pesquisas sobre eficiência energética nos últimos anos. A Figura 1 apresenta a distribuição dos artigos publicados por ano entre 2021 e 2024. Observa-se uma tendência de crescimento na produção (após um decréscimo em 2022), com o maior número de publicações ocorrendo em 2024, refletindo a crescente preocupação global com o uso eficiente de recursos energéticos.

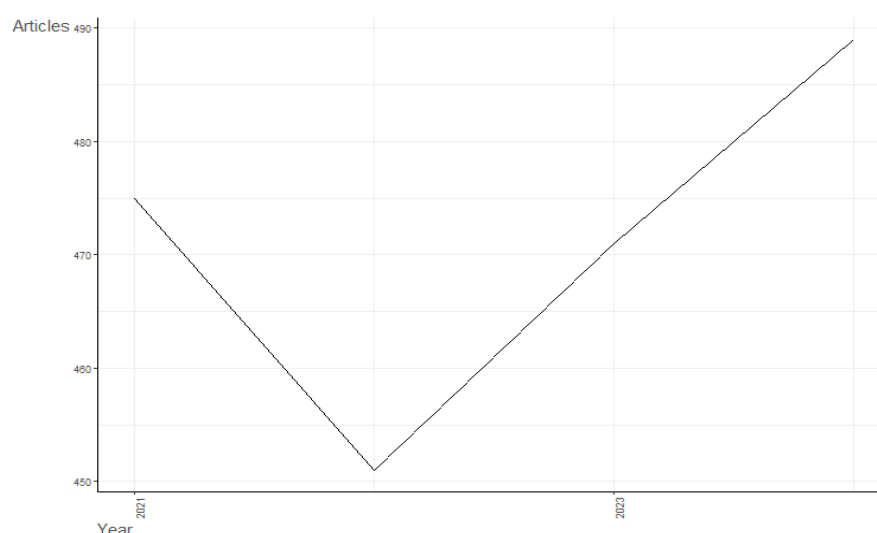


Figura 1. Produção científica anual de estratégias para EE

As fontes mais relevantes, ou seja, os periódicos que mais publicaram sobre o tema, estão listadas na Tabela 2. Entre elas, destacam-se periódicos de alta visibilidade e impacto no campo da engenharia e sustentabilidade, como *Energies*, *Energy* e *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Tabela 2. Fontes mais relevantes

Fontes	Arts.
ENERGIES	136
ENERGY	78
IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS	52
APPLIED ENERGY	40
IEEE ACCESS	35
IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION	33
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	33
SUSTAINABILITY (SWITZERLAND)	33
TRANSPORTATION RESEARCH PART D: TRANSPORT AND ENVIRONMENT	29
TRANSPORTATION RESEARCH PART C: EMERGING TECHNOLOGIES	22
OCEAN ENGINEERING	20
ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH	19
SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	19
SENSORS	19
SUSTAINABLE CITIES AND SOCIETY	19
RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	18
ENERGY REPORTS	17
INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	17
IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY	16
RESOURCES POLICY	15
JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT	14
ENERGY POLICY	13
ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	12
IET INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS	12
SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS	12



Figura 3. *TreeMap* da EE nos setores estratégicos

A análise das colaborações internacionais foi realizada para identificar as redes de cooperação entre os países mais ativos na pesquisa sobre eficiência energética. A Figura 4 apresenta um Mapa de Colaboração Mundial, destacando que países como a China (principal), Estados Unidos, Índia e Arábia Saudita estão entre os maiores colaboradores em publicações científicas sobre o tema. As colaborações internacionais indicam uma forte rede de pesquisa global que está impulsionando o desenvolvimento de soluções energéticas em setores estratégicos.

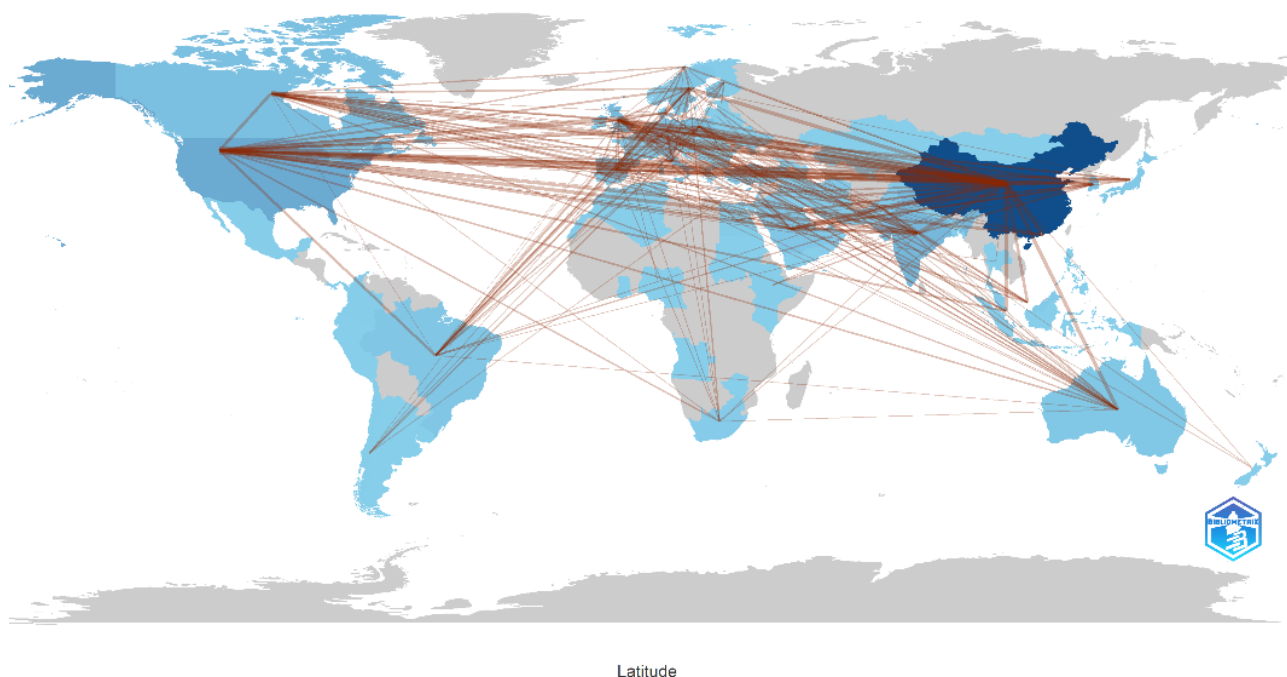


Figura 4. Mapa Mundial de Colaborações entre Países

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados extraídos da análise bibliométrica, no setor agroindustrial, o artigo mais citado foi o de NABAVI-PELESARAEI et al. (2021) com 87 citações. Este estudo investigou as perspectivas de aplicação de sistemas solares na cadeia produtiva de óleo de girassol, utilizando o método de prensagem a frio e uma avaliação do ciclo de vida. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência exergoambiental de diferentes tecnologias solares aplicadas tanto na fase agrícola quanto na fase industrial da produção. Os resultados indicaram que a maior parte do consumo energético total (86%) ocorreu na fase agrícola, com a eletricidade representando 32% desse consumo. Três cenários foram analisados: o cenário atual, o sistema fotovoltaico (PV) e o sistema fotovoltaico/térmico (PV/T). O estudo concluiu que o cenário fotovoltaico é o mais eficiente do ponto de vista ambiental, apresentando a menor demanda cumulativa de energia e menores emissões de gases de efeito estufa. O trabalho também recomendou a adoção de tecnologias sustentáveis, como o uso de biofertilizantes e bombas

elétricas mais eficientes, para melhorar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais na produção de óleo de girassol.

Outro estudo relevante foi o de MARTINEZ-BURGOS et al. (2021), com 49 citações, que explorou a utilização de águas residuais agroindustriais em uma economia circular, com foco na produção de bioenergia e produtos bioquímicos, destacando os benefícios da reutilização de resíduos em processos produtivos.

No setor de transportes, o artigo mais citado da análise bibliométrica foi o de LI, R.; LI; WANG (2022), com 294 citações, que examinou o impacto da eficiência energética nas emissões de carbono em 30 províncias chinesas de 2005 a 2019. Utilizando um modelo de regressão de painel com efeito de limiar e o índice de desacoplamento, o estudo revelou que a eficiência energética tem um efeito inibitório não linear sobre as emissões de CO₂. Quando a eficiência energética está abaixo do limiar de 0,473 milhões de RMB/ton (moeda chinesa por tonelada), cada aumento de 1% na eficiência reduz as emissões de carbono em 0,818%. Acima desse limiar, o mesmo aumento reduz as emissões em 0,926%. Além disso, o estudo concluiu que, embora a urbanização também reduza as emissões de carbono, seu efeito é inferior ao da eficiência energética. Outros fatores, como crescimento da renda, número de veículos particulares e volume de carga, apresentaram um efeito de promoção não linear nas emissões de carbono. A análise de desacoplamento revelou que a relação entre crescimento da renda e emissões de CO₂ no setor de transportes está em um estado desfavorável, indicando que o impacto inibitório da eficiência energética e da urbanização é superado pelo efeito de promoção dos outros fatores. O estudo recomenda políticas focadas em aumentar a eficiência energética e desenvolver métodos de transporte mais sustentáveis, como veículos híbridos e elétricos, para melhorar o desempenho ambiental do setor.

Outro trabalho de destaque foi o de YOUNAS et al. (2022), com 282 citações, que apresentou uma análise abrangente sobre os métodos de produção de hidrogênio, destacando seu potencial como combustível limpo e os desafios para sua implementação em larga escala no setor de transportes. O estudo revisou tanto as vias de produção a partir de fontes renováveis

quanto não-renováveis e ressaltou a crescente viabilidade do uso de fontes renováveis como alternativas limpas para a produção de hidrogênio. Entre as tecnologias avaliadas, a eletrolise, que atualmente responde por 4% da produção mundial de hidrogênio, foi destacada pela sua eficiência de 52% e custo de 10,3 \$/kg, mas enfrenta desafios econômicos significativos. O artigo também trouxe à tona a plasmólise como uma opção competitiva, com uma eficiência de 79,2%, custo de 6,36 \$/kg e menor consumo de energia, além de um equipamento de menor porte. A estratégia proposta de integrar a plasmólise à energia solar para uma produção descentralizada e com zero emissões de carbono foi apontada como uma solução promissora para reduzir a pegada de carbono e tornar a produção de hidrogênio mais sustentável e economicamente viável.

No setor farmacêutico, o artigo mais citado foi o de AASETH et al. (2021), com 80 citações, que revisou dietas e medicamentos para perda de peso, discutindo suas implicações tanto para a saúde quanto para a sustentabilidade energética no setor de saúde. Já o estudo de GALANT et al. (2022), com 56 citações, destacou o uso da mecanossíntese como uma estratégia para reduzir os impactos ambientais na fabricação de Ingredientes Farmacêuticos Ativos (APIs), promovendo maior eficiência energética e sustentabilidade no processo de produção farmacêutica.

No setor automotivo, a partir da análise bibliométrica, o artigo mais citado foi o de YANG; LIU; WANG (2021) com 289 citações, que investigou o uso de baterias de fosfato de ferro-lítio moduladas termicamente em veículos elétricos de mercado de massa. O estudo demonstrou que essas baterias não apenas aumentam a eficiência energética, mas também melhoram a durabilidade dos veículos elétricos. Além disso, o trabalho de AMINUDIN et al. (2023), com 265 citações, abordou os avanços tecnológicos nos veículos movidos a células de combustível de hidrogênio, discutindo a eficiência energética e o potencial de mercado dessas tecnologias.

Por fim, no setor de mineração, o artigo mais citado a partir da análise bibliométrica foi o de LI, Q. (2021), com 115 citações, que abordou as inovações tecnológicas na indústria de

carvão sob a ótica da neutralização de carbono. O estudo propôs mudanças na produção de carvão para melhorar a eficiência energética e contribuir para as metas de descarbonização. O trabalho de CHORDIA; NORDELÖF; ELLINGSEN (2021), com 79 citações, também foi relevante ao analisar as implicações ambientais do aumento na produção de baterias de íons de lítio, sugerindo práticas mais sustentáveis para o setor de mineração.

CONCLUSÕES

A partir da análise dos documentos mais citados em cada setor, fica evidente que as estratégias de eficiência energética vêm ganhando destaque em diversas áreas industriais. Setores como o de transporte e o automotivo têm liderado em termos de produção acadêmica e desenvolvimento tecnológico, refletindo a urgência na redução das emissões de carbono e na busca por alternativas energéticas mais limpas e eficientes. A adoção de tecnologias como veículos elétricos, baterias de fosfato de ferro-lítio e células de combustível de hidrogênio sugere que essas áreas estão na vanguarda da inovação, com amplo potencial de impactar positivamente o meio ambiente e a economia global.

No entanto, a pesquisa também destacou algumas lacunas em setores como a agroindústria e o farmacêutico, que, embora essenciais para o desenvolvimento sustentável, ainda apresentam um volume menor de publicações em comparação com setores de maior intensidade energética. Isso pode ser interpretado como uma oportunidade para o avanço de novas investigações científicas e colaborações interdisciplinares, especialmente no desenvolvimento de soluções que integrem a economia circular e novas tecnologias sustentáveis. A reutilização de resíduos agroindustriais e a mecanossíntese para a produção farmacêutica são exemplos de inovações que, com o devido investimento em pesquisa e desenvolvimento, podem transformar esses setores.

Outro ponto fundamental revelado pela análise bibliométrica foi a identificação de redes de colaboração internacional. Essas redes desempenham um papel crucial na disseminação do conhecimento e na aceleração do desenvolvimento tecnológico,

especialmente em áreas de alta relevância para a transição energética global. A cooperação entre universidades, centros de pesquisa e indústrias é um fator chave para o avanço das pesquisas sobre eficiência energética e sustentabilidade.

Em resumo, embora setores como o transporte e a indústria automotiva tenham avançado de maneira significativa, há oportunidades de crescimento em outros campos, como a agroindústria e o farmacêutico, que precisam de mais investimentos em pesquisa. A identificação de temas recorrentes e a colaboração internacional emergem como fatores decisivos para o futuro da eficiência energética, e a exploração dessas áreas pode trazer benefícios significativos para a sustentabilidade das atividades industriais, com impactos positivos tanto econômicos quanto ambientais.

Agradecimentos. Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) por meio do Termo de Cooperação Técnica TCT nº 2/2023/SGG - FAPEG. Agradecemos também à FURNAS/Eletrobras/ANEEL pelo financiamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASETH, J. et al. Diets and drugs for weight loss and health in obesity – An update. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, [s.l.], v. 140, p. 111789, 2021. ISSN: 0753-3322, DOI: 10.1016/J.BIOPHA.2021.111789.
- AMINUDIN, M. A. et al. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s.l.], v. 48, no. 11, p. 4371–4388, 2023. ISSN: 0360-3199, DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.10.156.
- CHORDIA, M.; NORDELÖF, A.; ELLINGSEN, L. A. W. Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, [s.l.], v. 26, no. 10, p. 2024–2039, 2021. ISSN: 16147502, DOI: 10.1007/S11367-021-01976-0/FIGURES/6.
- GALANT, O. et al. Mechanochemistry Can Reduce Life Cycle Environmental Impacts of Manufacturing Active Pharmaceutical Ingredients. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, [s.l.], v. 10, no. 4, p. 1430–1439, 2022. ISSN: 21680485, DOI: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.1C06434/SUPPL_FILE/SC1C06434_SI_001.PDF.

- LI, Q. The view of technological innovation in coal industry under the vision of carbon neutralization. *International Journal of Coal Science and Technology*, [s.l.], v. 8, no. 6, p. 1197–1207, 2021. ISSN: 21987823, DOI: 10.1007/S40789-021-00458-W/FIGURES/7.
- LI, R.; LI, L.; WANG, Q. The impact of energy efficiency on carbon emissions: Evidence from the transportation sector in Chinese 30 provinces. *Sustainable Cities and Society*, [s.l.], v. 82, p. 103880, 2022. ISSN: 2210-6707, DOI: 10.1016/J.SCS.2022.103880.
- MARTINEZ-BURGOS, W. J. et al. Agro-industrial wastewater in a circular economy: Characteristics, impacts and applications for bioenergy and biochemicals. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 341, p. 125795, 2021. ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2021.125795.
- NABAVI-PELESARAEI, A. et al. Prospects of solar systems in production chain of sunflower oil using cold press method with concentrating energy and life cycle assessment. *Energy*, [s.l.], v. 223, p. 120117, 2021. ISSN: 0360-5442, DOI: 10.1016/J.ENERGY.2021.120117.
- YANG, X. G.; LIU, T.; WANG, C. Y. Thermally modulated lithium iron phosphate batteries for mass-market electric vehicles. *Nature Energy* 2021 6:2, [s.l.], v. 6, no. 2, p. 176–185, 2021. ISSN: 2058-7546, DOI: 10.1038/s41560-020-00757-7.
- YOUNAS, M. et al. An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges. *Fuel*, [s.l.], v. 316, p. 123317, 2022. ISSN: 0016-2361, DOI: 10.1016/J.FUEL.2022.123317.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616458>

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE UMA SUPERFÍCIE ESTENDIDA NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE UM PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)

Jordana B. de Souza¹, Demostenes Ferreira Filho¹, Felipe P. Mariano¹, Fleide W. R. Alves¹

*¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5 Eng. Mecânica, 74.690-900, Goiânia/ Goiás, Brasil
jordanasouza@discente.ufg.br, demostenesferreira@ufg.br, fpmariano@ufg.br, ffwralves@ufg.br*

Resumo. A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) tem ganhado bastante destaque pela sua alta taxa de deposição, sendo uma grande vantagem na produção de grande porte envolvendo metais. No entanto, um fator de desvantagem neste processo é o acúmulo de calor gerado durante a deposição, que afeta diretamente na estrutura formada e nas propriedades dimensionais. Muitas técnicas de resfriamento para diminuir este efeito já foram testadas. Entretanto o estudo do resfriamento por meio de superfícies estendidas, com o aumento da área de troca de calor, para melhorar a dissipação de calor durante o processo ainda é uma prática pouco avaliada. O objetivo deste trabalho foi construir uma placa de alumínio para servir como apoio do substrato e consequentemente como uma superfície estendida. Os resultados apresentaram uma grande influência da utilização desta placa, resultando em um processo mais estável, e uma peça com menor deformação e melhor acabamento.

Palavras-chave: Manufatura aditiva por deposição a arco. Superfície estendida. Resfriamento.

INTRODUÇÃO

A utilização da manufatura aditiva em diversos campos da engenharia tem crescido bastante nos últimos tempos, porque é um processo de fabricação que transforma um modelo CAD (desenho assistido por computador) em uma peça de forma bastante direta. Dentre os diversos tipos de manufatura aditiva para metais, se destaca a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) devido a sua elevada taxa de deposição, que é uma grande vantagem para produção de elementos de grande porte, utilizando os princípios básicos de soldagem para isto.

Entretanto, um dos desafios do método MADA é o acúmulo de calor gerado durante a deposição das camadas de material, que acarreta consequências negativas para a peça final, como uma diferença dimensional entre as camadas do componente produzido, gerando um acabamento superficial ruim e não esperado, além de tensões residuais e distorções que afetam a qualidade da peça.

Muitos pesquisadores já testaram algumas formas de melhorar a dissipação de calor neste processo, como a inclusão de tempos ociosos entre camadas, resfriamento forçado por jatos de ar ou gases e resfriamento por quase imersão em líquidos. Todavia, não foi encontrado até então um estudo sobre resfriamento por meio do aumento da área de superfície em que o substrato é apoiado.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência de uma superfície estendida no processo MADA, funcionando semelhantemente a uma aleta, para melhorar a dissipação de calor por meio do aumento da área que realizará a troca de calor com o meio inserido. Será verificada a eficiência desta superfície ao realizar a comparação entre as peças produzidas com o resfriamento natural e com o resfriamento utilizando o gabarito construído.

DESENVOLVIMENTO

Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo que utiliza o arco elétrico como fonte de calor, enquanto o material em forma de arame é fundido e depositado, camada por camada, a fim de fabricar um determinado componente metálico utilizando a soldagem como um mecanismo de adição de material (Rosa, 2020). De acordo com Alberti et. al (2014), o processo que utiliza o arco elétrico se torna mais eficiente quando é necessária uma maior taxa de deposição de material.

Durante o processo MADA substrato é posicionado de maneira que os cordões de solda sejam depositados em uma determinada direção, formando uma parede de camadas.

Geralmente esse movimento de deposição é executado de forma automatizada e o mecanismo é composto por uma máquina de solda, um cilindro contendo gás de proteção, um braço robótico e a tocha, esse conjunto irá depositar o fio de arame no substrato por meio da fusão entre esses metais, a fim de gerar uma nova peça.

De acordo com Andrade (2022), os parâmetros de soldagem influenciam diretamente no cordão obtido, os quais serão apresentados a seguir. O tipo de gás de proteção pode afetar o formato do cordão depositado, o modo de transferência do metal de adição, as características do arco e, no caso de gases ativos, as suas características metalúrgicas. A vazão do gás de proteção é um fator que se estiver muito baixo pode não ser suficiente para manter a proteção, se for muito alto pode ocasionar turbulências no gás, além disso, quanto maior a intensidade da corrente, maior deve ser a vazão do gás e o diâmetro bocal da tocha. A tensão de soldagem é diretamente proporcional à largura do cordão, valores muito altos podem causar porosidade, respingos e mordeduras, enquanto valores muito baixos podem causar porosidade, convexidade excessiva do cordão e dobras na margem do cordão. Quanto maior a distância do bico de contato à peça (DBCP), menor será a quantidade de calor cedido à peça e a penetração do cordão, devido ao aquecimento do eletrodo por efeito Joule. A velocidade de alimentação do arame é diretamente proporcional à corrente, que por sua vez influencia diretamente na velocidade de fusão do arame, na penetração, no reforço e na largura do cordão (aumenta a energia e impacta no aquecimento). Já a velocidade de soldagem interfere diretamente na energia de soldagem e nas dimensões do cordão de solda. Esses dois últimos fatores influenciam diretamente na temperatura de soldagem e, conseqüentemente, em MADA, pois ao aumentar a velocidade de alimentação, ocorrerá uma maior entrada de calor para fundir a quantidade de material adicionada por unidade de tempo, já o aumento da temperatura de soldagem reduz o tempo de resfriamento da camada, causando um acúmulo de calor. Dessa forma, as velocidades envolvidas no processo afetam intensamente nas propriedades provenientes das condições térmicas da peça fabricada.

A principal vantagem do processo (MADA) é a alta taxa de deposição, que facilita a produção de maiores componentes. Entretanto, essa elevada energia empregada na deposição a arco faz com que esse processo atinja altas temperaturas devido ao acúmulo de energia gerado durante a construção das camadas, que podem causar problemas de tensões residuais e distorções que afetam significativamente a qualidade dos componentes obtidos neste processo (Giarollo, 2021). Fraga et al. (2022), citam que o principal problema a ser enfrentado na soldagem é o acúmulo excessivo de calor no componente durante sua fabricação. Este acúmulo afeta a taxa de resfriamento da poça de soldagem, mantendo-a líquida por mais tempo e permitindo o seu escoamento. Isso compromete o acabamento superficial, a altura esperada para os cordões depositados e a resultante taxa de crescimento do sólido.

Influência da Temperatura no Processo MADA

Um grande problema enfrentado na manufatura aditiva por deposição a arco é o controle das condições térmicas durante o processo, visto que, a cada camada depositada, a temperatura será progressivamente superior devido à energia empregada para ocorrer a fusão dos materiais e ao acúmulo de calor na estrutura formada. De acordo com Giarollo et. al (2021), a variação de dissipação de calor à medida que o número de camadas aumenta leva a uma variação das dimensões das camadas depositadas, afetando significativamente a precisão dimensional das peças fabricadas.

Zhao et al. (2020), exemplificam de forma prática como a influência térmica ocorre em um processo MADA: uma temperatura mais baixa da camada intermediária acelera a solidificação da poça de fusão, assim a camada parece “estreita e alta”. Por outro lado, uma temperatura mais alta da camada intermediária tornaria a camada “larga e curta”. Por isso, é frequente que haja essa diferença dimensional entre as camadas, sendo um grave problema no acabamento da peça final. Dessa forma, a largura variável da camada torna o processo de usinagem mais complicado. Isso aumentará o custo e o tempo para pós-processar a peça. Uma das práticas utilizadas para resolver os problemas causados pelo acúmulo de calor na deposição a arco é introduzir tempo ocioso entre as camadas depositadas, a fim de que a peça

de trabalho transfira o calor excessivo para o ambiente até atingir uma temperatura desejada para a continuidade do trabalho. No entanto, essa prática afeta diretamente na produtividade da fabricação, pois esse tempo ocioso tende a aumentar à medida que a altura da peça de trabalho aumenta.

Outra técnica utilizada para aumentar o resfriamento térmico durante o processo MADA é o resfriamento ativo de quase imersão (NIAC). Da Silva et al. (2020) fizeram um estudo sobre esta metodologia em que o material é depositado dentro de um tanque de trabalho preenchido com líquido, cujo nível sobe enquanto as camadas metálicas são depositadas. Esta técnica de gerenciamento térmico é eficiente e de baixo custo para mitigar o acúmulo de calor em MADA.

Li et al. (2018) introduziram um sistema de resfriamento termoelétrico. Um resfriador termoelétrico, que opera pelo efeito Peltier, é uma bomba de calor ativa de estado sólido que transfere calor de um lado do dispositivo para o outro com consumo de energia elétrica. Dois resfriadores termoelétricos foram distribuídos simetricamente nos dois lados da parede construída e um ventilador foi posicionado para que o lado quente de cada resfriador permanecesse em temperatura ambiente. Com esta técnica o erro de largura do cordão é reduzido em 56,8%, o tempo total de fabricação é reduzido em 60,9% e o tamanho médio do grão é refinado em 25%.

Hackenhaar et al. (2020) fizeram a análise numérica-experimental da técnica de jato de ar incidindo sobre o material depositado para aumentar a taxa de transferência de calor convectiva. Os resultados indicam que o jato de ar tem um impacto significativo no processo, limitando o aumento progressivo na temperatura da intercamada em comparação ao resfriamento por convecção livre. Montevecchi et al. (2018) realizaram uma simulação para estudar numericamente o modelo de resfriamento por jato de ar e ao comparar com o resfriamento padrão, o resfriamento por jato de ar apresentou uma temperatura média por ciclo quase constante durante o processo e previne um aumento excessivo da poça de fusão.

A influência do aquecimento ou resfriamento do substrato na geometria no cordão em um processo de fabricação MADA foi estudada por Gudur et al. (2021), correlacionado com as

taxas de resfriamento monitoradas usando um pirômetro infravermelho. Para a avaliação do substrato pré-aquecido, ele foi mantido a uma temperatura de 500°C. Neste caso, a geometria do cordão formado apresentou uma mudança drástica com aumento da largura do cordão e da profundidade e redução da altura da parede construída. Já no resfriamento do substrato, a largura e a profundidade do cordão foram reduzidas, enquanto a altura aumentou. Isso se deve à diminuição do comportamento de molhabilidade da poça de fusão com o substrato devido à diminuição da temperatura. Assim, a taxa de resfriamento do processo aumenta com o resfriamento do substrato e diminui com o aumento da energia de entrada e do aquecimento do substrato.

METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da Universidade Federal de Goiás. O objetivo é analisar os resultados de dois corpos de prova obtidos no processo de manufatura aditiva por deposição a arco, um sem superfície estendida (SSE) e outro com superfície estendida (CSE) de alumínio como suporte. A tecnologia de soldagem empregada na deposição foi a GWAM (soldagem a arco de metal a gás), com a utilização de gás ativo.

Para a realização do procedimento, utilizou-se uma fonte eletrônica IMC DIGIPLUS A7 450 com aparato de soldagem GMAW associada a um robô Yaskawa Motoman HP20D. O gás de proteção foi uma mistura de Argônio com 25% de CO₂ com uma vazão de 25 L/min. Os demais parâmetros experimentais configurados para a deposição de material estão expostos na Tab.1.

Em ambos os experimentos, o substrato utilizado como metal base no processo de deposição foi uma placa de aço SAE 1020 com dimensões de 150 mm de comprimento, 50 mm de largura e 10 mm de altura. Para o monitoramento da temperatura, foram utilizados 3 termopares do tipo K ligado a um Arduino por meio de módulos MAX 6675, os termopares foram soldados no substrato, no lado oposto de deposição.

Tabela 1. Parâmetros Experimentais

Parâmetros	Observações
Arame	AWS ER70S-6
Diâmetro do fio de arame	1,2 mm
Distância de contato bico peça (DBCP)	12 mm
Tensão	18 V
GAP (incremento de altura no eixo Z)	1,85 mm
Velocidade de alimentação	3 m/min
Velocidade de soldagem	20 cm/min
Comprimento do cordão	100 mm
Número de camadas	20

A montagem do primeiro experimento, sem superfície estendida, está apresentada na Fig. 1, o substrato foi apoiado em duas cantoneiras p para assegurar sua estabilidade no processo.

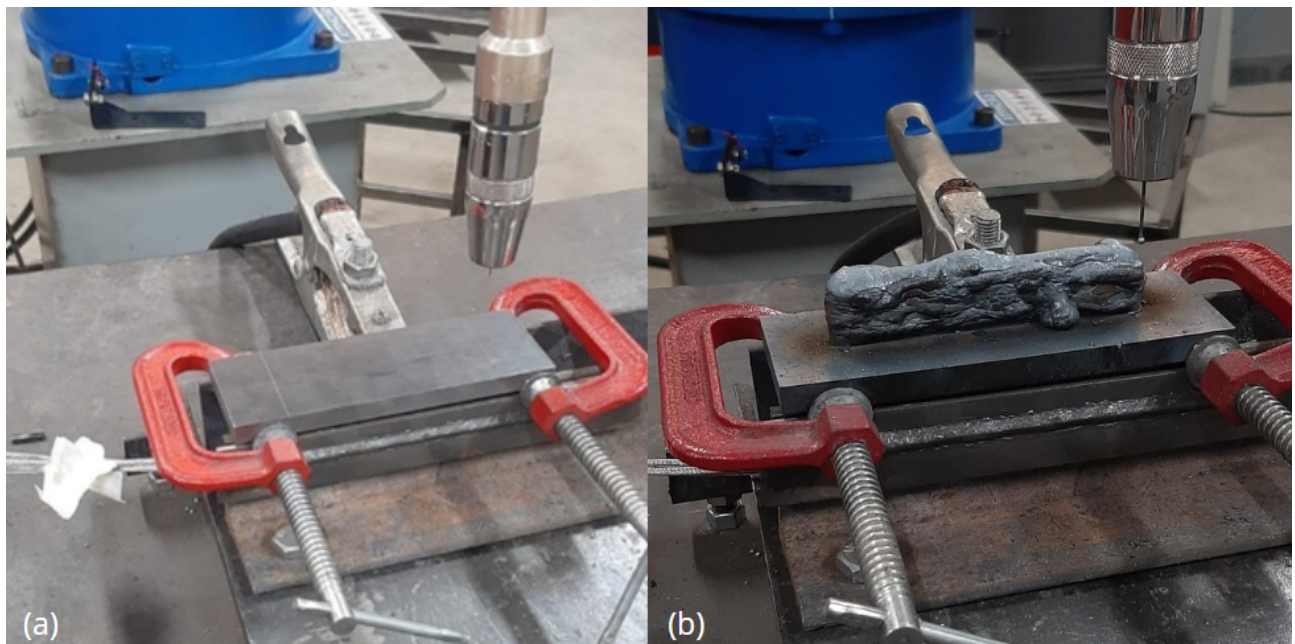


Figura 1. Montagem do experimento sem superfície estendida (a) e depois (b) da deposição

Para realização do segundo experimento, foi confeccionado o gabarito que será usado como superfície estendida do substrato, sendo feito por meio do processo de fundição de alumínio, resultando em uma placa quadrada, com dimensão lateral de 300 mm e com espessura de 10 mm e está apresentada na Fig. 2. O gabarito contém 3 furos no centro, para possibilitar a passagem dos fios dos termopares, que estarão soldados no substrato.



Figura 2. Gabarito de alumínio

A montagem do segundo experimento, com superfície estendida, está apresentada na Fig. 3. O substrato foi apoiado em cima da placa de alumínio e foi realizada a aplicação de pasta térmica sobre o corpo de prova para melhorar a condução térmica entre as superfícies de contato. A de alumínio foi apoiada por meio de duas cantoneiras para evitar seu contato com a mesa de trabalho, a fim de utilizar sua superfície inferior para a troca de calor com o meio.

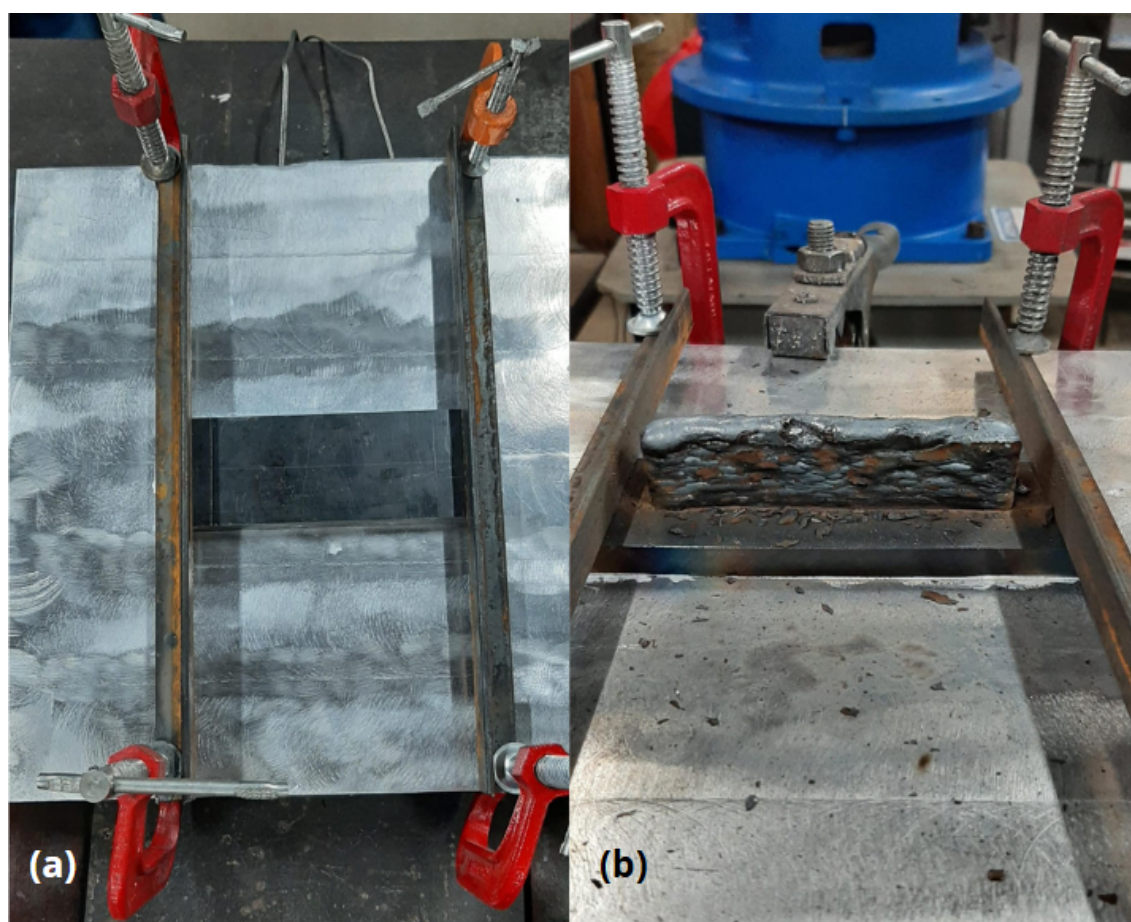


Figura 3. Montagem do segundo experimento antes (a) e depois (b) da deposição

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo realizado os dois procedimentos experimentais, é preciso fazer a comparação entre as duas paredes obtidas para verificar como o gabarito influenciou o resultado (Fig. 4).

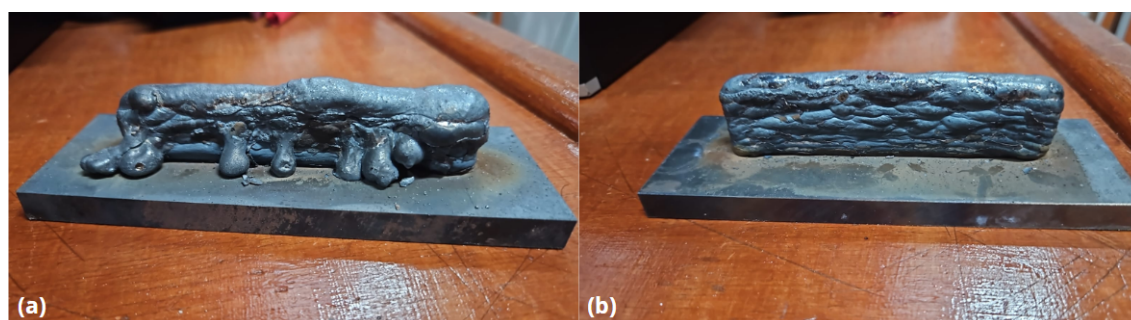


Figura 4. Resultado dos experimentos sem superfície de apoio (a) e com o gabarito (b)

Para analisar o papel do gabarito de alumínio como superfície estendida para melhorar a dissipação de calor durante o processo de deposição, a temperatura do substrato foi monitorada por meio dos termopares. A fim de evitar erros de medição do equipamento, foi realizada uma média da temperatura obtida a cada camada de cordão depositada. A Fig. 5 apresenta a curva de temperatura por camada para os dois experimentos, sendo o primeiro com o resfriamento natural e o segundo com a placa de alumínio como suporte.

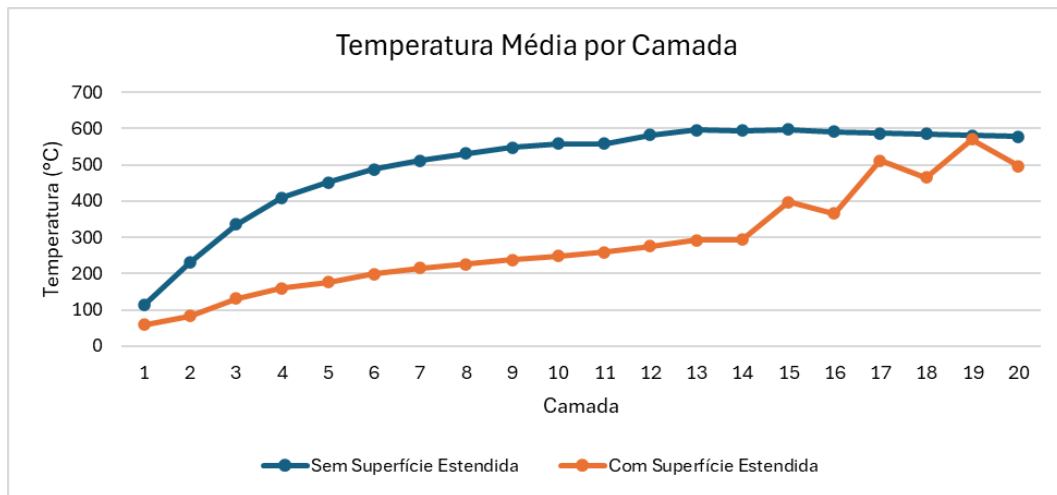


Figura 5: Curva da temperatura média por camada para cada experimento

Por meio da curva resultante da temperatura, é possível identificar que o substrato do processo utilizando o gabarito permaneceu a temperaturas consideravelmente menores do que o substrato sem suporte. A placa estendida mostrou-se eficiente na troca de calor até a 15 camada, após a temperatura máxima tendeu a aumentar de forma similar ao SSE.

Outros parâmetros de extrema relevância para comparar os resultados obtidos em cada procedimento são as dimensões em cada parede fabricada. A Fig. 6 apresenta os valores médios das alturas e larguras, com a barra de desvio padrão. Os valores máximos de altura e largura no primeiro experimento foram 26,40 mm e 13,00 mm respectivamente, enquanto no segundo experimento foram de 27,55 mm e 11,00 mm, representando um incremento na altura máxima de 4,35% e uma redução na largura máxima de 15,38%. Assim, o procedimento CSE resultou em uma parede mais alta, fina e estável, cumprindo o papel esperado com o resfriamento do processo.

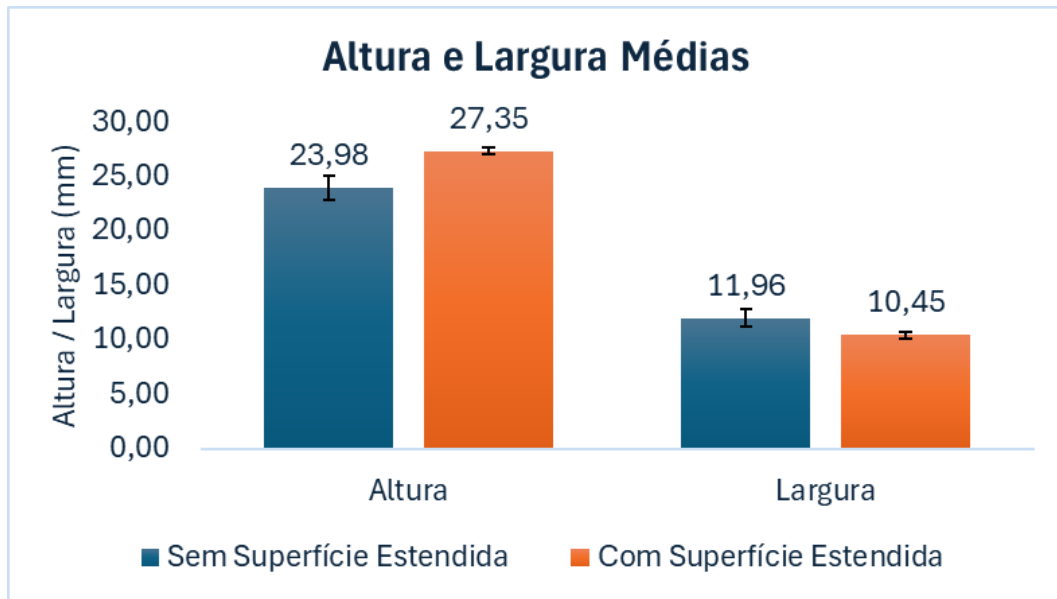


Figura 6. Comparação entre as médias e desvio padrão de altura e largura das amostras

Outros fatores que foram visivelmente influenciados pelo resfriamento por meio da placa de alumínio são as correntes e tensões envolvidas no processo. A Fig. 7 apresenta a curva da corrente média a cada camada de deposição, evidenciando que o segundo experimento resultou em uma menor corrente, que consequentemente melhora a qualidade e aparência da peça produzida.

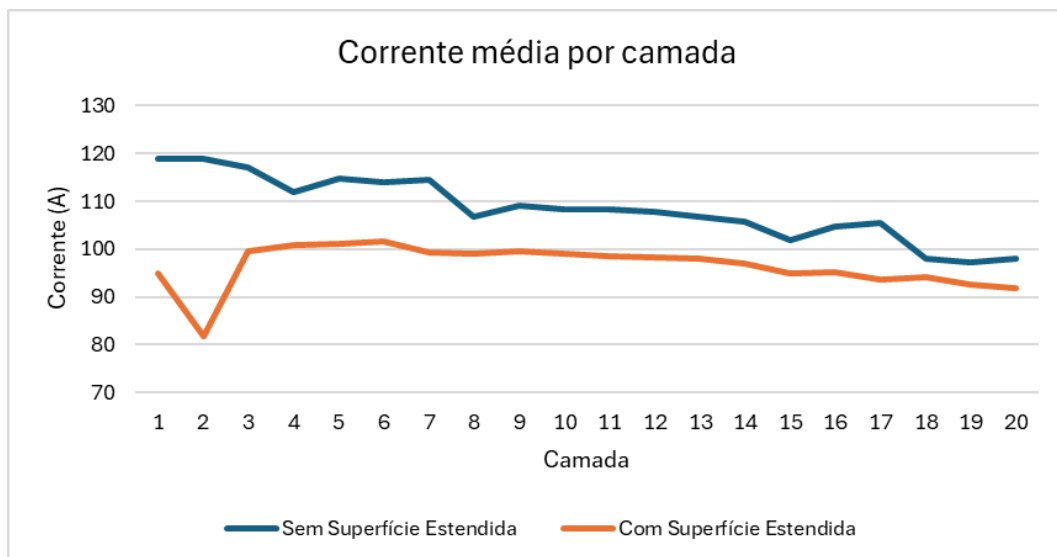


Figura 7. Corrente média por camadas

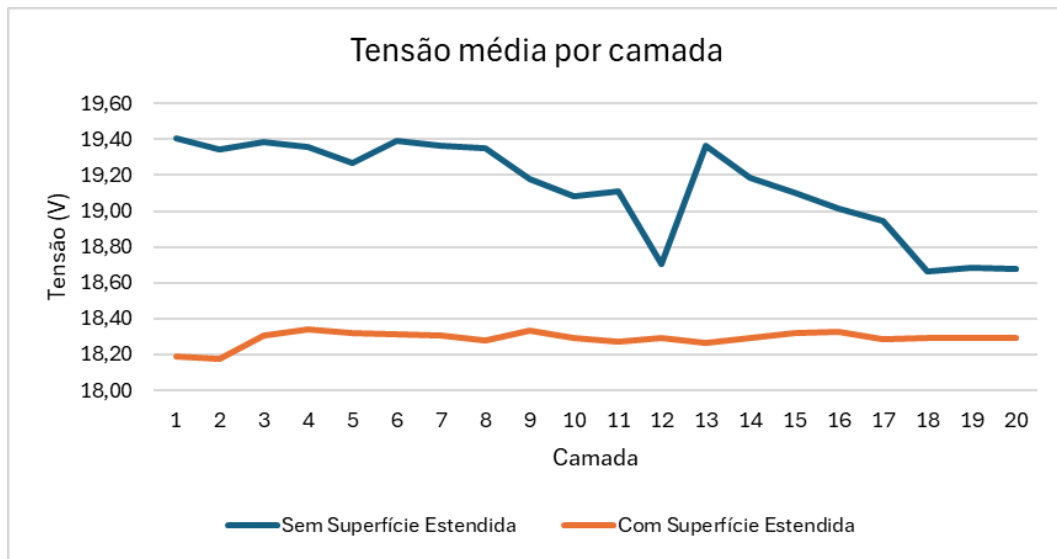


Figura 8. Tensão média por camadas

Ao analisar a curva da tensão média a cada camada (Fig. 8), é possível identificar que a tensão envolvida no segundo experimento, utilizando o gabarito, apresentou uma melhor estabilidade e permaneceu em valores bem menores que a tensão envolvida no experimento sem a superfície estendida. Isso gera uma melhor estabilidade no arco, gerando maior consistência no processo de soldagem e formando uma parede com melhor qualidade dimensional.

Além das análises dos parâmetros, a análise visual das paredes produzidas mostra claramente que o gabarito de alumínio teve uma boa influência na dissipação de calor, pois a segunda parede obteve melhor acabamento enquanto a primeira apresentou formação excessiva de escoamento.

CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos, conclui-se que o gabarito em formato de placa de alumínio cumpriu o papel de uma superfície estendida ao melhorar o resfriamento do processo por meio do aumento da área de contato com o meio. Sendo uma alternativa simples para solucionar um problema frequente nos processos de manufatura aditiva por deposição a arco: a concentração de calor. Ao utilizar a placa de alumínio como suporte, com o auxílio da pasta térmica, a

temperatura durante o processo se manteve em valores reduzidos, a parede obtida apresentou uma melhor qualidade e acabamento, tendo um incremento na altura máxima de 4,35% e uma redução na largura máxima de 15,38%, proporcionando uma melhor distribuição do material depositado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTI, E. A.; SILVA, L.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. Soldagem e Inspeção. Scielo Brasil, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/si/a/s3NZQpdTmJWcr37MNNBtMnS/?lang=pt#>> Acesso em: 18 set. 2024.
- ANDRADE, G. G. S. Influência dos parâmetros de processo na fabricação de sessões de tubo metálicas via manufatura aditiva por deposição a arco. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Amazonas, Amazonas.
- DA SILVA, L. J.; SOUZA, D. M.; DE ARAÚJO, D. B.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 107, n. 5-6, p. 2513-2523, mar. 2020.
- FRAGA, F. F.; CARVALHO, G. C.; OLIVEIRA, T. F. Transferência de calor aplicada à prototipagem rápida por deposição de metal em camadas sucessivas utilizando soldagem 3D. Scientia Interdisciplinaria, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 63-74, 2022. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/si/a/GNjxHHPmPsyTWdvbYcxwwYb/?lang=pt>>. Acesso em: 5 nov. 2024.
- GIAROLLO, D. F.; MAZZAFERRO, C. C. P.; MAZZAFERRO, J. A. E. Modelagem Térmica do Processo de Manufatura Aditiva Utilizando GMAW. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 5, p. 45661-45676, mai. 2021.
- GUDUR, S.; NAGALLAPATI, V.; PAWAR, S.; MUVVALA, G.; SIMHAMBHATLA, S. A study on the effect of substrate heating and cooling on bead geometry in wire arc additive manufacturing and its correlation with cooling rate. Materials Today: Proceedings, v. 41, parte 2, p. 431-436, 2021. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.071>>. Acesso em: 8 nov. 2024.
- HACKENHAAR, W.; MAZZAFERRO, J. A.; MONTEVECCHI, F.; CAMPATELLI, G. An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing. Journal of Manufacturing Processes,

Elsevier, v. 52, p. 58–65, 2020.

LI, F.; CHEN, S.; SHI, J.; ZHAO, Y.; TIAN, H. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. *Applied Sciences*, v. 8, n. 2, p. 207, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app8020207>>. Acesso em: 5 no v. 2024.

MONTEVECCHI, F.; VENTURINI, G.; GROSSI, N.; SCIPPA, A.; CAMPATELLI, G. Heat accumulation prevention in wire-arc-additive-manufacturing using air jet impingement. *Manufacturing Letters*, Elsevier, v. 17, p. 14–18, 2018.

ROSA, F. G. Manufatura aditiva por deposição a arco: uma análise crítica da tecnologia e perspectivas para o futuro. 2020. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ZHAO, Y.; JIA, Y.; CHEN, S.; SHI, J.; LI, F. Process planning strategy for wire-arc additive manufacturing: Thermal behavior considerations. *Additive Manufacturing*, v 32, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100935>>. Acesso em: 3 nov. 2024.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616539>

ANÁLISE DA PERDA TRANSMISSÃO EM SILENCIADORES DE GERADORES COM MÉTODO DAS DUAS CARGAS: PLOTAGEM DE CURVAS ACÚSTICAS DE RESPOSTA E APLICAÇÃO DE FILTROS EM BANDAS DE OITAVA E 1/3 DE OITAVA E PASSA BAIXA

Marcos V. S. Rodrigues¹, Marlipe G. Fagundes Neto¹, Hiago S. Mota¹, João P. S. Fonseca¹, Rodrigo P. Lemos¹

¹EMC Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, PPGMEC Programa De Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás, Av. Esperança, C. Samambaia Al. Ingá, Prédio B5 CEP: 74.690-900 - Goiânia – Goiás – Brasil
silva_vinicius@discente.ufg.br, marlipe@ufg.br, hiagosmotta@gmail.com, jpsfonseca@ufg.br, lemos@ufg.br

Resumo. Este artigo aborda a análise de transmissão sonora em silenciadores de geradores utilizando o método das duas cargas. Inicialmente, são apresentados os conceitos básicos de funções de transferência na análise de sistemas acústicos, com foco na plotagem de curvas acústicas de resposta. Em seguida, discute-se a aplicação de filtros para eliminar ruídos indesejados, destacando a importância desses filtros na melhoria da qualidade do sinal. Em particular, são explorados os filtros em banda de oitava, 1/3 de oitava e passa-baixa, amplamente utilizados na caracterização de frequências no campo da acústica. Por fim, são apresentados exemplos práticos de implementação desses filtros e os resultados obtidos na análise de curvas de transmissão sonora.

Palavras-chave: Transmissão. Acústica. Filtros. Passa-baixa. Bandas.

INTRODUÇÃO

Grupos geradores (GMG) são equipamentos industriais de geração de energia elétrica que combinam um motor de combustão interna (MCI), que fornece potência mecânica, e um alternador síncrono, que a converte em eletricidade. Esses sistemas utilizam diferentes combustíveis, como diesel, biodiesel, GNV e biogás (MASSERONI, 2012). Os geradores são amplamente usados para prevenir interrupções inesperadas no fornecimento de energia, substituir a concessionária em locais remotos ou em casos de custos elevados, e operar em horários de ponta, onde a tarifa elétrica é mais alta (FILHO, 2007).

Uma desvantagem do grupo motor gerador é a poluição sonora, um problema de saúde pública segundo a ONU, especialmente em locais sensíveis como hospitais e indústrias. As principais fontes de ruído incluem o motor diesel, o ventilador de arrefecimento e o sistema

de escape. Para mitigar o ruído, o escape é canalizado para um silenciador, similar ao escapamento automotivo e ilustrado na Figura 1. Esse silenciador é composto por câmaras internas e materiais absorventes, como fibra de vidro ou aço perfurado, que reduzem as ondas sonoras do motor de combustão interna. Além de diminuir o ruído, o silenciador ajuda a direcionar os gases de escape e pode incorporar catalisadores internos para reduzir emissões nocivas, como monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio, antes de sua liberação na atmosfera (PEREIRA, 2024).

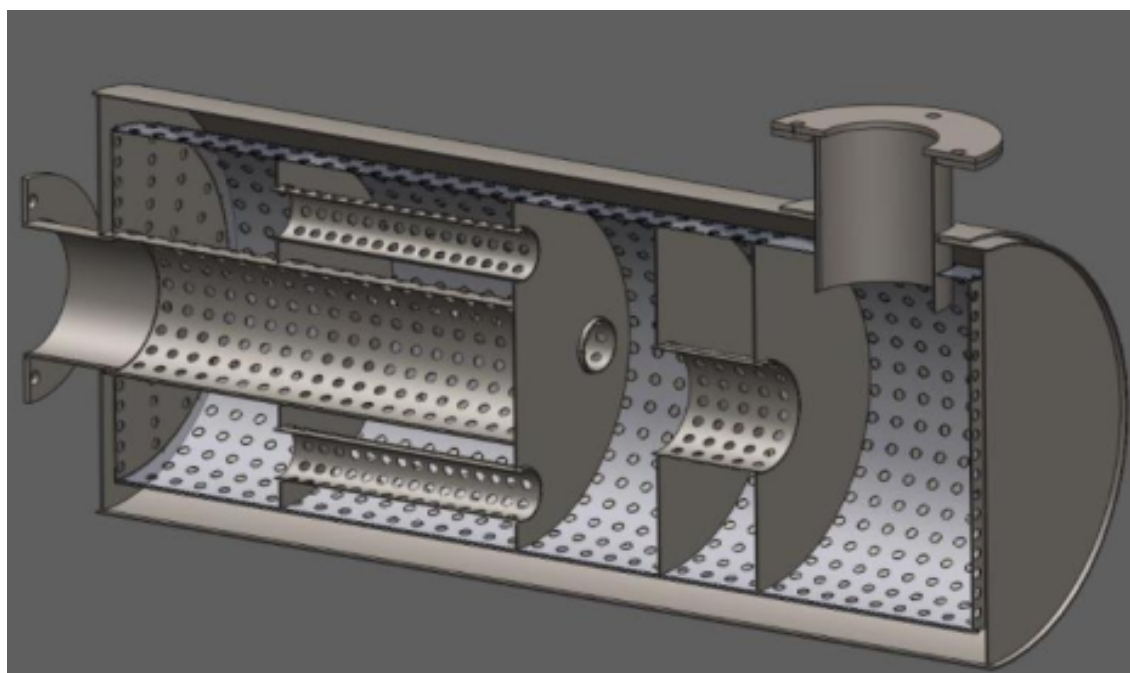


Figura 1. Filtro acústico (silenciador)

A transmissão sonora e a análise de frequências são essenciais na engenharia acústica. Este estudo explora a plotagem de curvas de transmissão sonora, utilizando funções de transferência, que possibilitam uma compreensão detalhada da relação entre entrada e saída do sistema acústico, como apontado por KINSLER ET AL. (2000). Os filtros de oitava, segundo a ANSI (2013), e os de 1/3 de oitava, conforme BIES e HANSEN (2009), são ferramentas que permitem uma análise precisa das frequências, sendo essenciais para medições de ruído e estudos de impacto ambiental. Esses filtros oferecem resoluções ajustadas à audição humana, permitindo análises detalhadas do espectro sonoro. Portanto, este estudo fornece uma visão

abrangente sobre o uso de funções de transferência e filtros na análise de transmissão sonora, contribuindo para o entendimento do desempenho dos silenciadores e fornecendo diretrizes para otimizar seu design e eficiência. A Figura 1 ilustra o funcionamento dos silenciadores, destacando sua importância na mitigação de ruídos e no controle de emissões sonoras em ambientes sensíveis.

DESENVOLVIMENTO

Análise de Sistemas Acústicos método das duas cargas

Os sistemas de modelagem acústicos, como salas e materiais de isolamento, por meio de funções de transferência permitem prever como diferentes frequências sonoras serão refletidas, absorvidas ou transmitidas, ajustando assim a resposta acústica do ambiente (KUTTRUFF, 2016). Em salas de concerto, por exemplo, as funções de transferência são usadas para analisar a propagação sonora, auxiliando no design do espaço para garantir uma distribuição equilibrada do som (BERANEK & MELLOW, 2012). Nos estúdios de gravação, essas funções ajudam a controlar a acústica interna, otimizando a disposição de painéis absorventes e difusores para reduzir reverberações indesejadas e garantir gravações mais precisas (CHEN, 1976).

O método das duas cargas é uma técnica experimental eficaz para caracterizar a performance de silenciadores, medindo a perda de transmissão sonora, que indica a eficácia na atenuação de ruídos. Esse método consiste na aplicação de duas condições de carga distintas, possibilitando a derivação das funções de transferência do sistema. A perda de transmissão é expressa em decibéis (dB) e reflete a diferença entre a potência sonora incidente e a transmitida pelo silenciador. Em laboratório, o método das duas cargas é implementado com equipamentos precisos.

Filtros para Eliminação de Ruído

Filtros acústicos são essenciais na redução de ruído indesejado em medições e na análise de curvas de transmissão sonora, permitindo a passagem de frequências específicas enquanto atenuam outras. Eles são indispensáveis em ambientes que exigem alta precisão, como testes de equipamentos de áudio e estudos de ruído ambiental (KINSLER ET AL., 1999).

Filtros de banda de oitava e 1/3 de oitava são especialmente relevantes, com os primeiros dividindo o espectro em bandas mais amplas e os segundos oferecendo maior resolução ao subdividir cada banda em três partes. Essa granularidade é crucial para detectar picos e quedas na resposta de frequência, facilitando o design acústico em salas de concerto e estúdios (BERANEK & MELLOW, 2012). A utilização desses filtros na análise da distribuição de energia sonora permite a criação de perfis acústicos detalhados e a identificação de ressonâncias indesejadas, resultando em ambientes sonoros balanceados e de alta qualidade. Assim, ao minimizar o ruído e isolar frequências específicas, esses filtros viabilizam uma análise mais precisa e eficaz (KUTTRUFF, 2016).

Utilização de Filtros em Bandas de Oitava e 1/3 de Oitava

Filtros de banda de oitava e 1/3 de oitava são amplamente utilizados na análise acústica devido à sua capacidade de alinhar a percepção humana do som, que ocorre em bandas logarítmicas, com as normas internacionais estabelecidas, como as da ISO (CRAGGS, 1976). Esses filtros permitem uma análise que reflete melhor a percepção auditiva, facilitando a interpretação dos resultados e garantindo consistência em medições acústicas (BERANEK & MELLOW, 2012).

Os filtros de oitava dividem o espectro em bandas amplas, enquanto os filtros de 1/3 de oitava oferecem uma resolução mais detalhada, essencial para identificar picos específicos na resposta de frequência. Essa precisão é fundamental em projetos de ambientes acústicos, como salas de concerto e estúdios, onde a qualidade sonora depende da análise de detalhes finos (KUTTRUFF, 2016).

Além disso, filtros passa-baixa, que atenuam frequências acima de um ponto de corte, são usados para eliminar ruídos de alta frequência em sistemas de áudio. No conjunto, esses filtros viabilizam uma análise detalhada e controle acústico em aplicações que vão da acústica arquitetônica à avaliação de ruído ambiental e industrial.

METODOLOGIA

Esses métodos garantiram a obtenção de dados precisos e a análise detalhada das funções de transferência das cargas em um ambiente controlado.

Procedimento Experimental

O silenciador foi configurado para receber cargas específicas sob condições controladas, garantindo a consistência dos experimentos. Cada carga foi excitada com sinais em várias frequências para avaliar sua resposta em diferentes condições. Microfones posicionados estrategicamente captaram o som transmitido e refletido, e os dados foram sincronizados com os sinais de entrada para assegurar precisão. Com esses dados, as funções de transferência foram calculadas usando análise de frequência, possibilitando uma caracterização detalhada das propriedades de atenuação e transmissão do silenciado.

A validação da simulação utilizou o método de duas cargas com um tubo de impedância para obter a curva experimental de PT sonora do modelo com maior relevância geométrica. Foram aplicadas duas cargas distintas: uma reflexiva (tarugo de cobre de 25 mm) e outra absorvente (espuma *Sonex* de 35 mm), representando condições de reflexão e absorção.

Foram usados Microfones de alta precisão captaram o som transmitido e refletido pelas cargas, excitadas por geradores de sinais em diferentes frequências. A análise do som, realizada por analisadores de espectro e aprimorada com software de processamento de sinais, permitiu uma avaliação detalhada das propriedades acústicas das cargas. Os demais aparatos experimentais utilizados foram: um gerador de sinais *Brüel & Kjaer Power Amplifier Type 2734*, um amplificador de sinais Leacs CA500, uma placa de aquisição National Instruments NI

USB – 9162 e dois microfones PCB 377A21. Os dados captados pelos microfones foram transferidos para o software *Matlab*, utilizando uma placa de aquisição conectada a um computador. Nesse ambiente, realizou-se a modelagem matemática do método de duas cargas.

Os dados coletados foram analisados para avaliar a eficiência do silenciador na atenuação de frequências específicas. A análise revelou o comportamento do silenciador sob diferentes cargas e destacou as frequências mais efetivamente atenuadas. Com a aplicação de filtros de banda de oitava e 1/3 de oitava, foi possível identificar áreas de melhoria no projeto, permitindo ajustes precisos para otimizar seu desempenho e aumentar a eficiência.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Funções de Transferência das Cargas no Silenciador

Os microfones de entrada são o um e dois e os de saída são o três e quatro e a configuração de carga que define a impedância acústica, o esquema é ilustrado de acordo com a Figura 2.

As funções de transferência obtidas para cada uma das cargas no silenciador. Isso inclui a resposta em frequência das cargas em termos de transmissão sonora para diferentes frequências de entrada. Além disso, as funções de transferência estão dispostas na Figura 3 e a nomenclatura da função de transferência trata-se HXYZ sendo os dois primeiros algarismos designando a numeração (arábica) do microfone e os últimos algarismos (romano) define a o tipo de impedância acústica, sendo I tarugo de cobre com espuma e II somente o tarugo, ambos conforme a norma.

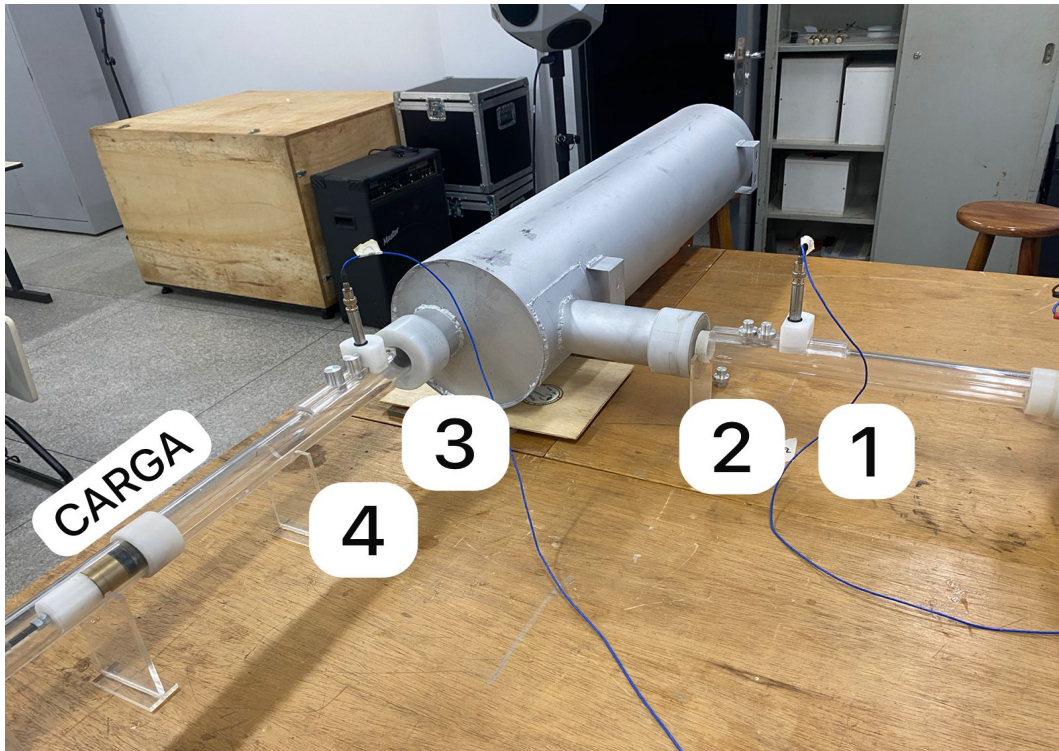
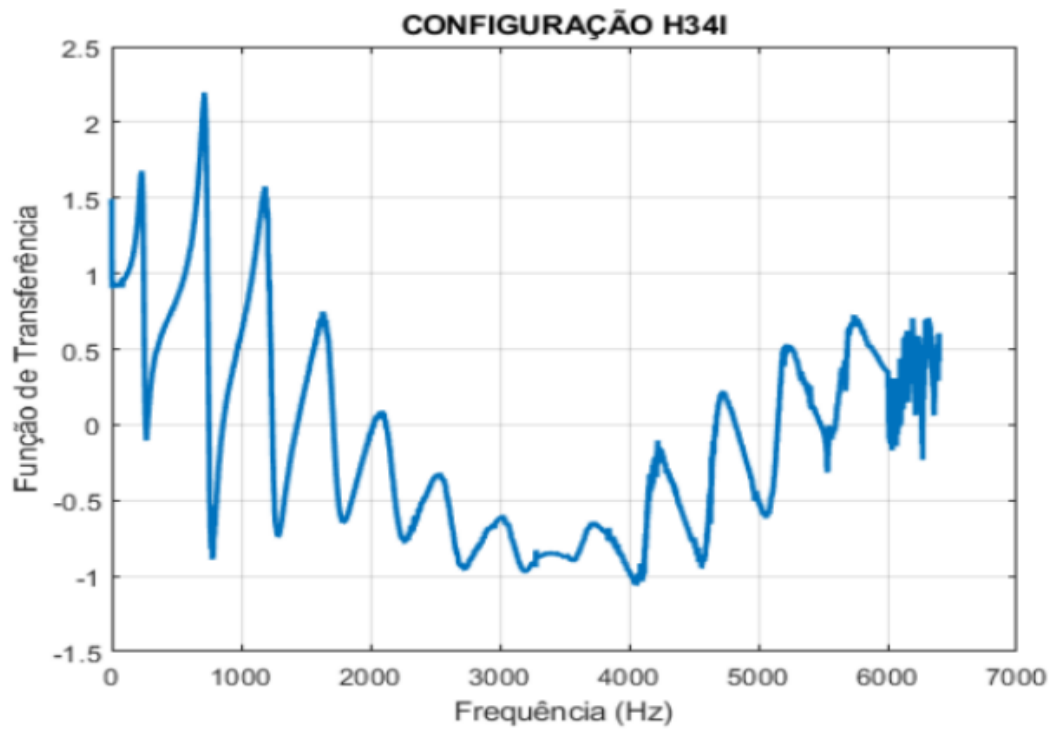
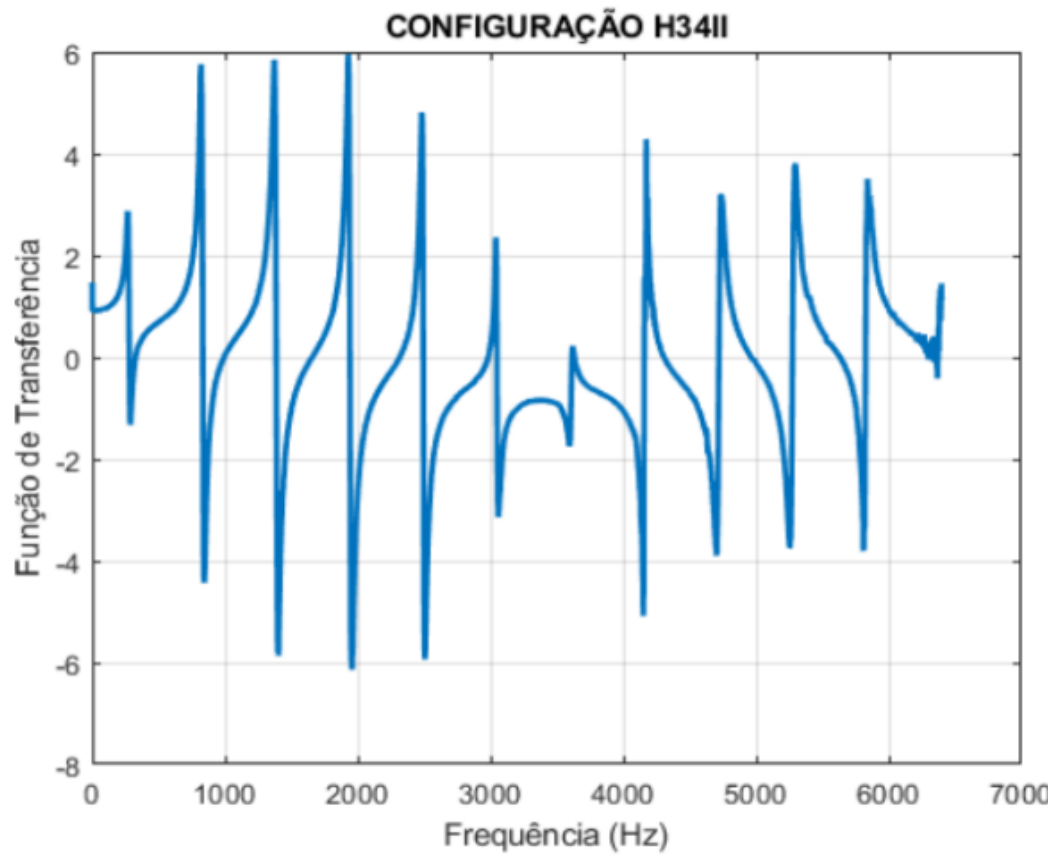


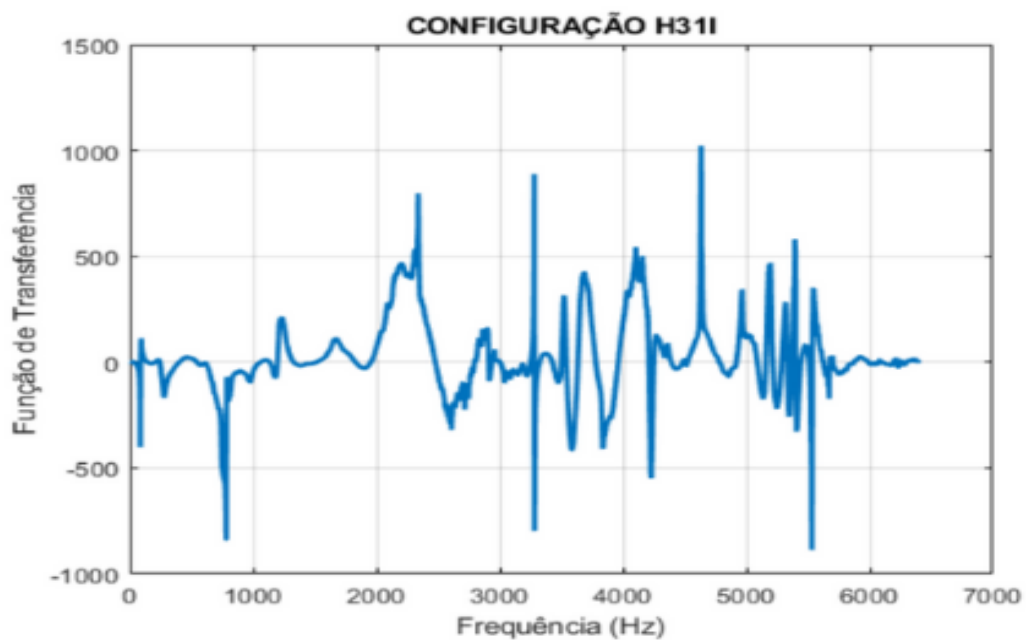
Figura 2. Silenciador configurações de ensaio



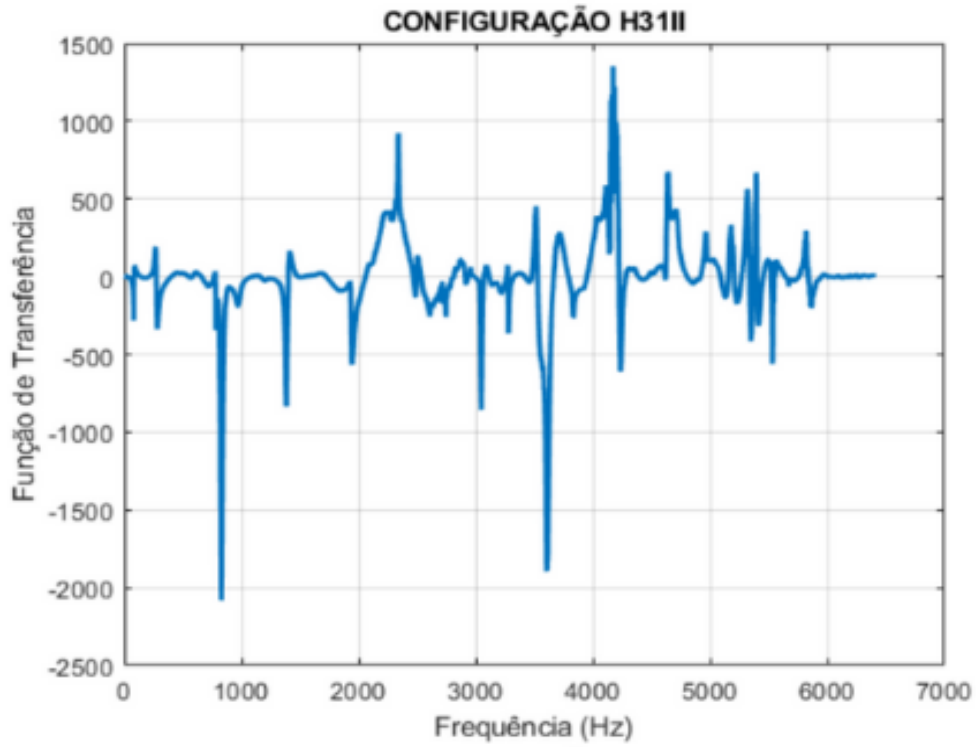
(a)



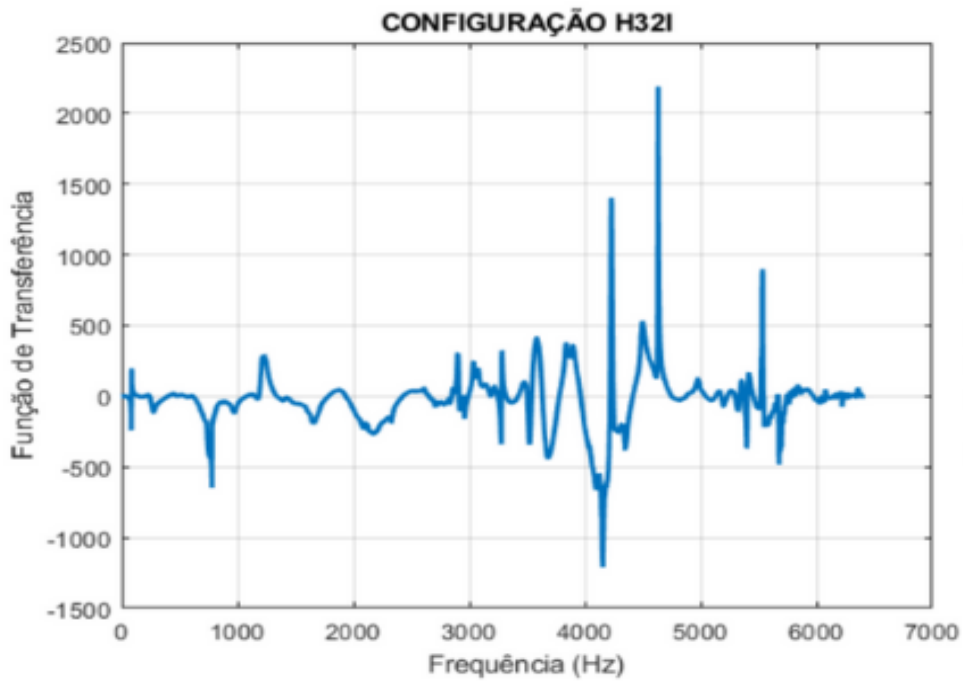
(b)



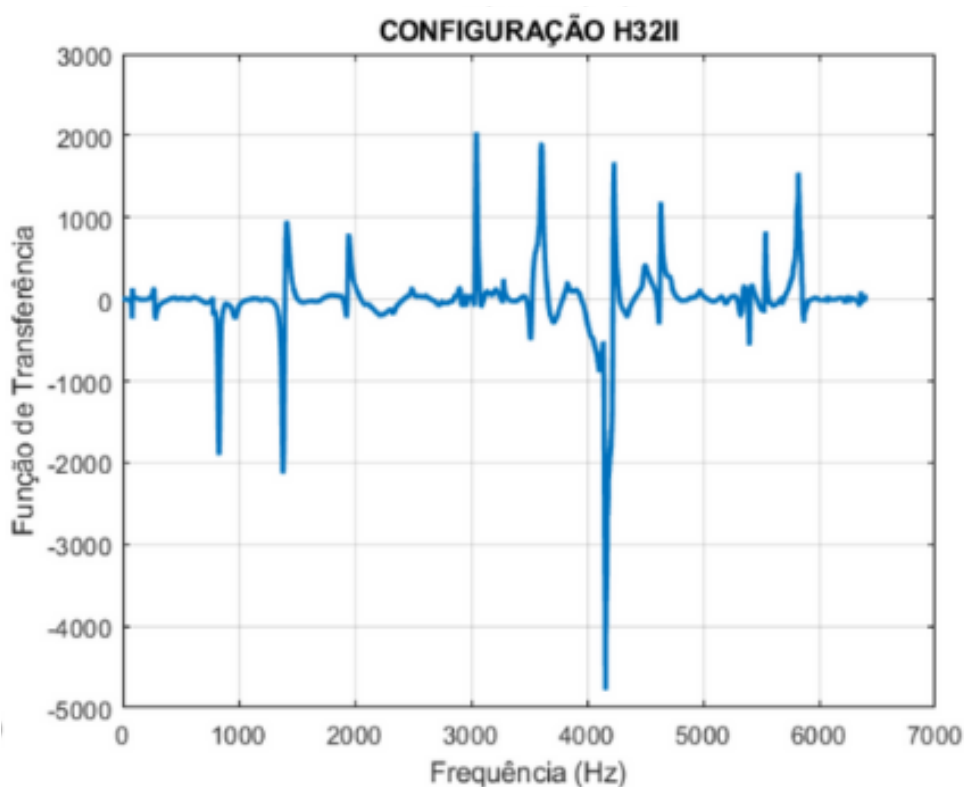
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3. Funções de transferência obtidas

Este estudo destacou a análise das funções de transferência, que representam a resposta acústica dos silenciadores de geradores. As seis funções de transferência capturaram a interação complexa entre reflexão, absorção e transmissão sonora, sendo diferenciadas pelo método das duas cargas, o que permitiu quantificar as propriedades de atenuação em ampla faixa de frequências. A comparação dessas funções com dados teóricos e normativos avaliou com precisão o desempenho acústico dos silenciadores, validando os modelos teóricos e reforçando a eficácia do método das duas cargas. Essa abordagem oferece uma base sólida para futuras aplicações práticas e otimizações em controle de ruído em ambientes industriais e ambientais.

Análise da Atenuação e Transmissão de Frequências

Os métodos experimentais para determinar a perda transmissão são regulamentados por normas, como a ISO 10534-2 para o método de duas fontes e a ASTM E2611 para o método de duas cargas, que visam garantir a precisão dos resultados. Neste trabalho, será adotado o método de duas cargas, valorizado por sua execução prática e pelo uso do Método da Matriz de Transferência (MMT), permitindo ampla adaptação para diversos tipos de filtros acústicos.

O objetivo principal é obter a PT de silenciadores sob incidência perpendicular de ondas sonoras. O método utiliza um sistema composto por dois tubos conectados por um silenciador, uma fonte sonora e quatro microfones (dois a jusante e dois a montante do silenciador), conforme configuração ASTM mostrada na Figura 4. Esses microfones medem a pressão sonora das ondas incidentes e refletidas antes e depois do elemento de teste, permitindo que as funções de transferência entre os pontos sejam calculadas com precisão para representar as propriedades acústicas do sistema. Normalmente um destes microfones é usado como referência em relação aos outros, para que as funções de transferência sejam medidas entre os microfones em cada teste. Essa função de transferência é um valor complexo que é definido por:

$$H_{n,ref} = G_{n,ref} / G_{ref,ref} = |H| e^{j\phi} = H_r + H_i \quad (4)$$

O índice *ref* é para denotar o microfone de referência e o *n* os demais microfones, onde a variável $G_{n,ref}$ representa o espectro de potência do sinal gerado pela pressão sonora no microfone na posição *n* em relação a *ref*, $G_{ref,ref}$ é o auto espectro de potência do sinal de pressão sonora no microfone de referência. Os métodos experimentais para determinar a PT são regulamentados por normas, como a ISO 10534-2 para o método de duas fontes e a ASTM E2611 para o método de duas cargas, que visam garantir a precisão dos resultados. Neste trabalho, será adotado o método de duas cargas, valorizado por sua execução prática e pelo uso do Método da Matriz de Transferência (MMT), permitindo ampla adaptação para diversos tipos de filtros acústicos. O objetivo principal é obter a PT de silenciadores sob incidência

perpendicular de ondas sonoras. O método utiliza um sistema composto por dois tubos conectados por um silenciador, uma fonte sonora e quatro microfones (dois a jusante e dois a montante do silenciador), conforme configuração ASTM mostrada na Figura 4. Esses microfones medem a pressão sonora das ondas incidentes e refletidas antes e depois do elemento de teste, permitindo que as funções de transferência entre os pontos sejam calculadas com precisão para representar as propriedades.

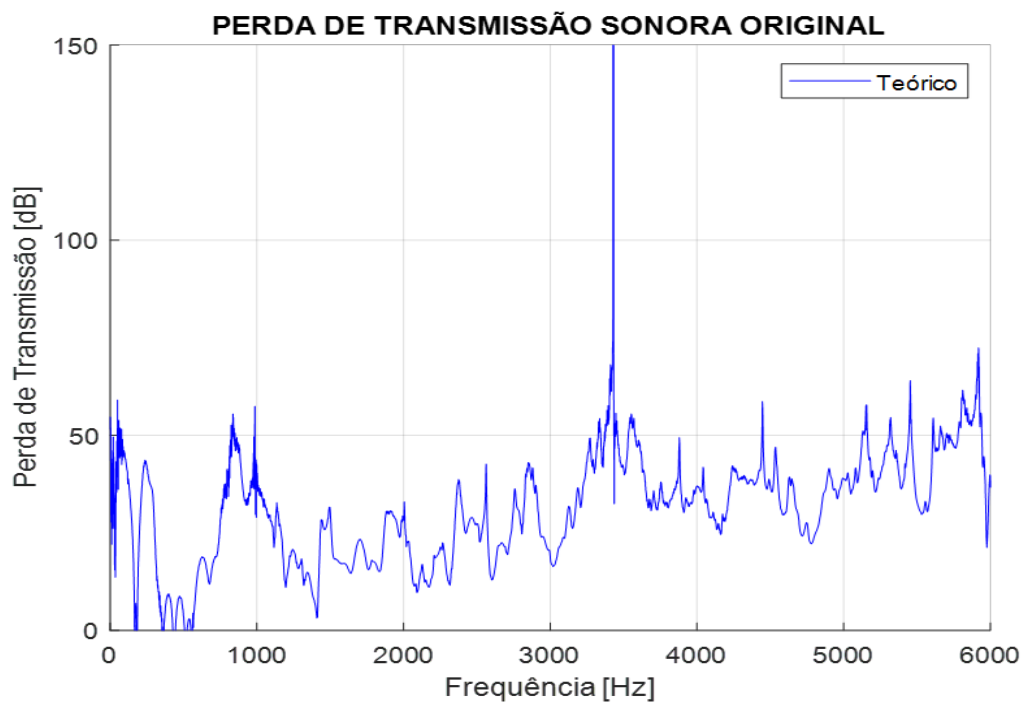


Figura 4. Perda de transmissão sonora original

Aplicação dos Filtros em Banda de Oitava e 1/3 de Oitava

Para avaliar a perda de transmissão sonora do silenciador, aplicamos filtros de oitava para analisar seu comportamento acústico em diferentes faixas de frequência. Com o método de duas cargas, coletamos os dados, aplicamos um filtro passa-baixa para remover ruídos e segmentamos o espectro com filtros de oitava, isolando as frequências de interesse. Os gráficos a seguir detalham a resposta acústica do silenciador em cada faixa de frequência.

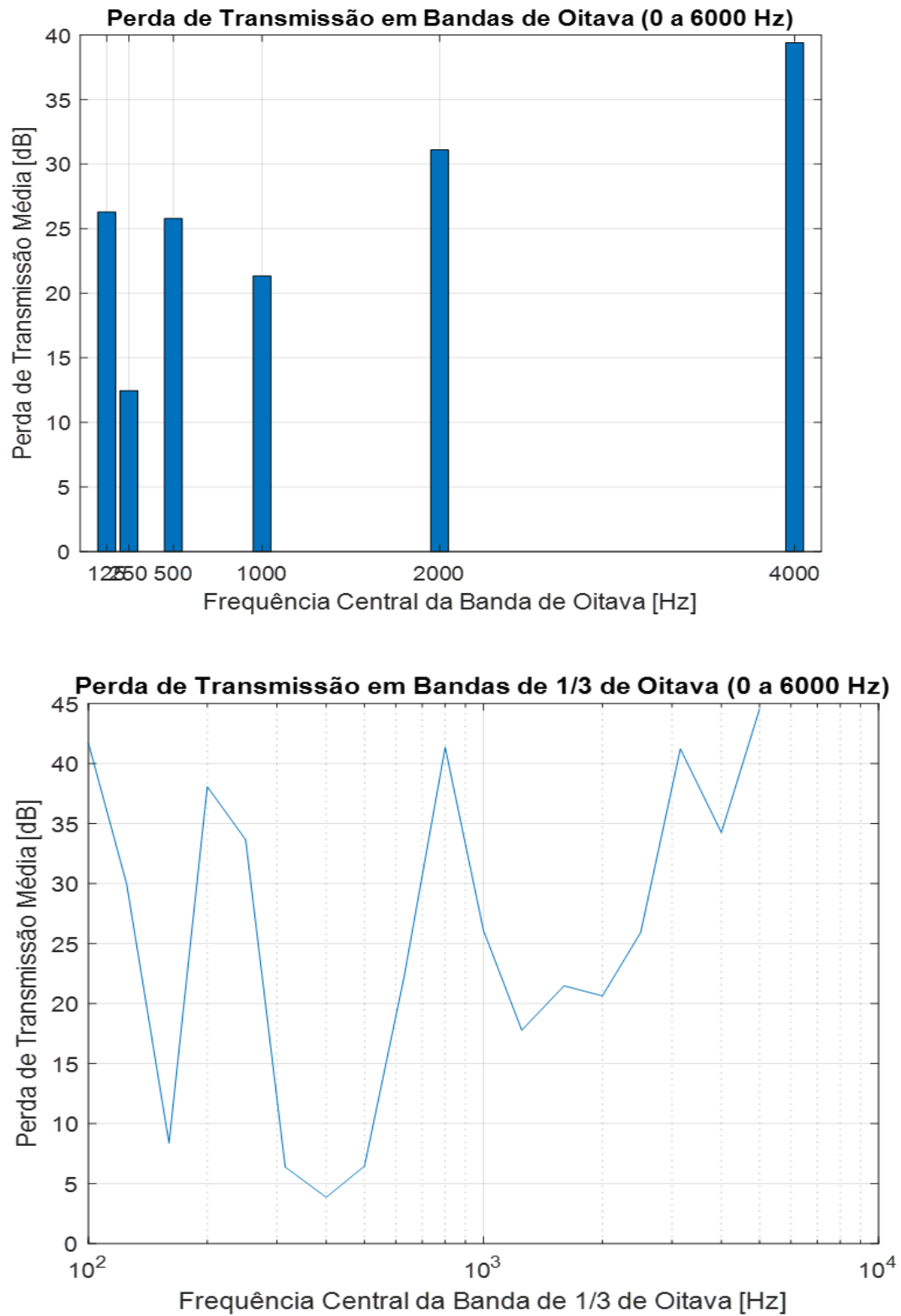
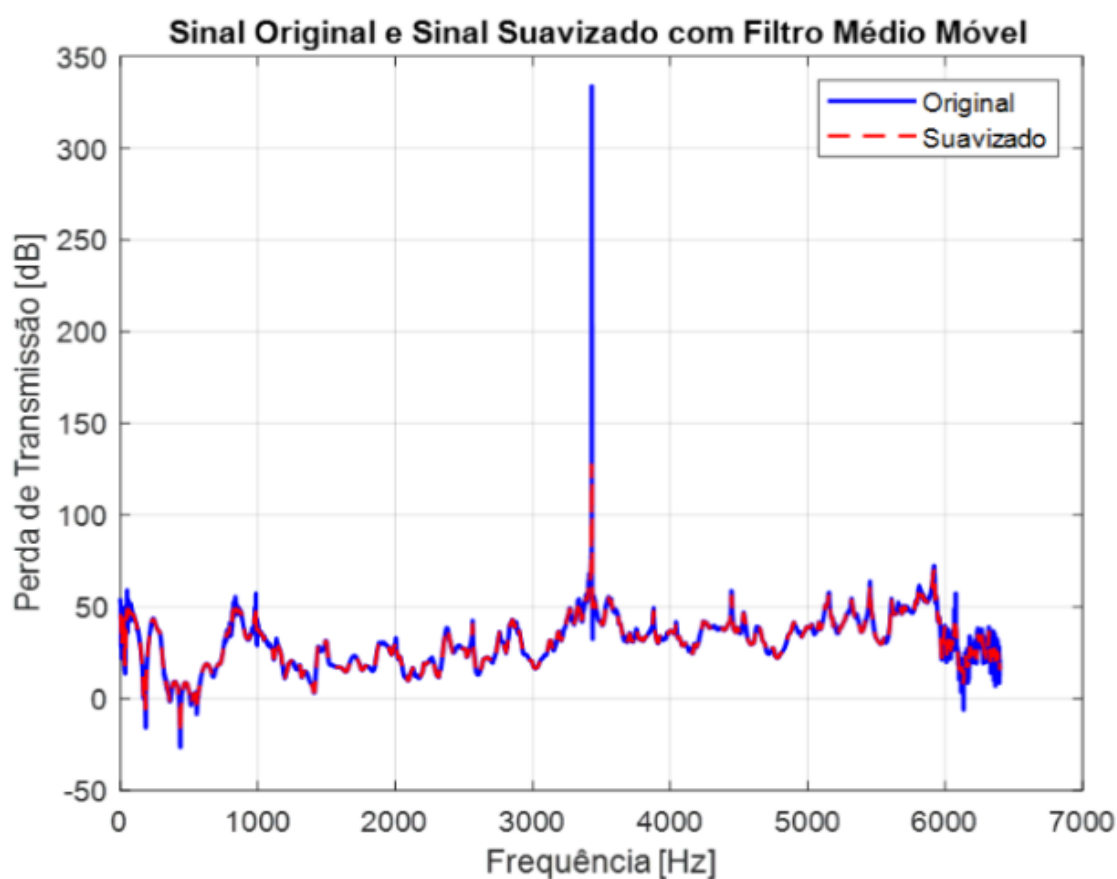


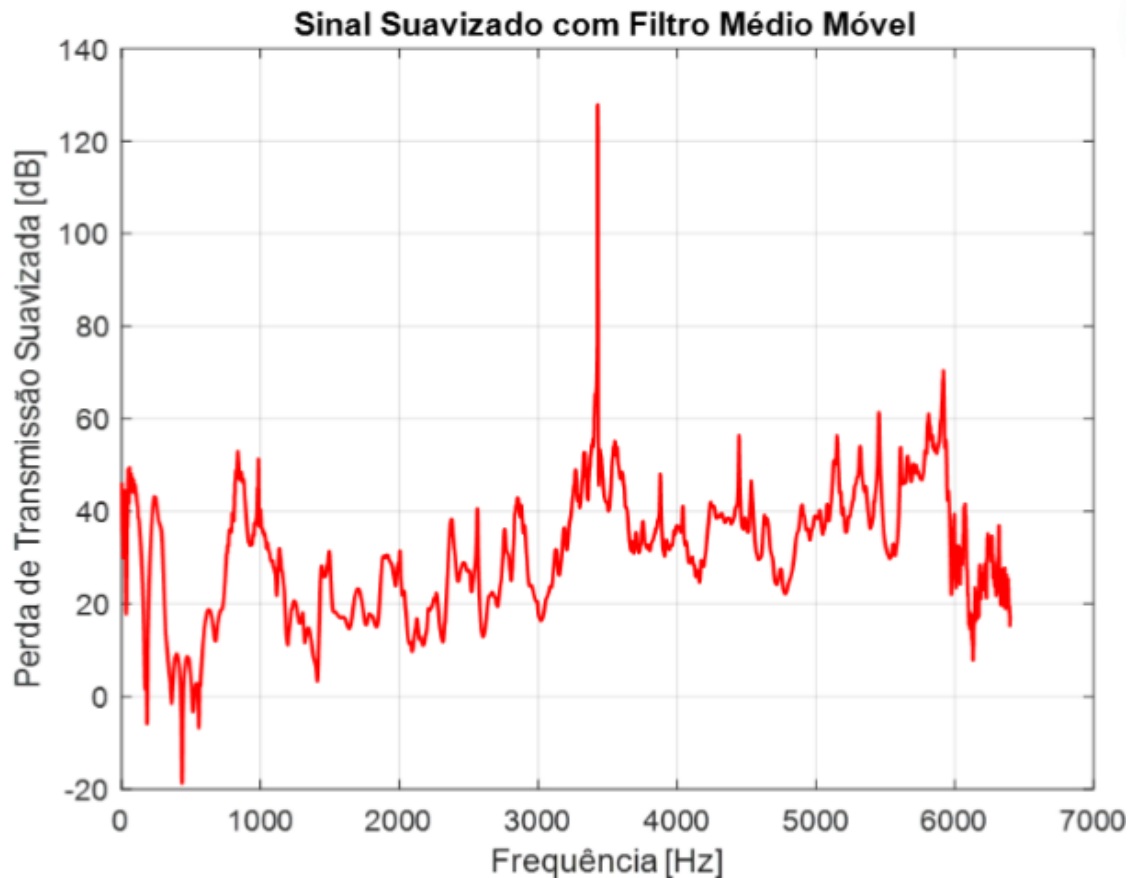
Figura 5. Perda de transmissão sonora em bandas de oitava e 1/3 de oitava

Filtro de passa-baixa

Para assegurar a precisão dos dados e eliminar interferências de alta frequência, aplicamos um filtro passa-baixa aos sinais de transmissão sonora. Esse filtro foi fundamental para reduzir ruídos e fornece uma representação clara da perda de transmissão nas frequências de interesse. Os dados brutos incluíam uma ampla gama de frequências, incluindo ruídos indesejados, mitigados pelo filtro passa-baixa com frequência de corte ajustada às características do silenciador. Os gráficos a seguir ilustram a perda de transmissão após o filtro, destacando a atenuação de ruídos de alta frequência e a resposta do silenciador nas frequências relevantes.



(a)



(b)

Figura 6. Perda de transmissão sonora atenuado com filtro de passa-baixa

CONCLUSÃO

Portanto, a aplicação de filtros de bandas de oitava e passa-baixa demonstrou-se eficaz na análise da perda de transmissão sonora em silenciadores. Os filtros de bandas de oitava permitiram avaliar o desempenho em diferentes faixas de frequência, destacando variações na atenuação sonora, em linha com a literatura e fornecendo insights para melhorar o design. O filtro passa-baixa foi essencial para eliminar ruídos de alta frequência, oferecendo uma visualização mais clara da resposta acústica nas frequências de interesse e facilitando a identificação de picos de ressonância e áreas de maior atenuação. Em conjunto, esses métodos

de filtragem proporcionaram uma análise abrangente e precisa, fundamentando futuras otimizações no design do silenciador.

Agradecimentos. Os autores agradecem à PRPI/UFG, ao PPGMEC/UFG e à CAPES pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM. Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties.
- ANSI. American National Standard: Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters. New York: Acoustical Society of America, 2013.
- BARRON, M. Auditorium acoustics and architectural design. 2. ed. London: Spon Press, 2003.
- BERANEK, L. L. Acoustics. 2. ed. New York: American Institute of Physics, 1996.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. Engineering noise control: theory and practice. 4. ed. London: Spon Press, 2009.
- BERANEK, L. L.; MELLOW, T. J. Acoustics: Sound Fields and Transducers. Academic Press, 2012.
- CHEN, L.; JI, Z. Computational fluid dynamics-based numerical analysis of acoustic attenuation and flow resistance characteristics of perforated tube silencers. Journal of Vibration and Acoustics, v. 136, n. 2, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026137/377949>.
- CRAGGS, A. A finite element method for damped acoustic systems: An application to evaluate the performance of reactive mufflers. Journal of Sound and Vibration, v. 48, n. 3, p. 377–392, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(76\)90063-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(76)90063-8).
- FILHO, João Mamede. Instalações elétricas industriais. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- FERNANDES, Ademir Edson; CAMARGO, José Rui. Estudo de caso de um sistema de cogeração em uma indústria farmacêutica. UNITAU, 2010. Disponível em: <http://periodicos.unitau.br/ojs2.2/index.php/exatas/article/viewFile/1280/859>. Acesso em: 2024.
- HAYKIN, S. Communication Systems. John Wiley & Sons, 2002.
- HARRIS, C. M. Handbook of noise control. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1978.
- ISO. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2.
- KINSLER, L. E. et al. Fundamentals of acoustics. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. Fundamentals of Acoustics. John Wiley & Sons, 1999.

KUTTRUFF, H. Room Acoustics. CRC Press, 2016.

MUNJAL, M. L. Acoustics of ducts and mufflers: With application to exhaust and ventilation system design. New York: John Wiley & Sons, 1987.

MASSERONI, James; OLIVEIRA, Cristina Maria de. Utilização de grupos geradores diesel em horário de ponta. FACOS - Faculdade cenequista de Osório, 2012.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. Signals and Systems. Prentice Hall, 1997.

PEREIRA, José Cláudio. Grupos motores geradores. Engenheiro José Cláudio. Disponível em: <http://www.joseclaudio.eng.br/geradores/PDF/diesel1.pdf>. Acesso em: 2024.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616575>

REVISÃO SISTEMÁTICA: METODOLOGIAS DE PROJETO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE *MUFFLER* EM GERADORES DIESEL: FOCO NA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA E TÉCNICAS DE VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Marcos V. S. Rodrigues¹, Marlipe G. Fagundes Neto¹

¹ EMC Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, PPGMEC Programa De Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás

Av. Esperança, C. Samambaia Al. Ingá, Prédio B5 CEP: 74.690-900 - Goiânia – Goiás – Brasil
silva_vinicius@discente.ufg.br, marlipe@ufg.br

Resumo. O ruído gerado por motores a diesel é um problema ambiental relevante em áreas urbanas e industriais. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as metodologias de projeto, simulação e otimização de *mufflers* em sistemas de exaustão de motores a diesel, com ênfase na Perda de Transmissão Sonora (TL) como variável principal. A análise bibliométrica realizada com o software Bibliometrix identificou um aumento significativo nas pesquisas desde 2010, destacando o uso do Método dos Elementos Finitos (FEM) como principal ferramenta de simulação. Além disso, métodos experimentais, como o método das duas cargas, são fundamentais para validar modelos teóricos. A discussão aborda as principais tendências, as lacunas na literatura, e propõe direções futuras, como a otimização multicritério e o uso de materiais avançados. Este estudo oferece uma base para o desenvolvimento de soluções acústicas eficazes e sustentáveis.

Palavras-chave: Silenciadores. Transmission loss. Análise bibliométrica.

INTRODUÇÃO

A poluição sonora causada por motores a diesel em veículos, geradores e equipamentos industriais é uma preocupação ambiental significativa que afeta o bem-estar humano e ecossistemas. O controle do ruído de exaustão é crucial para mitigar seus efeitos negativos, como estresse e problemas de saúde laborais e situacionais (FAN; GUO, 2016; FU et al., 2015).

Os *mufflers*, também conhecidos como silenciadores, são filtros acústicos instalados no escape de motores diesel para reduzir o ruído. Sua eficácia é definida pela perda transmissão

sonora (PT) e varia em função de fatores: geometria, materiais internos e características dos fluxos de exaustão do gás (WU et al., 1998; MUNJAL; RAO; SAHASRABUDHIE, 1987).

As metodologias para projetar, avaliar e otimizar *mufflers* evoluíram e agora incluem abordagens, simulações via elementos finitos e novas técnicas experimentais. Essas ferramentas permitem análise quanto à geometria e materiais, proporcionando avaliações precisas antes mesmo da fabricação do equipamento (BARBIERI; BARBIERI, 2006; CUMMINGS; CHANG, 1988).

Neste contexto, surgem diversas hipóteses que norteiam a análise e o desenvolvimento de silenciadores para sistemas de exaustão em grupos geradores motorização a diesel. Primeiro, a vazão de gases e o número de *Mach* são fatores que influenciam a perda de transmissão sonora em diferentes configurações de filtros acústicos, sendo o efeito dependente da velocidade (LEE; KIM, 2003). Além disso, o tipo mais indicado para aplicações de exaustão motores varia de acordo com a frequência do ruído e as restrições de espaço e pressão, o que justifica a escolha cuidadosa entre os tipos reativos, dissipativos ou híbridos (PEAT, 1988; FANG et al., 2017).

Outro ponto relevante no design de *mufflers* é a otimização de parâmetros como a relação entre comprimento e diâmetro, tipo e quantidade de materiais absorventes e o posicionamento e forma de componentes internos, variáveis que impactam o desempenho (KIRBY et al., 2014).

A perda de transmissão sonora (TL) conforme visto é amplamente utilizada como parâmetro acústico de *mufflers*, sendo essencial na mensuração de ruídos (JUN et al., 2015; WU et al., 1998). No entanto, questiona-se se é suficiente para essa análise ou se parâmetros adicionais, como a impedância acústica e os modos de propagação, poderiam oferecer uma avaliação mais completa.

A eficácia das técnicas de obtenção e validação da perda de transmissão é uma consideração central neste estudo. Métodos experimentais, como a análise em tubos de impedância, juntamente com simulações em softwares como *ANSYS* e *VIRTUAL.LAB*, são

amplamente utilizados, permitindo uma comparação precisa entre modelos e dados empíricos (JUN et al., 2015; WU et al., 1998). Por fim, a eficiência de um *muffler* é influenciada pela frequência do som, e otimizar o desempenho em uma faixa de frequências segue sendo um desafio importante (FAN; GUO, 2016). A relevância reside na necessidade de desenvolver soluções mais eficientes para a mitigação do ruído de motores a diesel, dado o impacto ambiental e social significativo que o problema representa. O desenvolvimento de silenciadores eficazes exige uma compreensão profunda, o que justifica a importância desta revisão. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre projeto, simulação e otimização de *mufflers*.

DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste artigo se baseia em uma fundamentação teórica robusta, que discute conceitos e avanços no projeto de silenciadores para sistemas de exaustão de motores a diesel. A seção é organizada para abordar as principais metodologias e técnicas aplicadas, enfatizando a Perda de Transmissão Sonora e os métodos utilizados para analisá-la.

3.1 Estudos preliminares e descobertas Significativas

Filtros acústicos tem sido um tema de estudo desde os trabalhos pioneiros de Munjal (1987), que forneceu uma base abrangente sobre a acústica de silenciadores. Ele apresentou modelos que descrevem a interação entre o design do silenciador e a atenuação, enfatizando a importância da geometria e materiais. Young e Crocker (1975) foram alguns dos primeiros a aplicar o MEF na predição da TL, estabelecendo a relevância das simulações acústicas. Com o avanço, Kang e Ji (2008) exploraram correções de comprimento em câmaras cilíndricas, contribuindo para a compreensão da geometria na TL. Estudos recentes, como Fu et al. (2020), utilizaram análises tridimensionais para investigar parâmetros, como a porosidade e o comprimento dos tubos.

Correntes teóricas e análise cronológica dos estudos

As abordagens de design de *mufflers* incluem silenciadores reativos, eficazes para baixas frequências (Peat, 1988), e dissipativos, que usam absorção para frequências altas (Fang et al., 2017), com a escolha dependente do tipo de ruído e sistema. Designs híbridos combinam ambas as características. A evolução metodológica começou nos anos 1970, quando Young e Crocker (1975) aplicaram elementos finitos para prever a perda de transmissão, estabelecendo as bases da acústica computacional. Cummings e Chang (1988) contribuíram com novas técnicas experimentais, enquanto nos anos 1990, Srinivasan e Munjal (1998) desenvolveram ferramentas para análises tridimensionais, integrando FEM e BEM.

A partir dos anos 2000, o foco se voltou para melhorias em modelagem computacional. Kang e Ji (2008) investigaram correções de comprimento acústico, e Barbieri e Barbieri (2006) destacaram a importância dessas modelagens. Desde 2010, o uso de simulações avançou, com Fan e Guo (2016) aplicando CFD e FEM para analisar interações fluido-acústicas, enquanto Fu et al. (2020) propôs melhorias e validações experimentais, fortalecendo essas metodologias.

Modelagem computacional e simulações

O FEM tem sido adotado para o design. Softwares como ANSYS e LMS Virtual.Lab são utilizados para prever a TL em estruturas, fornecendo análise antes da construção (BARBIERI; BARBIERI, 2006). A pesquisa de Fan e Guo (2016) destacou a importância de considerar o fluxo de gás na análise acústica, utilizando simulações acopladas de CFD e FEM para investigar a interação fluido-acústica afeta o desempenho. Além disso, Fu et al. (2020) realizaram estudos sobre como diferentes parâmetros geométricos, perfurações e a distribuição do absorvente, podem ser otimizados para maximizar a TL.

Técnicas experimentais e validação

As técnicas experimentais desempenham um papel essencial na validação de modelos numéricos. O método das duas cargas, regulamentado pela ASTM E2611 (2017), é uma das abordagens mais confiáveis para medir a TL. Este método envolve a colocação de cargas

reflexivas e absorventes em um tubo de impedância, permitindo a comparação direta com as simulações. A precisão na medição e o rigor experimental são cruciais para garantir que as simulações representem fielmente a realidade (MUNJAL; RAO; SAHASRABUDHIE, 1987).

Lacunas na pesquisa: desafios atuais e futuras direções

Simulações acopladas de CFD e FEM aprimoraram o entendimento da interação fluido-acústica, mas ainda apresentam limitações, especialmente para modelar gases de exaustão em tempo real. Fan e Guo (2016) sugerem integrar variáveis térmicas e de fluxo para melhorar a precisão e otimizar TL e eficiência do motor. O design de silenciadores exige equilíbrio entre redução de ruído, eficiência do motor e restrições ambientais, com algoritmos genéticos e otimização por enxame em destaque. O futuro da área inclui maior integração entre simulações e testes experimentais, além do uso de novos materiais e designs adaptáveis (Craggs, 1976).

METODOLOGIA

Escolha do método revisão

A metodologia adotada neste estudo foi uma revisão bibliográfica sistemática para mapear a produção científica sobre o tema, identificando tendências e principais contribuições. Esse método é ideal diante do vasto volume de publicações. A fim de assegurar precisão e profundidade, a análise foi realizada com *software* especializado, que facilita o processamento de grandes volumes de dados e modulação de indicadores.

Dados de entrada

Os dados foram coletados para garantir a máxima abrangência. No inicial, os critérios de seleção priorizaram a quantidade de artigos retornados pelas palavras-chave, sem aplicar filtros qualitativos preliminares, a fim de capturar um volume significativo de publicações

pertinentes ao tema. A coleta foi realizada nas bases *Scopus* e *Web of Science*, reconhecidas pela sua importância em publicações e científicas nas áreas engenharias e ciências aplicadas.

A estratégia de busca foi dividida em duas etapas: a primeira etapa consistiu em uma busca ampla com os termos – “*mufflers*” AND “*transmission*” AND “*loss*” – resultou em aproximadamente 1200 artigos. Em seguida, a busca foi refinada com termos mais específicos – “(*muffler OR silencer*) AND *acoustics* AND (*transmission AND loss*) AND (*finite AND element*) AND (*experimental*)” – resultou em 270 artigos altamente relevantes e alinhados aos objetivos da revisão. Este refinamento foi essencial para direcionar o foco para estudos que combinassem métodos experimentais e de elementos finitos em silenciadores. Por fim, todos os artigos selecionados foram exportados no formato *BibTeX*, para análise subsequente.

Processamento de dados

O processamento seguiu um fluxo estruturado com ferramentas específicas para cada etapa para organizar, analisar e sintetizar as informações dos artigos:

A coleta dos dois conjuntos de palavras-chave em formato *BibTeX* foram armazenadas em (*C:|Users|marco|OneDrive|Documentos|data*) e processados no *R Studio* com o pacote *Bibliometrix*. Um código específico, desenvolvido conforme Troysi (2024) e ilustrado na Figura 1, realizou as seguintes etapas: carregar a biblioteca, definir o diretório, converter em data frames, visualizar e mesclar as bases do *Scopus* e *Web of Science* removendo duplicatas, conferir o frame, exportar com a biblioteca *openxlsx*, por fim, abrir o *Biblioshiny*.

Em seguida, na interface *Biblioshiny*, integrada ao *Bibliometrix* e rica em recursos bibliométricos, foram exploradas visualizações detalhadas, destacando palavras-chave relevantes, proporcionando uma visão quantitativa.

No *Biblioshiny*, foi feita uma seleção preliminar, utilizando o critério de número total de citações para construir uma base. Priorizando os mais citados permitiu consolidar referências fundamentais, históricos, onde o conhecimento se mantém estável no tempo.

Observou-se, ainda, uma evolução entre os artigos, abrangendo até 50 anos de pesquisa o que reforçou a escolha.

```
library(bibliometrix)
setwd("~/Data")
getwd()
S <- convert2df("scopus.bib", dbsource = "scopus", format = "bibtex")
View(S)
W <- convert2df("savedrecs.bib", dbsource = "isi", format = "bibtex")
View(W)
Database <- mergeDbSources(S, W, remove.duplicated = TRUE)
View(Database)
dim(Database)
library(openxlsx)
write.xlsx(Database, file = "Database.xlsx")
results <- biblioAnalysis(Database)
summary(results, k = 10, pause = FALSE)
biblioshiny()
```

Figura 1. Código de programação aplicado no RS Studio (TROYSI, 2024)

Saída de dados

Finalmente, os artigos mais citados no *Biblioshiny*, que oferece acesso direto ao link com o DOI, assim foram feitos os downloads dos quarenta itens em PDF. Ressalta-se que alguns, estavam indisponíveis nos Periódicos CAPES, foram desconsiderados.

A bibliografia foi organizada no *Mendeley*, e depois exportadas em formato ABNT. Embora a revisão inclua artigos atuais, apresenta a limitação de não captar totalmente novas tendências, pela ausência de um filtro temporal nas palavras-chave. Portanto, os resultados dessa metodologia sustentam o desenvolvimento teórico e a conclusão deste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados bibliométricos permitiram a criação de gráficos de redes de coautoria, mapas de colaboração entre países e análise temporal dos temas. Foram identificados os autores mais consagrados e mais produtivos na área (Figura 2).

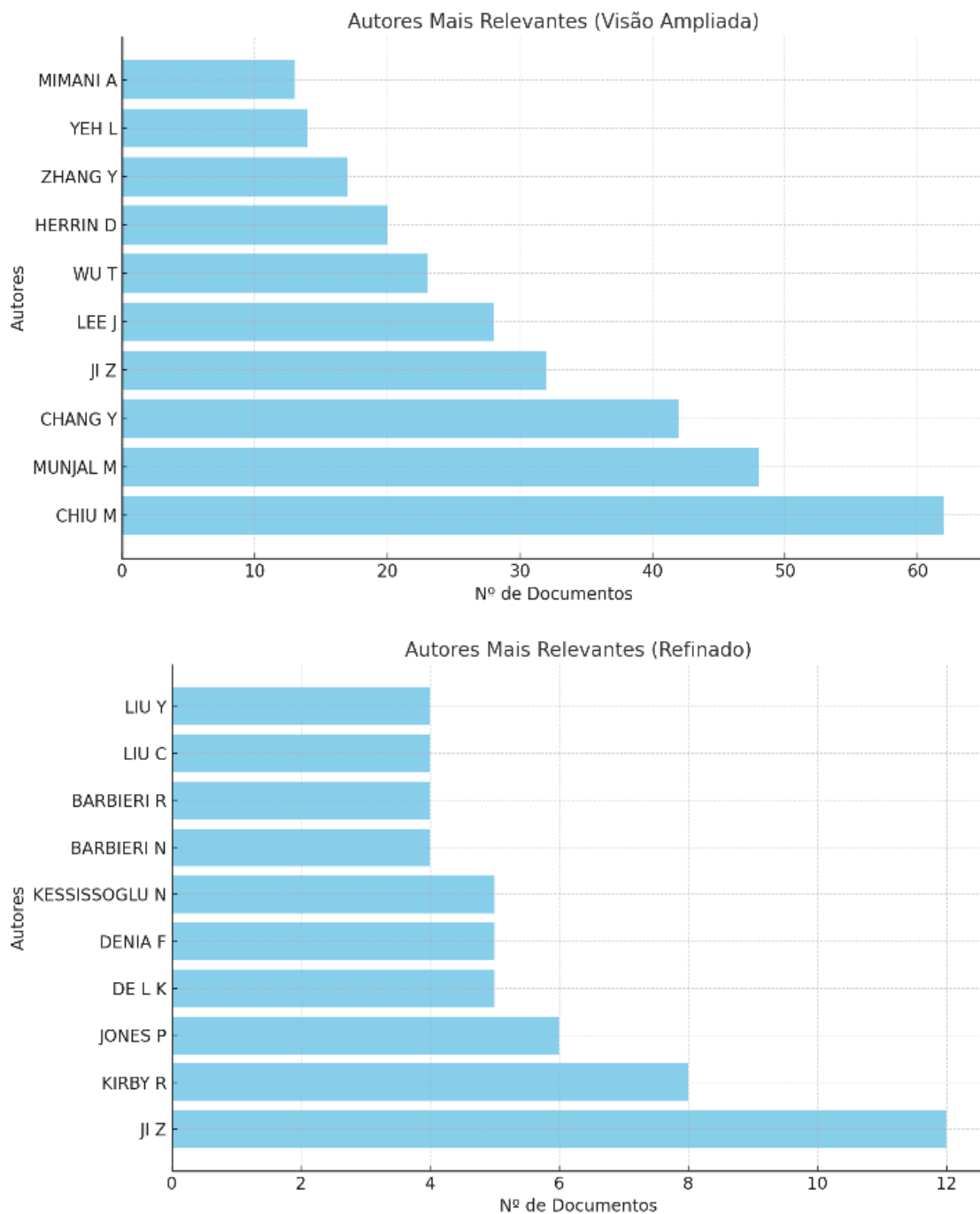


Figura 2. Autores relevantes para dois conjuntos de palavra-chave (adaptado Biblioshiny)

Além disso, as principais revistas que publicam temas correlatos (Figura 3), ambas a figuras contemplando os dois grupos de palavras-chave.

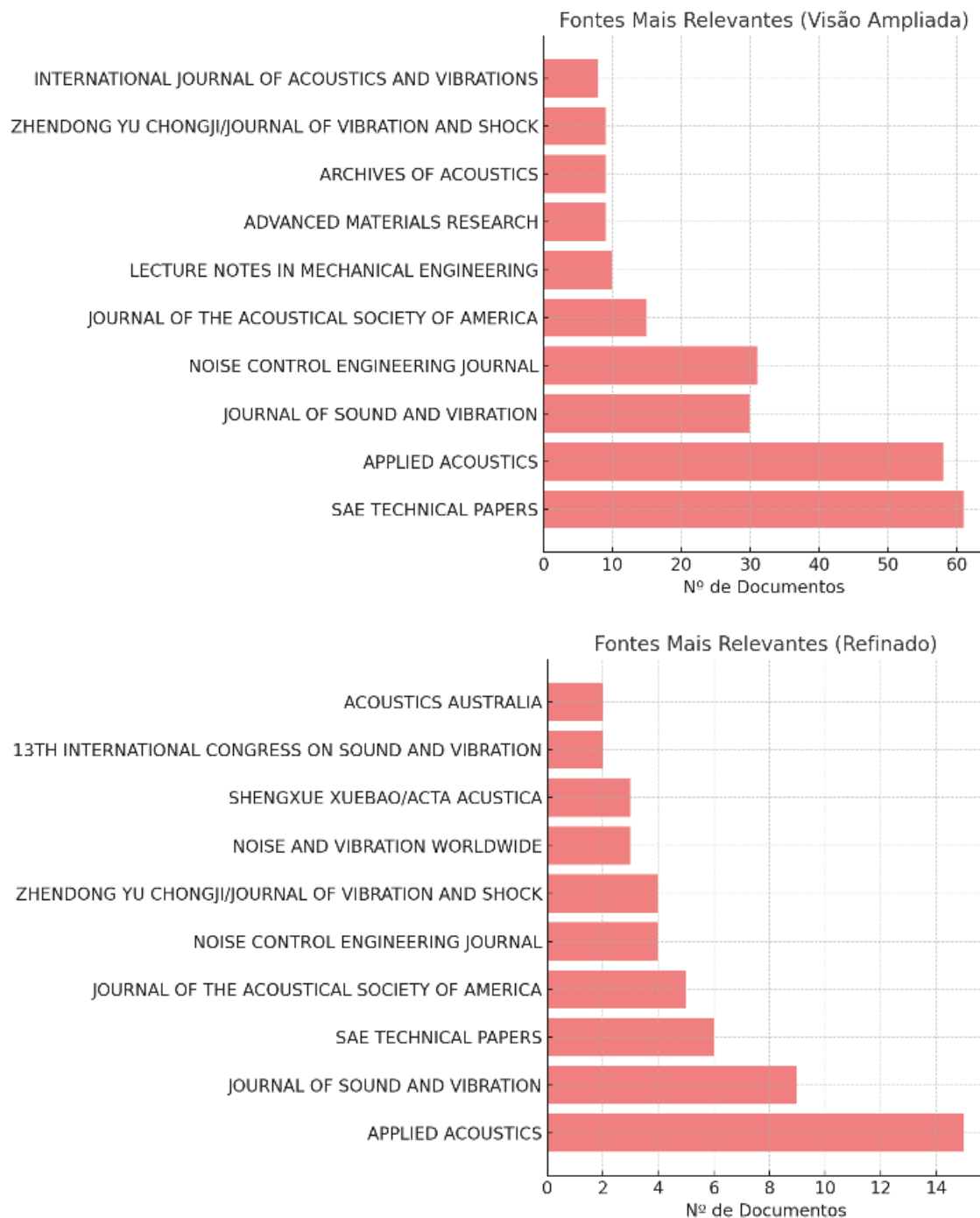


Figura 3. Revistas importantes para dois conjuntos de palavra-chave (adaptado Biblioshiny)

Durante a organização, foi gerada uma visualização parcial. Em seguida, foram realizadas duas extrações com os mais citados Tabela 1, busca ampla e Tabela 2, busca refinada.

Tabela 1. Artigos busca ampla (adaptado Biblioshiny)

N	ARTIGO	Citações
1	SULLIVAN J, 1978, J ACOUST SOC AM	302
2	SULLIVAN J, 1979, J ACOUST SOC AM	130
3	YOUNG C, 1975, J ACOUST SOC AM	128
4	BARBIERI R, 2006, APPL ACOUST	124
5	PEAT K, 1988, J SOUND VIB	118
6	TAO Z, 2003, SAE TECHNICAL PAPER	114
7	MUNJAL M, 1987, J SOUND VIB-a	113
8	WU T, 1998, J SOUND VIB	108
9	JI Z, 1994, J SOUND VIB	107
10	LEE J, 2009, INT J NUMER METHODS ENG	102
11	SEYBERT A, 1987, J VIB ACOUST TRANS ASME	91
12	JAYARAMAN K, 1981, J ACOUST SOC AM J S	91
13	MEHDIZADEH O, 2005, APPL ACOUST	90
14	BIES D, 2017, ENGINEERING NOISE CONTROL	89
15	WU T, 1996, J VIB ACOUST TRANS ASME	89
16	CHENG C, 1991, J SOUND VIB	88
17	LEE J, 2003, APPL ACOUST	85
18	Craggs A, 1976, J SOUND VIB	84
19	CUMMINGS A, 1988, J SOUND VIB	81
20	HUNG T, 2014, CONSTR BUILD MATER	78

A seleção final consistiu na leitura, seguida da elaboração de resumos. A partir disso, foi realizada uma análise crítica qualitativa, na qual dos quarenta artigos, vinte e dois foram selecionados por terem relação com o conteúdo objetivado. Além desses, foram incorporados cinco artigos previamente escolhidos permitindo a verificações conceitual de hipóteses.

Os resultados conceituais soluções às perguntas levantadas, com implicações importantes para a pesquisa. Os estudos de Fan e Guo (2016) mostram que a vazão de gases e o

número de Mach afetam significativamente a perda de transmissão sonora (TL), influenciando o desempenho acústico. Nessas condições, simulações acopladas de CFD e FEM são essenciais para capturar esses efeitos dinâmicos, especialmente alta velocidade, onde a interação dos fluxos de gás e a acústica torna-se mais complexa. Para motores a diesel, os *mufflers* híbridos, que combinam elementos reativos e dissipativos, são os mais eficazes. Como demonstrado por Fang et al. (2017), esses designs proporcionam uma atenuação equilibrada de ruído, sendo particularmente adequados para essa aplicação. Além disso, a relação comprimento-diâmetro e a distribuição de materiais absorventes são críticos que devem ser otimizados para alcançar o desempenho acústico.

Tabela 2. Artigos busca refinada (adaptado Biblioshiny)

N	ARTIGO	Citações
1	SELAMET A, 1997, J SOUND VIBR	87
2	DENIA F, 2007, J SOUND VIBR	60
3	KIRBY R, 2007, J ACOUST SOC AM	59
4	SHI X, 2017, APPL ACOUST	55
5	GERGES S, 2005, J BRAZ SOC MECH SCI ENG	55
6	KIRBY R, 2001, J SOUND VIBR	45
7	KIRBY R, 2003, J ACOUST SOC AM	42
8	VIJAYASREE N, 2012, J SOUND VIBR	42
9	LIU C, 2014, J VIB ACOUST-TRANS ASME	38
10	DE L K, 2011, APPL ACOUST	35
11	KANG Z, 2008, J SOUND VIBR	35
12	SHAABAN A, 2022, APPL ACOUST	23
13	FU J, 2015, ADV MECH ENG	21
14	FAN W, 2016, SHOCK VIB	21
15	KIRBY R, 2014, J SOUND VIBR	20
16	KIRBY R, 2005, J ACOUST SOC AM	20
17	DU J, 2018, APPL ACOUST	18
18	FANG Z, 2017, APPL ACOUST	17
19	ABBAD A, 2018, SMART MATER STRUCT	17
20	CHEN Y, 2015, J MAR SCI TECHNOL	16

Na validação de resultados, o método das duas cargas é amplamente aceito na comunidade científica e se mostra altamente eficaz. Essa abordagem é importante para assegurar a precisão dos dados obtidos. A análise de frequências revela que os projetos de silenciadores para motores a diesel focam em frequências entre 50 Hz e 3.000 Hz, consideradas as mais relevantes para essa aplicação, como discutido por Munjal (1987).

CONCLUSÕES

Portanto, a evolução das metodologias de projeto e otimização de *mufflers* para motores a diesel, com foco na Perda de Transmissão Sonora (TL) como principal variável de análise. A análise bibliométrica revelou um aumento expressivo na produção científica sobre esse tema a partir 2010, impulsionado por avanços em simulações numéricas e pelas demandas de regulamentações ambientais mais rígidas. Entre as técnicas de modelagem, o Método dos Elementos Finitos (FEM), acoplado à CFD, se destaca pela precisão na previsão da TL, enquanto validações experimentais, como o método das duas cargas, reforçam a confiabilidade dos modelos. O estudo indica que os silenciadores são os mais eficazes para motores a diesel.

Além disso, Instituições de renome, como a Universidade de Xangai Jiao Tong, a Universidade de Tecnologia de Delft e o Instituto de tecnologia de Massachusetts, desempenham um papel central na pesquisa de *mufflers*, colaborando com a indústria para soluções práticas. Autores influentes, como Barbieri e Barbieri (2006), Kang e Ji (2008), Munjal (1987) e Peat (1988), continuam a moldar esse campo. Enquanto isso colaborações internacionais refletem sua relevância global, a revisão também aponta a necessidade de estudos sobre otimização multicritério. Estes devem equilibrar atenuação, contrapressão e eficiência térmica.

Agradecimentos. Os autores agradecem à PRPI/UFG, ao PPGMEC/UFG e à CAPES pelo apoio acadêmico e financiamento, e à BRG Geradores pelo suporte técnico e incentivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIERI, R.; BARBIERI, N. Finite element acoustic simulation-based shape optimization of a muffler. *Applied Acoustics*, v. 67, n. 4, p. 346–357, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.06.007>.
- CHEN, L.; JI, Z. Computational fluid dynamics-based numerical analysis of acoustic attenuation and flow resistance characteristics of perforated tube silencers. *Journal of Vibration and Acoustics*, v. 136, n. 2, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026137/377949>.
- CHENG, C. Y. R.; SEYBERT, A. F.; WU, T. W. A multidomain boundary element solution for silencer and muffler performance prediction. *Journal of Sound and Vibration*, v. 151, n. 1, p. 119–129, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90655-4](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90655-4).
- CRAGGS, A. A finite element method for damped acoustic systems: An application to evaluate the performance of reactive mufflers. *Journal of Sound and Vibration*, v. 48, n. 3, p. 377–392, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(76\)90063-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(76)90063-8).
- CUMMINGS, A.; CHANG, I. J. Sound attenuation of a finite length dissipative flow duct silencer with internal mean flow in the absorbent. *Journal of Sound and Vibration*, v. 127, n. 1, p. 1–17, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(88\)90347-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(88)90347-1).
- DENIA, F. D.; SELAMET, A.; FUENMAYOR, F. J.; KIRBY, R. Acoustic attenuation performance of perforated dissipative mufflers with empty inlet/outlet extensions. *Journal of Sound and Vibration*, v. 302, n. 4–5, p. 1000–1017, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.01.005>.
- DU, J.; LIU, Y.; WANG, Y.; WANG, G. Vibro-acoustic analysis of an elastically restrained plate duct silencer backed by irregular acoustical cavity. *Applied Acoustics*, v. 138, p. 60–71, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.03.004>.
- FAN, W.; GUO, L. X. An Investigation of Acoustic Attenuation Performance of Silencers with Mean Flow Based on Three-Dimensional Numerical Simulation. *Shock and Vibration*, v. 2016, n. 1, p. 6797593, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/6797593>.
- FANG, Z.; JI, Z. L.; LIU, C. Y. Acoustic attenuation analysis of silencers with multi-chamber by using coupling method based on subdomain division technique. *Applied Acoustics*, v. 116, p. 152–163, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.019>.
- FU, J.; CHEN, W.; TANG, Y.; YUAN, W.; LI, G.; LI, Y. Modification of exhaust muffler of a diesel engine based

on finite element method acoustic analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 7, n. 4, p. 1–11, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814015575954>.

GERGES, S. N. Y.; JORDAN, R.; THIEME, F. A.; BENTO COELHO, J. L.; ARENAS, J. P. Muffler modeling by transfer matrix method and experimental verification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 27, n. 2, p. 132–140, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-58782005000200005>.

JI, Z.; MA, Q.; ZHANG, Z. Application of the Boundary Element Method to Predicting Acoustic Performance of Expansion Chamber Mufflers With Mean Flow. *Journal of Sound and Vibration*, v. 173, n. 1, p. 57–71, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1217>.

JU, H. D.; LEE, S. B.; JEONG, W. B.; LEE, B. H. Design of an acoustic enclosure with duct silencers for the heavy-duty diesel engine generator set. *Applied Acoustics*, v. 65, n. 4, p. 441–455, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2003.10.007>.

KANG, Z. X.; JI, Z. L. Acoustic length correction of duct extension into a cylindrical chamber. *Journal of Sound and Vibration*, v. 310, n. 4–5, p. 782–791, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.11.005>.

KIRBY, R.; AMOTT, K.; WILLIAMS, P. T.; DUAN, W. On the acoustic performance of rectangular splitter silencers in the presence of mean flow. *Journal*.

KUMAR, K. M.; MUNJAL, M. L. Direct estimation and experimental validation of the acoustic source characteristics of two-cylinder naturally aspirated diesel engine exhaust system. *Applied Acoustics*, v. 135, p. 70–84, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.022>.

LEE, J. H.; KIM, J. Study on sound transmission characteristics of a cylindrical shell using analytical and experimental models. *Applied Acoustics*, v. 64, n. 6, p. 611–632, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(02\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(02)00138-X).

MEHDIZADEH, O. Z.; PARASCHIVOIU, M. A three-dimensional finite element approach for predicting the transmission loss in mufflers and silencers with no mean flow. *Applied Acoustics*, v. 66, n. 8, p. 902–918, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.11.008>.

MUNJAL, M. L.; RAO, K. N.; SAHASRABUDHE, A. D. Aeroacoustic analysis of perforated muffler components. *Journal of Sound and Vibration*, v. 114, n. 2, p. 173–188, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(87\)80146-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(87)80146-3).

MUSHIRI, T.; MADZIRO, N.; MBOHWA, C. Design of an Optimum Acoustic Enclosure for an Open Frame

Diesel Generator. *Procedia Manufacturing*, v. 8, p. 424–431, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.054>.

PEAT, K. S. A numerical decoupling analysis of perforated pipe silencer elements. *Journal of Sound and Vibration*, v. 123, n. 2, p. 199–212, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(88\)80106-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(88)80106-8).

SHAABAN, A. M.; ANITESCU, C.; ATROSHCHENKO, E.; RABCZUK, T. An isogeometric Burton-Miller method for the transmission loss optimization with application to mufflers with internal extended tubes. *Applied Acoustics*, v. 185.

TROYSI, Fernanda Dias. Tópico X: Análise Bibliométrica. Aula apresentada na disciplina de Metodologia de Pesquisa, Universidade Federal de Goiás, 2024/2.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616623>

ESCOAMENTO EM TORNO DE UM ROTOR “S” ESTÁTICO E 2D, UTILIZANDO OS MÉTODOS DE FRONTEIRA IMERSA E PSEUDOSPECTRAL DE FOURIER

Mylena C. Silva¹, Andreia A. Nascimento^{1,2}

¹*Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (LATEF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), Av. Esperança, Al. Ingá, Prédio: B5, Campus Samambaia, CEP: 74690-900, Goiânia, Goiás, Brasil.*

mylena.carvalho@discente.ufg.br, aanascimento@ufg.br

²*Centro de Excelência em Tecnologias de Hidrogênio e Energia Sustentável (CEHTES), Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Goiás, Brasil.*
aanascimento@ufg.br

Resumo. Os rotores Savonius são turbinas eólicas de eixo vertical caracterizadas pela sua forma em "S", baixa velocidade, baixo ruído e capacidade de partida eficiente. Compostas por duas pás semicilíndricas, a rotação é iniciada pela interação do fluido com as superfícies das pás, gerando torques combinados. Para melhorar a compreensão do comportamento dessa turbina, este estudo apresenta um modelo simplificado do escoamento ao redor do rotor estático, utilizando o Método Pseudospectral de Fourier acoplado ao Método de Fronteira Imersa. O modelo assume um fluido incompressível, Newtoniano, com propriedades constantes, sem transferência de calor ou efeitos gravitacionais, e uma análise bidimensional. Os resultados, baseados em $Re_D = 200$, avaliam o escoamento sobre o rotor estático e mostram que a pá de avanço tem um coeficiente de arrasto maior, em comparação com a pá de retorno. Esse comportamento sugere a direção de rotação do rotor sob as condições de escoamento pré-estabelecidas em uma rotação livre.

Palavras-chave: Rotor Savonius. Turbina de Eixo Vertical. Dinâmica de Fluidos Computacional. Fronteira Imersa. Fourier Pseudospectral.

INTRODUÇÃO

As turbinas eólicas convertem a energia do vento em eletricidade e existem diversos modelos e tamanhos disponíveis. A principal distinção entre esses modelos está na orientação do eixo do rotor, podendo ser turbinas de eixo vertical (VAWT) ou de eixo horizontal (HAWT). A turbina Savonius, um modelo de VAWT desenvolvido inicialmente por Savonius (1931), é reconhecida por suas pás em formato de "S", que operam utilizando tanto as superfícies

côncavas quanto convexas para capturar e converter a energia do vento (MANWELL; McGOWAN; ROGERS, 2010).

Apesar de seu design característico, várias modificações têm sido propostas para melhorar sua eficiência (SOBCZAK et al., 2020; LEE; LEE; LIM, 2016). As pesquisas em torno das turbinas Savonius têm focado em diversos aspectos, como a análise das taxas de sobreposição em turbinas de rotação livre (HASSANZADEH; MOHAMMADNEJAD, 2019), a flexibilidade das pás (MARINIĆ-KRAGIĆ; VUČINA; MILAS, 2019; ALOM; SAHA, 2019a) e os efeitos de pás fixas e flexíveis (MARCHEWKA et al., 2021). Além disso, estudos têm explorado lâminas elípticas (MRIGUA et al., 2020) e estágios sobrepostos por meio de simulações 3D (ALOM; SAHA, 2019b).

Embora simulações 3D e modelos de turbulência sejam frequentemente utilizados na análise das turbinas Savonius (SOBCZAK et al., 2020; MARINIĆ-KRAGIĆ et al., 2019), modelos bidimensionais também se mostram representações eficazes de seu comportamento (ALOM; SAHA, 2019a; TIAN et al., 2015). Métodos numéricos, como o Método dos Volumes Finitos (FVM) e o Método dos Elementos Finitos (FEM), são comumente empregados nessas simulações. A presente pesquisa, no entanto, propõe uma metodologia que combina o Método Pseudospectral de Fourier (FPM) com o Método da Fronteira Imersa (IBM) (MARIANO et al., 2011). Essa abordagem tem sido validada para simulações com e sem interação fluido-estrutura (NASCIMENTO et al., 2020; NASCIMENTO et al., 2024; MARIANO et al., 2022) e oferece custos computacionais consideravelmente menores para simulações bidimensionais (NASCIMENTO et al., 2016).

O estudo tem como objetivo simular o escoamento em torno de um rotor Savonius estático utilizando o Método Pseudospectral de Fourier acoplado ao Método da Fronteira Imersa (IMERSPEC).

METODOLOGIA

Modelo Matemático do Escoamento

O modelo matemático utilizado para descrever o comportamento do escoamento ao redor do rotor é baseado na equação da continuidade eq. (1) e na equação de Navier-Stokes eq. (2),

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i, \quad (2)$$

onde t representa o tempo (s), $u_i(x,t)$ é o vetor de velocidade (m/s), e x é o vetor posição no campo Euleriano bidimensional. O termo $p=p^*/\rho$ é a relação entre o campo de pressão estática p^* (N/m²) e a massa específica do fluido ρ (kg/m³). O termo ν representa a viscosidade cinemática do fluido (m²/s). Finalmente, $f_i=f_i^*/\rho$ é uma relação entre a força oriunda do método de fronteira imersa f_i^* (N/m³) e a massa específica (ρ). Os termos i e j são índices de notação tensorial.

As Eqs. (1) e (2), utilizadas no modelo matemático, consideram um fluido incompressível, Newtoniano, com propriedades constantes, sem transferência de calor ou efeitos gravitacionais, e com análise bidimensional.

Método Pseudospectral de Fourier

O Método Pseudospectral de Fourier transforma as variáveis primitivas do espaço físico para o espaço espectral, utilizando a transformada direta de Fourier (BRIGGS; HENSON, 1995). Assim, a eq. (1), transformada para o espaço espectral, se torna eq. (3), definindo um plano de divergência zero,

$$ik_i \hat{u} = 0, \quad (3)$$

onde $\hat{u}(k, t)$ é o campo de velocidade no espaço espectral, k é o vetor de onda e i é a unidade imaginária $\sqrt{-1}$. Já a eq. (2), transformada para o espaço espectral de Fourier, é descrita na eq. (4),

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + ik_i(\widehat{u_i u_j}) = -ik_i \hat{p} - \nu k^2 \hat{u}_i + \hat{f}, \quad (4)$$

onde k^2 é o quadrado do vetor de onda k e é calculado como $k^2 = k_i k_i$.

Método da Fronteira Imersa (IBM)

O Método da Fronteira Imersa utiliza dois domínios independentes: o domínio Lagrangiano (Γ) para a geometria imersa no fluido, e o domínio Euleriano (Ω) para o plano cartesiano fixo onde ocorre o escoamento (MARIANO et al., 2022) (NASCIMENTO et al., 2024). O termo fonte pode ser escrito como,

$$\hat{f}_i(x, t) = \sum_{\Gamma} D_h(x - X) F_i(X, t) \Delta s^2, \quad (5)$$

influenciado pela força Lagrangiana (F_i), o espaçamento entre os pontos que definem a geometria (Δs) e a função de distribuição,

$$D_h(x - X) = \frac{1}{\Delta x^2} W_c(r_x) W_c(r_y) \quad (6)$$

onde $r_x = \frac{x-X}{\Delta x}$, $r_y = \frac{y-Y}{\Delta y}$, Δx e Δy são os espaçamentos entre os pontos na malha Euleriana em x e y , respectivamente, e W_c é a função de peso.

$$W_c(r) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2}|r| - |r|^2 + \frac{1}{2}|r|^3 & \text{se } 0 \leq |r| < 1 \\ 1 - \frac{11}{6}|r| + |r|^2 - \frac{1}{6}|r|^3 & \text{se } 1 \leq |r| < 2 \\ 0 & \text{se } 2 \leq |r| \end{cases} \quad (7)$$

Mais detalhes sobre a combinação do Método Pseudospectral de Fourier e do Método da Fronteira Imersa, que compõem a metodologia IMERSPEC, podem ser encontrados no trabalho de Mariano et al. (2022) e Nascimento et al. (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo físico simplificado da turbina Savonius estática, Fig. 1, consiste na combinação de uma pá de avanço (côncava, quando perpendicular ao escoamento) e uma pá de retorno (convexa, quando perpendicular ao escoamento), que formam o perfil em "S" (Ueda, 2019). O domínio euleriano possui comprimentos $L_x=16D$ no eixo x e $L_y=8D$ no eixo y , com $3D$ de comprimento para a zona de esteira (ZB) e D de comprimento para a zona frontal (ZF). A geometria está localizada a uma distância de $8D$ em comprimento e $4D$ em altura.

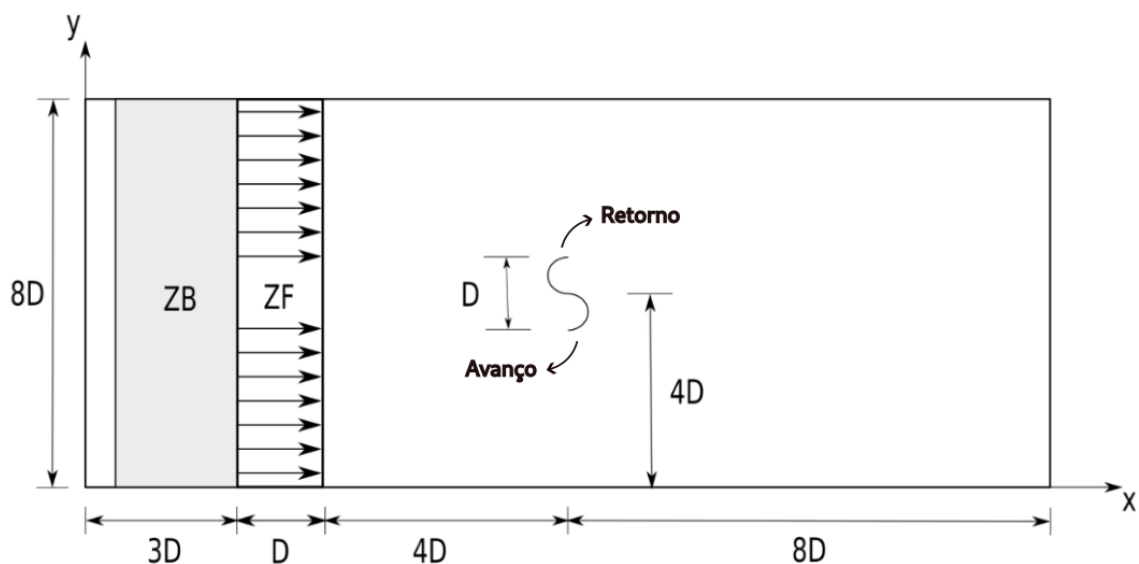


Figura 1. Modelo físico simplificado.

Os parâmetros da simulação estão apresentados na Tab. 1, onde D é o diâmetro total da geometria. A velocidade uniforme na entrada U_∞ e o número de Reynolds (Re_D) são definidos como um parâmetro de entrada e a partir dele é possível calcular a viscosidade cinemática ($\nu=U_\infty D/Re_D$). O tempo final é adimensionalizado como $tf^*=2U_\infty/D$.

Tabela 1. Parâmetros da simulação

Parâmetros	Nomenclatura	Valores
Pontos de colocação	$N_x \times N_y$	1024 x 512
Diâmetro (m)	D	2
Número de Reynolds	ReD	200
Número de Courant	CFL	0,1
Tempo final adimensional	t_f^*	300
Velocidade uniforme na entrada (m/s)	U_∞	1,00

Com a separação das camadas limite ao redor da turbina Savonius estática, a maior parte do escoamento em contato com a geometria é direcionada para a pá de avanço, criando uma interação complexa com a geometria. A jusante da geometria, recirculações se desenvolvem, inicialmente de forma simétrica, indicando a formação e evolução de zonas de baixa pressão e a estrutura geral do escoamento ao redor da turbina.

A Fig. 2 apresenta o campo de vorticidade ω_z , com valores de escala definidos pela faixa $-5 \leq \omega_z \leq 5$. Nesse campo, a coloração branca representa recirculações negativas (horárias), enquanto o azul escuro indica recirculações positivas (anti-horárias). Inicialmente, nas estruturas contra-rotativas a jusante do escoamento, em $t^*=5$ e $t^*=10$, observa-se que a recirculação negativa aumenta de tamanho, empurrando a estrutura positiva para a camada de cisalhamento. Posteriormente, entre $t^*=10$ e $t^*=25$, ocorrem os primeiros desprendimentos de estruturas contra-rotativas alternadamente, formando a esteira, que pode ser observada de $t^*=25$ a 110 .

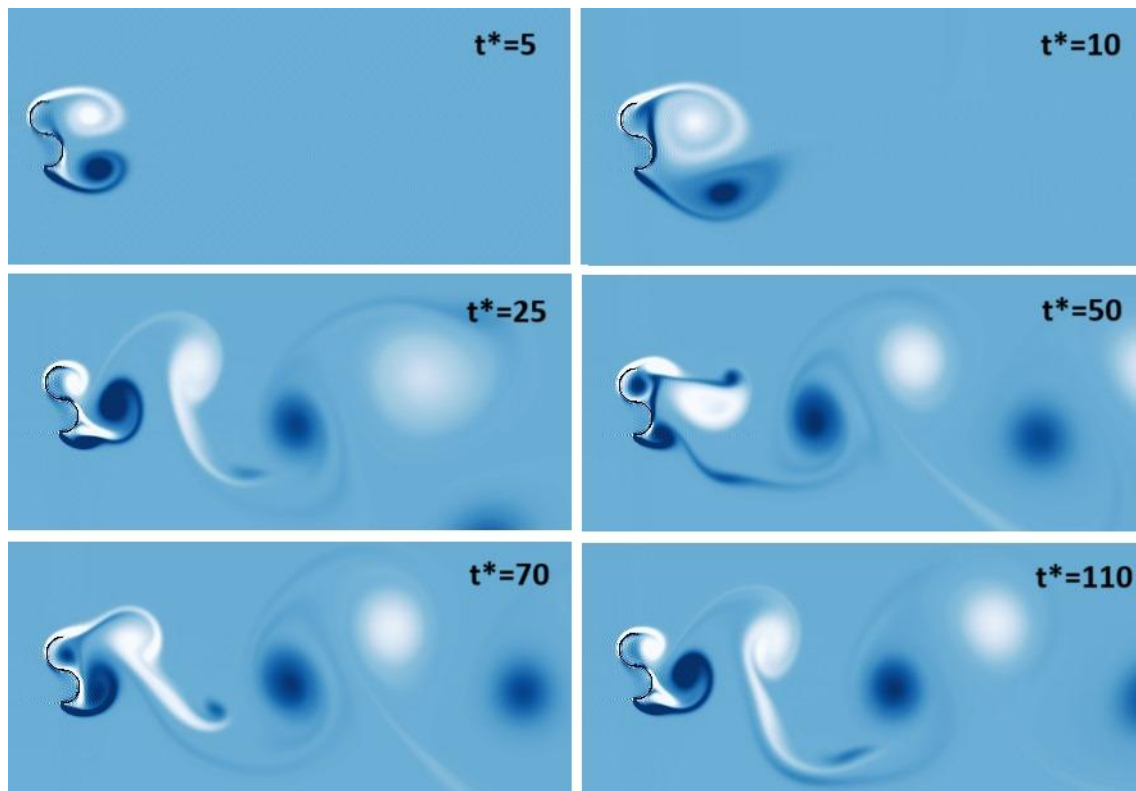


Figura 2. Evolução temporal do campo de vorticidade $-5 \leq \omega_z \leq 5$.

A evolução temporal do coeficiente de arrasto e do coeficiente de sustentação é calculada separadamente para a pá de avanço e a pá de retorno. Os coeficientes médios são calculados a partir do tempo $t^*=200$ e mostrado na Tab. 2. Observa-se que o coeficiente de arrasto é maior para a pá de avanço, enquanto o coeficiente de sustentação é maior para a pá de retorno. Isso indica uma maior contribuição da pá de avanço para a rotação no sentido anti-horário, considerando todos os torques gerados pelas forças horizontais e verticais.

Tabela 2. Valores médios dos coeficientes de arrasto e sustentação

Pá	C_D	C_L
Retorno	2,7122	1,9280
Avanço	3,6747	0,3595

CONCLUSÕES

Neste trabalho, o método Pseudospectral de Fourier, acoplado ao Método da Fronteira Imersa, que juntos formam a metodologia IMERSPEC, foi utilizado para estudar o comportamento dinâmico de um modelo simplificado de turbina Savonius estática. A forma de cada semicilindro induz recirculações a jusante do rotor, gerando uma esteira que, ao atingir o estado de escoamento plenamente desenvolvido, indica coeficientes de arrasto mais elevados para a pá de avanço. Esse comportamento sugere que a geometria côncava contribui de forma mais significativa, gerando uma possível rotação no sentido anti-horário em uma turbina submetida aos mesmos parâmetros de escoamento, mas com rotação livre.

Agradecimentos. Os autores expressam sua gratidão à Eletrobras, ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), ao Centro de Excelência em Tecnologias de Hidrogênio e Energia Sustentável (CEHTES) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) pelo apoio financeiro e infraestrutura fornecidos para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALOM, N.; SAHA, U. K. Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, v. 186, p. 267–277, 2019a.
- ALOM, N.; SAHA, U. K. Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, v. 186, p. 267–277, 2019b.
- BRIGGS, W. L.; HENSON, V. E. *The DFT: an owner's manual for the discrete Fourier transform*. SIAM, 1995.
- HASSANZADEH, R.; MOHAMMADNEJAD, M. Effects of inward and outward overlap ratios on the two-blade Savonius type of vertical axis wind turbine performance. *International Journal of Green Energy*, v. 16, n. 15, p. 1485–1496, 2019.
- LEE, J.-H.; LEE, Y.-T.; LIM, H.-C. Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine. *Renewable Energy*, v. 89, p. 231–244, 2016.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind energy explained: theory, design and application*.

John Wiley & Sons, 2010.

- MARCHEWKA, E.; SOBCZAK, K.; REOROWICZ, P.; OBIDOWSKI, D. S.; JÓŹWIK, K. Application of overset mesh approach in the investigation of the Savonius wind turbines with rigid and deformable blades. *Archives of Thermodynamics*, v. 42, n. 4, 2021.
- MARINIĆ-KRAGIĆ, I.; VUČINA, D.; MILAS, Z. Concept of flexible vertical-axis wind turbine with numerical simulation and shape optimization. *Energy*, v. 167, p. 841–852, 2019.
- MARIANO, F. P. Soluções Numéricas de Navier Stokes Utilizando uma hibridação das Metodologias Fronteira Imersa e Pseudospectral de Fourier. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- MARIANO, F. P.; MOREIRA, L. d. Q.; NASCIMENTO, A. A.; SILVEIRA-NETO, A. An improved immersed boundary method by coupling of the multi-direct forcing and Fourier pseudo-spectral methods. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 44, n. 9, p. 388, 2022.
- MRIGUA, K.; TOUMI, A.; ZEMAMOU, M.; OUHMMOU, B.; LAHLOU, Y.; AGGOUR, M. CFD investigation of a new elliptical-bladed multistage Savonius rotors. *International Journal of Renewable Energy Development*, v. 9, n. 3, 2020.
- NASCIMENTO, A.; MARIANO, F.; SILVEIRA-NETO, A.; PADILLA, E. A comparison of Fourier pseudospectral method and finite volume method used to solve the Burgers equation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 36, p. 737–742, 2014.
- NASCIMENTO, A. A.; MARIANO, F. P.; PADILLA, E. L. M.; SILVEIRA-NETO, A. Comparison of the convergence rates between Fourier pseudo-spectral and finite volume method using Taylor-Green vortex problem. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, p. 1–10, 2020.
- NASCIMENTO, A. A.; MARIANO, F. P.; PADILLA, E. L. M.; SILVEIRA-NETO, A. Coupling of the immersed boundary and Fourier pseudo-spectral methods applied to solve fluid–structure interaction problems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 46, n. 4, p. 1–15, 2024.
- NASCIMENTO, A. A. et al. Métodos pseudoespectral de Fourier e fronteira imersa aplicados a escoamentos simplificados de engenharia de perfuração, 2016.
- SAVONIUS, S. J. The s-rotor and its applications. *Mechanical Engineering*, v. 53, n. 5, p. 333–338, 1931.

- SOBCZAK, K.; OBIDOWSKI, D.; REOROWICZ, P.; MARCHEWKA, E. Numerical investigations of the Savonius turbine with deformable blades. *Energies*, v. 13, n. 14, p. 3717, 2020.
- TIAN, W.; SONG, B.; VANZWIETEN, J. H.; PYAKUREL, P. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*, v. 8, n. 8, p. 7915–7929, 2015.
- UEDA, Y. Numerical analysis of flow-induced rotation of an s-shaped rotor. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 867, p. 77–113, 2019.
- WHITE, F. M.; MAJDALANI, J. *Viscous fluid flow*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616647>

METODOLOGIA PARA PARAMETRIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DUROS SOLDADOS PELO PROCESSO FCAW

Wesley O. Rocha¹, Renata R. Alves¹, Demostenes Ferreira Filho¹, Alice G. Osorio², Daniel Souza¹

*¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Av. Esperança, s/n, Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5 Eng. Mecânica, 74.690-900 - Goiânia - Goiás - Brasil
rochapedra90@gmail.com, renata_rodrigues@ufg.br, demostenesferreira@ufg.br, daniel.souza@ufg.br.*

*²Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas
Rua Gomes Carneiro, 01 - Centro- Pelotas - RS, Brasil - 96010-610
osorio.alice@gmail.com*

Resumo. A aplicação de revestimentos de soldagem para proteção de estruturas inicia-se com a definição dos parâmetros de soldagem e com a definição do número de camadas a serem aplicadas. Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para definição dos parâmetros e número de camadas que devem ser aplicadas em soldagens de revestimentos pelo processo FCAW utilizando um arame duro da classe FeCrC. Para isto, uma metodologia baseada na geometria do cordão, diluição e dureza das camadas foi proposta. Os resultados apontam que a escolha da geometria deve se sobrepor ao critério da diluição e que 2 camadas são suficientes para realização do revestimento mantendo-se adequadamente as propriedades.

Palavras-chave: Revestimento por soldagem. FCAW. Revestimento duro.

INTRODUÇÃO

Revestimentos duros são utilizados com objetivo de aumentar superficialmente a resistência ao desgaste de uma peça ou equipamento. A aplicação do revestimento pode ser realizada por diversos processos (ou métodos de aplicação) e consumíveis, sendo alguns como soldagem a arco elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW - Shielded Metal Arc Welding), soldagem por Eletrodo Tubular (FCAW - Flux-Cored Arc Welding), soldagem por MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas) e Arco Submerso (SAW - Submerged Arc Welding). Cada método pode apresentar vantagens e desvantagens. A escolha do método ideal depende do tipo de desgaste, da abrasão que o componente sofra e das condições de operação do equipamento. Dentre estes métodos, o FCAW apresenta versatilidade de consumíveis, produtividade e possibilidade de automatização.

O uso de diferentes processos e materiais para realização dos depósitos visando o revestimento esbarra na dificuldade de se encontrar parâmetros e condições operacionais que promovam revestimentos adequados do ponto de vista de qualidade. Metodologias propostas para realização de um tipo de revestimento pode não ser adequada para determinação dos parâmetros e condições de soldagem para um outro tipo de revestimento. Assim, é importante o estudo de metodologias que sistematizem procedimentos para determinação dos parâmetros e condições para aplicação dos revestimentos baseados nas respostas requeridas.

DESENVOLVIMENTO

A realização da soldagem para revestimento não é trivial. Existem problemas na diluição e geometria do cordão de solda que podem gerar defeitos durante a construção da camada de revestimento. Silva (2010) estudou revestimentos de ligas de níquel sobre um substrato de aço carbono e encontrou falta de fusão na ligação entre um cordão e outro em alguns dos testes realizados. Em um estudo para avaliar o efeito de vários parâmetros e condições de soldagem na mitigação de defeitos como falta de fusão entre os cordões de revestimento, Zilio et al (2014), concluíram que o uso de tecimento aumenta a molhabilidade dos cordões e com isso diminui a possibilidade de defeitos.

Desta forma, antes da realização de uma operação de revestimento é necessário parametrizar o processo com objetivo de se obter um cordão com diluição e convexidade adequadas ao propósito. Existem estudos avaliando o efeito dos parâmetros na molhabilidade dos cordões com objetivo de melhorar a convexidade dos mesmos, como por exemplo o estudo de Fantoni (2022), porém, a resposta da molhabilidade e da diluição dos cordões é dependente do processo, gás, materiais envolvidos etc.

Assim, o presente estudo tem como objetivo propor uma metodologia para parametrização de cordões de solda para revestimentos duros aplicados por soldagem.

METODOLOGIA

Para realização das soldagens foi utilizada uma fonte eletrônica multiprocesso regulada para trabalhar no modo tensão constante. Foi utilizado um arame tubular do tipo autoprotégido marca UTP código do fabricante AF LEDURIT 60 do tipo FeCrC para aplicação de revestimentos duros. As soldagens foram realizadas sobre chapas de aço comum baixo ao carbono com espessura de 6 mm.

Foram realizadas soldagens de 27 amostras de acordo com as especificações de catálogo do fabricante do arame UTP AF LEDURIT 60 de 1,6 mm de diâmetro, ou seja, tensão entre 22 a 29 V, corrente entre 150 a 350 A. No estudo, as tensões utilizadas foram os valores extremos de 22 e 29 V, o terceiro valor representa a média entre esses dois números com valor de 25 V. Para a DBCP (Distância Bico de Contato a Peça) serão utilizadas três valores; 18, 20 e 22 mm para realização dos testes e velocidade de alimentação de 5, 10 e 15 m/min, compatíveis com os valores de corrente indicados no catálogo.

Critério de geometria do cordão

Após o processo de soldagem com os parâmetros de DBCP, tensão e velocidade de alimentação propostos, as amostras foram cortadas em três lugares, conforme a Fig. 1. O objetivo foi a realização das medidas de área de penetração, área total, penetração do cordão de solda, reforço e largura. As partes confeccionadas para essas medições foram feitas nas seções transversais 1, 2 ou 3 e 4 da figura.



Figura 1. Posição dos cortes realizados nos cordões

A representação simbólica de todas as medidas está na Fig. 2, como penetração, área de reforço, área de penetração, largura e reforço. Para realização das medições das amostras foi utilizado o software ImageJ. Os resultados foram pelas médias de 3 medidas, ou seja, 3 medidas da área total (área a + b). A totalização das medidas foi de 15 para cada amostra selecionada. Para calcular a diluição (D) foi utilizada a Eq. 1.

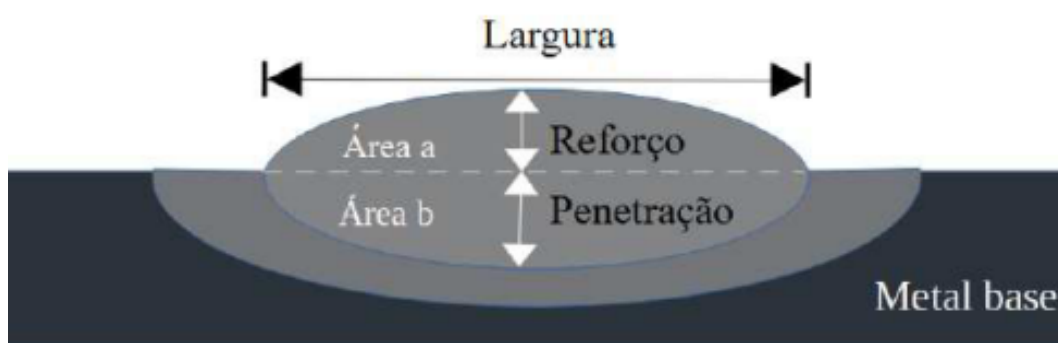


Figura 2. Representação dos parâmetros geométricos do cordão

$$D = \frac{\text{Área } b}{\text{Área } (a + b)} * 100 \quad (1)$$

Para melhor escolha dos parâmetros da soldagem foi usado o Índice de Convexidade (IC), sendo uma característica apresentada pelo cordão de solda. A convexidade na soldagem é quando a superfície do cordão de solda tem uma forma abaulada e com superfície do metal de base forma um ângulo de molhabilidade. O IC pode depender de vários fatores, como a quantidade de material utilizado, velocidade da soldagem, configuração da soldagem e outros parâmetros como a tensão superficial no momento do processo de soldagem. Em algumas aplicações o excesso de IC pode ser um problema que afeta a falta de fusão entre os cordões de solda. Para verificar o IC utilizou ferramenta de inspeção e medição para o cálculo da superfície de soldagem e determinar se o cordão de solda é plano, côncavo ou convexo segundo especificação requerida para o processo que foi usado. O IC foi calculado pela relação do reforço e a largura do cordão de solda conforme a Eq. 2.

$$C = \frac{\text{Reforço}}{\text{Largura}} \quad (2)$$

Critério de dureza das camadas

Após a escolha dos parâmetros foram feitos os revestimentos com um, duas e três camadas no substrato do aço carbono comum e do VC-131 para escolha da quantidade de camadas do revestimento. Foram realizados 30 ensaios de dureza para cada amostra em locais aleatórios. Os ensaios foram realizados pelo método Vickers (ou pirâmide de diamante com carga 10 kgf) em locais aleatoriamente no topo das camadas, com distância entre ensaios maior que 1 mm.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados 27 testes para parametrização do cordão de solda. As amostras descartadas visualmente, por não apresentar continuidade, foram 3, 6, 12, 15, 20, 21 e 24. A amostra 19 não apresentou penetração do cordão de solda e desprendia facilmente do metal base, por esse motivo foi descartada.

Nos cortes realizados, mostrados na Fig. 3, algumas amostras apresentaram defeitos pontuais, como baixa penetração do cordão de solda e porosidade. As amostras 1, 2, 10, 11 e 27 foram descartadas pela presença de defeitos em suas geometrias que poderia comprometer a qualidade do revestimento.

Assim, as amostras selecionadas visualmente e aceitáveis para realização das medições da geometria dos cordões de solda, foram 4, 5, 7, 8, 9, 13, 14, 16, 17, 18, 22, 23, 25 e 26 e estão representadas na Fig. 4.



Figura 3. Defeito apresentado em alguns cordões de soldas, como porosidade e baixa penetração



Figura 4. Seção transversal dos cordões de solda selecionados

Resultados das medições dos cordões de solda

Os resultados das medidas e cálculos realizados com os cordões de soldas selecionados (área total, área de penetração, penetração, reforço, largura, diluição e IC) são mostrados na Tab. 1. Analisando os resultados da tabela, as amostras com IC de aproximadamente 0,46, como

das amostras 4, 8 e 17, já começam a apresentar geometria com aparente concentração de tensão entre os cordões de soldas, diminuição da diluição e visualmente a característica geométrica do cordão de solda não é aceitável para fazer o revestimento. Portanto, estas amostras com IC acima do valor de 0,46 foram descartadas para realização do revestimento.

Tabela 1. Medidas médias dos cordões de soldas das amostras

Amostra	Área total (mm ²)	Área penetração (mm ²)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Diluição (%)	IC
4	23,98	7,87	1,72	3,33	7,08	32,81	0,47
5	37,09	5,50	1,20	5,04	6,59	14,83	0,76
7	28,73	11,28	1,73	2,93	8,72	39,26	0,34
8	44,22	11,59	1,96	4,38	9,44	26,21	0,46
9	63,04	10,27	2,31	5,91	8,42	16,29	0,70
13	21,21	5,13	1,25	3,35	6,58	24,17	0,51
14	32,72	4,91	1,22	4,65	6,51	14,99	0,71
16	23,46	9,70	1,71	2,60	8,03	41,33	0,32
17	37,55	9,87	1,81	4,08	8,85	26,29	0,46
18	50,59	8,16	2,01	5,14	8,68	16,13	0,59
22	24,33	5,64	1,30	3,67	6,80	23,16	0,54
23	38,65	5,25	1,48	5,25	6,27	13,58	0,84
25	26,40	9,71	1,71	2,91	8,00	36,77	0,36
26	40,80	8,12	1,67	4,69	8,15	19,91	0,57

Escolha dos parâmetros para a soldagem

A escolha dos parâmetros para ser usada no revestimento é referente ao IC e a diluição do cordão de solda. Para escolha em relação aos testes feitos, características do cordão de solda e cálculos realizados, os parâmetros que apresentaram melhores resultados foram das amostras 16, 7 e 25, com IC menor que 0,46, portanto para a escolha dos parâmetros será do menor IC que é representado pela amostra 16, apesar de não ser o menor valor de diluição (DBCP 20 mm, tensão 29 V e velocidade de alimentação de 5 m/min). A abordagem de escolha em relação ao IC em detrimento à diluição foi por considerar, neste caso, o IC como um parâmetro mais importante para a operação de revestimento.

Determinação da quantidade de camadas do revestimento

Na Tab. 2 é mostrada a média de dureza do revestimento em 1, 2 e 3 camadas com metal de base o aço carbono comum e o aço ferramenta VC-131, a média de dureza apresentou maior valor para Amostra 1 (material de base aço carbono comum com uma camada) e menor valor de dureza para Amostra 3 (material de base aço carbono comum com três camadas), com material base de aço carbono comum de uma e três camadas, média de 736 e 725 HV, respectivamente. Resultados semelhantes de dureza foram encontrados nos testes realizados por Colaço e Maranhão (2013) e por Lima e Ferraresi (2010), porém com material de adição FeCrC+Ti. A dureza mínima foi de 559 HV, representado pela Amostra 4, tendo como material base VC-131 de uma camada. A máxima dureza foi de 973 HV representado pela Amostra 1. Desvio padrão máximo foi de 66 HV, Amostra 1, e mínimo foram representados pelas Amostras 3 e 5 de 45 HV. A diminuição de dureza em relação à primeira camada para a segunda foi observada no trabalho de Gualco et al. (2015) de 920 para 800 HV e com perda de material nos testes abrasivos menores para segunda camada. No trabalho de Coronado, Caicedo e Gómez (2009), também teve uma diminuição da dureza no revestimento da primeira (695 HV) para terceira camada (678 HV), em torno de 2,5%.

Tabela 2. Dados estatísticos da dureza HV10

Amostra	Substrato	Número de camadas	Dureza média (HV)	Dureza mínima (HV)	Dureza máxima (HV)	Desvio padrão (HV)
1	Aço carbono	1	736	619	973	66
2	Aço carbono	2	704	640	816	48
3	Aço carbono	3	685	577	771	45
4	VC-131	1	698	559	820	59
5	VC-131	2	717	614	789	45
6	VC131	3	725	608	799	47

A Fig. 5 é uma representação gráfica das médias e das variabilidades de dureza em relação ao número de camadas. Observa-se maior média e maior variabilidade para a Amostra 1 e menor média e variabilidade para Amostra 3. Foi significativa a variação de dureza entre as

camadas do revestimento para soldagem feito com os dois tipos de substrato, tanto o aço carbono comum e o VC-131. Teve uma diminuição de dureza para o aumento de camadas com material base de aço comum e um aumento de dureza para aumento de camadas no material base VC-131. Entre as amostras de material base da liga de aço carbono comum, com relação a dureza, a Amostra 1 apresentou melhor resultado, bem como, menor custo para ser realizado o revestimento, pois foi necessária somente uma camada. Entre as amostras de material base VC-131, com relação a economia de recurso, a amostra 5 apresentou vantagem em relação a amostra 6 por não apresentar diferenças significativas de dureza nos resultados.

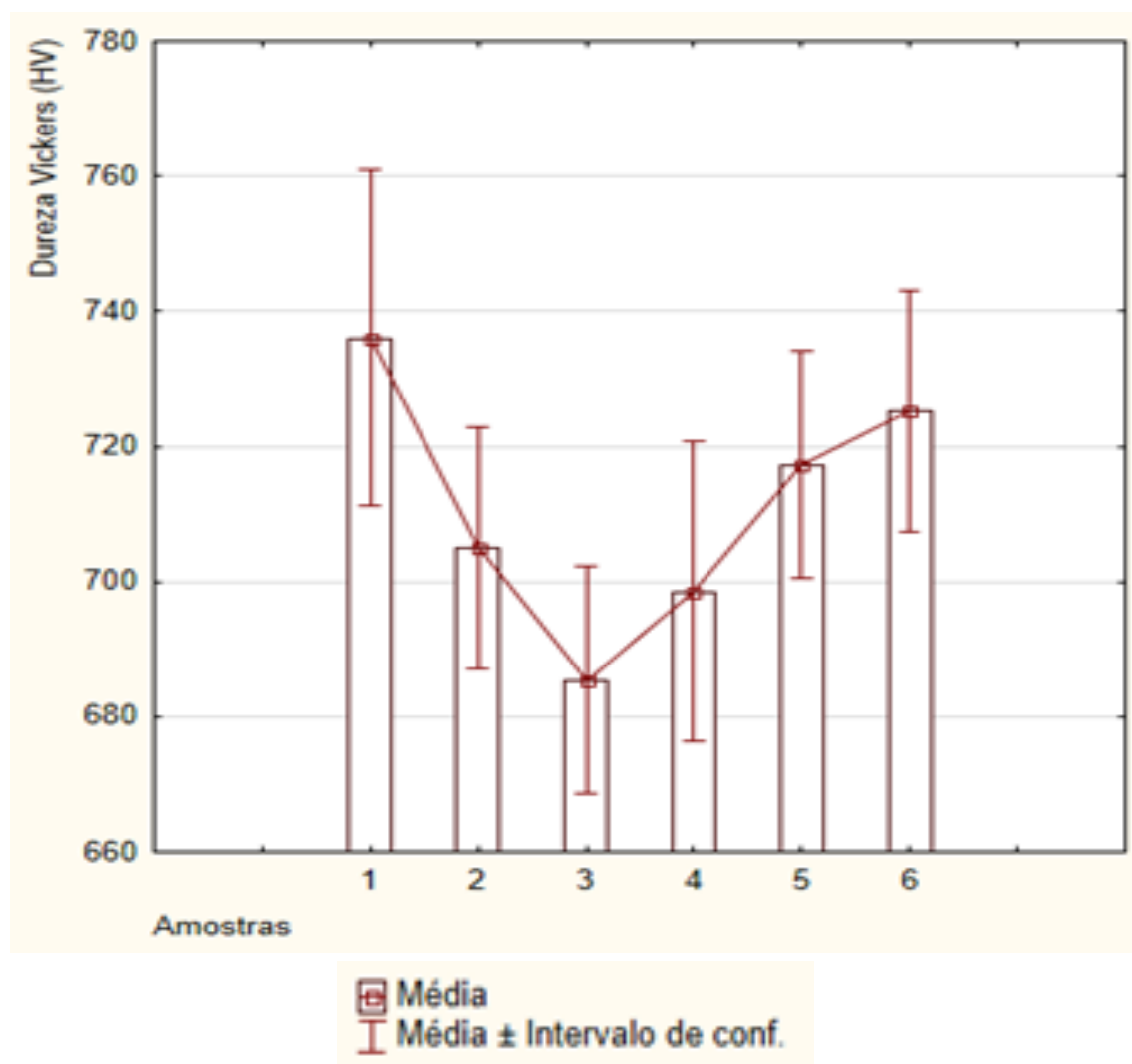


Figura 5. Média de dureza HV10 em função das camadas

Portanto, considerando os testes preliminares realizados, ficou determinado como parâmetros de soldagem para os revestimentos os valores DBCP de 20 mm, tensão de 29 V e velocidade de alimentação de 5 m/min. Em relação ao número de camadas, ficou determinado a realização de revestimentos com 1 e 2 camadas para os dois materiais de base.

CONCLUSÕES

Para os parâmetros e condições de soldagem, materiais e resultados obtidos neste trabalho, é possível concluir que:

- A metodologia adotada permite a escolha de cordões com a melhor geometria possível levando-se em consideração a diluição do cordão. Além disso, permite a escolha do menor número de camadas em função da dureza, devido à aplicação do revestimento em questão;
- O índice de convexidade escolhido foi de 0,46 apesar de não ser a condição com menor diluição (41,33 %), preservando-se a geometria mais convexa;
- Para a condição escolhida os valores dos parâmetros de soldagem foram: DBCP de 20 mm, tensão de 29 V e velocidade de alimentação de 5 m/min;
- Em relação ao número de camadas, ficou determinado a realização de revestimentos com 1 e 2 camadas para os dois materiais de base.

Agradecimentos. O autor Wesley O. Rocha agradece a FAPEG – Edital de Bolsas nº 1/2022 pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLAÇO, F. H. G.; MARANHO, O. Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC-Ti (Evaluation of Mass Loss of Weld-Deposited Hardfacing with Cored Wire Ti-FeCrC Alloy). 2013. 58-068 p.

CORONADO, J. J.; CAICEDO, H. F.; GOMEZ, A. L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance

for hardfacing deposits. *Tribology International*, v. 42, p. 745–749, 5 2009. ISSN 0301679X.

FANTONI, L. F. ESTUDO DA SOLDAGEM SAW COM TECIMENTO TRANSVERSAL VISANDO APLICAÇÕES DE REVESTIMENTO. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2022.

GUALCO, A. et al. Wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing. *Procedia Materials Science*, Elsevier BV, v. 8, p. 934–943, 2015. ISSN 22118128.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar. Abr, 2010.

SILVA, C. C. Revestimentos de Ligas de Níquel Depositados pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio – Aspectos Operacionais e Metalúrgicos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. 2010. 355p.

ZILIO, G. B.; GUTIERRES, A., FERREIRA FILHO, D.; BIEHL, L. V.; OSORIO, A. G.; ARAÚJO, D. B.; SOUZA, D. Influência do Gás de Proteção e Condições de Soldagem na Diluição e Molhabilidade de Cordões de Solda de Aço Inoxidável e Liga de Níquel Depositados pelo Processo MIG/MAG. CONEM 2014, Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia. 2014.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616686>

A IMPORTÂNCIA DE UMA METODOLOGIA ASSERTIVA PARA A ELABORAÇÃO DE UM MAPA DE RISCOS PARA AMBIENTES LABORATORIAIS DE UMA UNIVERSIDADE

Guilherme F. Ferreira¹, Diogo A. Colvero¹

¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Alameda Ingá, quadra B, bloco 5, s/n - Chácaras Califórnia, 74.690-900, Goiânia/GO - Brasil
guilhermeferreira2@discente.ufg.br, diogocolvero@ufg.br

Resumo. Independentemente da cultura de segurança de uma empresa, um ambiente de trabalho apresenta condições de risco à saúde e à segurança de seus trabalhadores. Com o intuito de minimizar tais riscos, a legislação brasileira define regras e parâmetros para aumentar a segurança do trabalho, trazendo consigo métodos que devem ser utilizados pelas instituições, tais como o mapa de riscos. Assim, o objetivo deste estudo foi apresentar a criação de uma metodologia que seja assertiva para a elaboração de um mapa de risco em ambientes laborais acadêmicos. Para isso, buscou-se, em primeiro lugar, a compreensão da legislação vigente e suas determinações. Por conseguinte, formulou-se um questionário que abrangesse os diferentes riscos laborais, que deve ser aplicado aos colaboradores, de modo que nenhum risco seja ignorado. Como resultado, houve entendimento legal das normativas, seguindo para a criação de uma matriz para determinar a intensidade dos riscos, a qual é acompanhada e suportada por percepções qualitativas dos usuários. Ao final, espera-se que este estudo se torne um material de apoio para instituições que necessitem elaborar mapas de riscos.

Palavras-chave: Laboratórios. Riscos ocupacionais. Segurança do trabalho. Ambiente laboral.

INTRODUÇÃO

Segundo Pinto (2014), o mapa de risco é um instrumento de prevenção e orientação acerca dos riscos existentes, o qual deve ser elaborado para ambientes onde o profissional esteja exposto a algum tipo de risco. Esta técnica de representação gráfica utiliza uma linguagem visual e com informações técnicas para orientar acerca dos riscos existentes, além de prevenir possíveis acidentes de trabalho. O mapa de risco deve ser fixado em um local de

fácil visualização, contendo informações relativas aos riscos oriundos de diversos elementos do processo de trabalho, como reagentes, equipamentos e procedimentos (NEVES et. al, 2006).

De acordo com Pereira, et al. (2012) o mapa de risco traz benefícios como a identificação prévia dos riscos existentes no local, além de contribuir para a conscientização quanto ao uso adequado das medidas de proteção e equipamentos de proteção individual e coletiva. O mapa de risco dá subsídios para que a instituição tome medidas de segurança do trabalho que permitam reduzir os gastos com doenças, acidentes, indenizações trabalhistas, entre outros.

Todavia, para Mota e Frota (2013) há poucos estudos acerca de mapa de riscos em ambientes laborais, o que dificulta o aprofundamento e disseminação do conhecimento na temática. Em 2008, Miranzi, et al. publicaram um estudo referente a acidentes de trabalho entre os trabalhadores de uma universidade pública. O estudo foi feito com dados coletados entre 2000 e 2005 na área da saúde em um Hospital Universitário. Os autores estimam um sub-registro de 56,6% relativo às informações do Sistema de Informação sobre Mortalidade – SIM e ausência de emissão de comunicação de acidente de trabalho – CAT em 95,1% dos casos elegíveis.

Neste cenário, a elaboração do mapa de riscos é uma ferramenta essencial para o controle e mitigação dos riscos presentes no local de trabalho. Além disso, é mais uma ferramenta que visa comprometer e envolver os trabalhadores na conscientização da importância da segurança do trabalho. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi apresentar a criação de uma metodologia que seja assertiva para a elaboração de um mapa de risco em ambientes laborais acadêmicos.

DESENVOLVIMENTO

A fim de determinar a importância da elaboração de um mapa de riscos para os diversos ambientes de uma universidade, torna-se necessário a observação detalhada e a seguinte compreensão dos seguintes tópicos.

Legislação aplicável

Para a devida elaboração de um mapa de risco, a legislação aplicável inclui, mas não se limita às seguintes normas e diretrizes:

- I. Constituição Federal de 1988: Estabelece direitos fundamentais dos trabalhadores, incluindo o direito à saúde e segurança no trabalho. A Constituição serve de base para a elaboração e aplicação de legislações relacionadas à segurança ocupacional (Brasil, 1988).
- II. Normas Regulamentadoras (NRs): São normas estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) que regulamenta questões específicas relacionadas à segurança e saúde no trabalho. As principais NRs relevantes para este relatório incluem:
 - NR 4, de 1978 - Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho (SESMT): Estabelece a obrigatoriedade da criação e organização dos SESMT nas empresas, com o objetivo de promover a saúde e a integridade física dos trabalhadores, por meio de uma equipe especializada em segurança e saúde do trabalho (BRASIL, 1978).
 - NR 5, de 1978 - Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA): Define a constituição e as funções da CIPA, que tem como objetivo a prevenção de acidentes e doenças relacionadas ao trabalho (BRASIL, 1978).
 - NR 12, de 1978 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos: Regula as medidas de segurança para o uso de máquinas e equipamentos, visando prevenir acidentes e lesões (BRASIL, 1978).
 - NR 15, de 1978 - Atividades e Operações Insalubres: Trata das atividades e operações consideradas insalubres, definindo os limites de tolerância para exposição a agentes nocivos à saúde. (BRASIL, 1978).
 - Portaria MTP n.º 422 (Altera a NR-05), de 7 de outubro de 2021: Determina que os mapas de riscos deixem de ser obrigatórios para as empresas. A nova obrigatoriedade é

- registrar a percepção dos riscos dos trabalhadores por meio do mapa de risco ou outra técnica/ferramenta apropriada à sua escolha, sem ordem de preferência (BRASIL, 2021).
- III. Lei n.º 6.514, de 22 de dezembro de 1977: Dispõe sobre a segurança e saúde no trabalho, estabelecendo normas e exigências para a proteção dos trabalhadores. Essa lei é um marco na regulamentação da segurança ocupacional e orienta a criação de normas e procedimentos (BRASIL, 1977).
- IV. Lei n.º 8.213, de 24 de julho de 1991: Trata dos planos de benefícios da Previdência Social, incluindo a cobertura de acidentes de trabalho e doenças ocupacionais. Define a responsabilidade dos empregadores em relação aos acidentes e doenças relacionados ao trabalho (BRASIL, 1991).
- V. Portaria n.º 5, de 17 de agosto de 1992: Altera a Norma Regulamentadora n.º 9 definindo a obrigatoriedade da elaboração de mapa de riscos ambientais (BRASIL, 1992).

Definições

Segundo o artigo 19 da Lei n.º 8.213 (BRASIL, 1991), acidente do trabalho é definido como um evento consequente do exercício laboral a serviço de uma empresa e/ou instituição, que os trabalhadores podem sofrer. De modo a provocar uma lesão física ou um dano funcional ou emocional, que pode causar a redução ou a perda, temporária ou permanente, da capacidade de trabalhar ou, em situações mais extremas, a morte do colaborador: Desta forma, acidente do trabalho é aquele que gera perda ou redução da capacidade para o trabalho, se relacionando com a capacidade para execução do trabalho.

Analogamente, pode-se entender que, para haver um acidente do trabalho, é necessário, antes de ocorrer a presença de um risco, o qual se consuma quando há o acidente. É importante definirmos e diferenciarmos riscos de perigos. Perigos, é uma condição que tem a capacidade inerente de causar lesões, doenças ou danos à propriedade. Por outro lado, risco é a probabilidade de que esse perigo realmente cause algum dano, considerando tanto a frequência de exposição ao perigo quanto a gravidade das possíveis consequências. Portanto,

o risco é a combinação da chance da concretização dos perigos e dos possíveis impactos associados.

Classificação dos riscos

Os principais riscos ocupacionais se dividem em cinco principais categorias: riscos físicos, químicos, biológicos, ergonômicos e riscos de acidentes, conforme apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Grupos e classificação dos diversos riscos

GRUPO 1 VERDE	GRUPO 2 VERMELHO	GRUPO 3 MARROM	GRUPO 4 AMARELO	GRUPO 5 AZUL
Riscos Físicos	Riscos Químicos	Riscos Biológicos	Riscos Ergonômicos	Riscos Acidentes
Ruídos	Poeiras	Bactérias	Esforço físico intenso	Arranjo físico inadequado
Vibrações	Fumos	Protozoários	Levantamento e transporte manual de peso	Máquinas e equipamentos sem proteção
Radiações não-ionizantes	Névoas	Fungos	Exigência de postura inadequada	Ferramentas inadequadas ou defeituosas
Radiações ionizantes	Neblinas	Parasitas	Controle rígido de produtividade	Iluminação inadequada
Frio	Vapores	-	Trabalho em turno e noturno	Probabilidade de incêndio ou explosão
Umidade	Substâncias químicas em geral	-	Jornadas de trabalho prolongadas	Armazenamento inadequado
Pressões anormais	-	-	Monotonia e repetitividade	Animais peçonhentos

Fonte: Adaptado de SEGPLAN (2021).

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento de uma metodologia assertiva de elaboração de um mapa de riscos para ambientes laborais de uma universidade, primeiramente foi necessário fazer um levantamento dos principais documentos legais e normativas vigentes acerca da segurança do trabalho.

As principais leis observadas para este estudo foram:

- Lei n.º 6.514, de 22 de dezembro de 1977 (Brasil, 1977);
- Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988);
- Lei n.º 8.213, de 24 de julho de 1991 (Brasil, 1991);
- Portaria n.º 13, de 17 de agosto de 1992 (Brasil, 1992).

Além das legislações supracitadas, foi necessário compreender as definições das NRs, que são normas definidas pelo MTE.

Também foi necessário avaliar relatórios e documentos do estado de Goiás que trouxessem definições acerca da elaboração de um mapa de riscos. Neste sentido, destaca-se o Manual de Elaboração Mapa de Riscos, organizado, no ano de 2021, pela Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento – SEGPLAN (2021), no qual estão estabelecidos aspectos fundamentais para a elaboração de um mapa de riscos, tais como:

- A classificação dos cinco tipos de riscos existentes;
- Os principais agentes de riscos para cada tipo de risco;
- Definição e como se deve elaborar um mapa de riscos;
- Localização em que se deve colocar o mapa de riscos do ambiente avaliado, dentre outros.

No manual da SEGPLAN estão definidas ainda as sete principais etapas do mapeamento dos riscos em um ambiente laboral, sendo que cinco destas fases foram definidas como referência para este estudo: levantamento dos riscos; elaboração do mapa; análise dos riscos;

elaboração do relatório e apresentação do trabalho. Importante destacar ainda que cada risco identificado será avaliado de acordo com a sua intensidade, podendo ser baixo, médio ou alto (SEGPLAN, 2021).

Depois de finalizada a etapa dos aspectos legais, normativos e de relatórios, partiu-se para a definição de um modelo de questionário. Este documento deve ser aplicado com os colaboradores dos ambientes laborais e pelos próprios agentes mapeadores (pessoas que aplicam os questionários e elaboram o mapa de riscos), para que se consiga uma compreensão abrangente e detalhada dos riscos existentes nos ambientes avaliados. Para o presente estudo utilizou-se como referência o questionário elaborado em estudo de Katakí (2023), em que o autor aplica questionários para a elaboração de mapas de riscos para um laboratório de fundição e soldagem de uma universidade.

Por fim, é necessário que os *layouts* dos ambientes sejam atualizados para coerência com a atualidade do local. Além disso, como os questionários serão aplicados com todas as pessoas que atuam no ambiente a ser avaliado, além de ser respondido pelo próprio agente mapeador, haverá riscos que serão identificados por todos os colaboradores, mas que poderão ser considerados com intensidades diferentes. Para resolver este aspecto, deve-se fazer uma medição quantitativa desta intensidade de acordo com o que as normas dizem sobre o assunto. Contudo, para riscos que não são mensuráveis, é preciso encontrar outras formas de se definir qual a intensidade deste risco. Para esta nova situação, adotou-se o modelo de matriz de identificação dos riscos, elaborado por estudo da Universidade Federal do Pará – UFPA (2023) e que foi adaptado, no presente estudo, para a realidade dos riscos avaliados a partir da resposta de dois ou mais questionários.

Com estas três etapas principais definidas, é possível elaborar um mapa de riscos que consiga captar os agentes de riscos para cada um dos riscos existentes, além de serem avaliados com o nível de intensidade mais adequado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise realizada direcionou para uma elaboração de mapas de riscos a partir de uma avaliação qualiquantitativa, tendo como foco levar em conta tanto a percepção dos usuários de cada ambiente, quanto a mensuração de parâmetros, uma vez que esta análise quantitativa ainda serve de suporte para a avaliação qualitativa feita pelas pessoas que utilizam cada laboratório.

Documentos legais, normas e relatórios técnicos

A legislação foi de fundamental importância para a criação de uma metodologia assertiva de análise de riscos para elaboração de mapas. É a partir dos documentos legais e normativas que foram definidos, desde os critérios de identificação dos agentes de risco, até os parâmetros para sua representação visual. Desta forma, o entendimento das NRs, de legislações e de relatórios técnicos, como o Manual da SEGPLAN (2021), permitiu a definição de elementos-chave para o mapa de riscos: o tamanho das circunferências que determinam a intensidade dos riscos, a codificação de cores, a classificação dos tipos de riscos e, a inserção de informações úteis, como números de emergência e número de usuários do ambiente laboral.

Método de avaliação qualitativa dos agentes de risco ocupacionais

Para a definição qualitativa da intensidade de risco de cada ambiente avaliado, elaborou-se um questionário, por meio do *Google Formulários*, abrangendo cada aspecto de risco, com seus respectivos agentes, classificações, e intensidade, baseada na escala de probabilidade e impacto.

Matriz de riscos ocupacionais

Para a definição da intensidade de risco de cada ambiente avaliado (intensidade alta, média ou baixa), utilizou-se um estudo que, a partir das escalas de probabilidade e de impacto, obtém-se valores que, inseridos em uma matriz de risco, resultam em um valor de intensidade.

Na Tab. 2 está apresentada a classificação da escala de probabilidade, um instrumento de avaliação quantitativa que permite a mensuração e a classificação do nível de probabilidade de um evento ocorrer. Sendo que a escala de valoração da probabilidade varia de 1 (probabilidade muito baixa de o evento ocorrer) a 5 (probabilidade muito alta do evento ocorrer).

Tabela 2. Escala de classificação de probabilidade

ESCALA DE PROBABILIDADE		
Prob.	Peso	Descrição
Muito Baixa	1	O evento poderá ocorrer em situações excepcionais. Não há indícios que sinalizem a ocorrência do evento, sendo improvável que o mesmo ocorra.
Baixa	2	O evento tem um histórico de baixa frequência de ocorrências, sendo que pode ocorrer de forma inesperada ou causal.
Média	3	O evento se repete com frequência razoável ou há indícios que possa ocorrer de alguma forma.
Alta	4	O evento se repete com elevada frequência ou sua ocorrência é esperada, pois os indícios apontam essa possibilidade.
Muito Alta	5	O evento possui um histórico de frequência rotineira/constante, ou seja, é praticamente certo que o evento irá ocorrer.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em UFPA (2020).

Na Tab. 3 está apresentada a classificação de impacto, um instrumento de avaliação quantitativa que permite a mensuração e a classificação do nível de impacto que determinado evento, ao ocorrer, provocaria. Sendo que a escala de valoração do impacto varia de 1 (impacto do evento ocorrido é muito baixo) a 5 (impacto do evento ocorrido é muito alto).

Tabela 3. Escala de classificação de impacto

ESCALA DE IMPACTO		
Impacto	Peso	Descrição
Muito Baixo	1	Quando o evento ocorre não causa nenhum dano/problema ao desenvolvimento do trabalho ou a saúde/bem-estar do(a) trabalhador(a).
Baixo	2	Quando o evento ocorre compromete em alguma medida o trabalho e/ou a saúde/bem-estar do(a) trabalhador(a), mas não impede o alcance da maior parte do desenvolvimento laboral.
Médio	3	Quando o evento ocorre compromete razoavelmente o desenvolvimento do trabalho e/ou a saúde/bem-estar do(a) trabalhador(a), porém é algo recuperável quando ocorre.
Alto	4	Quando o evento ocorre compromete a maior parte do desenvolvimento do trabalho, assim como pode trazer danos à saúde e/ou bem-estar do(a) trabalhador(a), sendo o impacto gerado de difícil reversão.
Muito Alto	5	Quando o evento ocorre compromete totalmente o desenvolvimento do trabalho e/ou a saúde/bem-estar do(a) trabalhador(a), sendo irreversível.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em UFPA (2020).

Em seguida, na Tab. 4 está apresentada a Matriz de Probabilidade x Impacto, que representa um instrumento quantitativo que permitirá classificar o nível de risco.

Tabela 4. Matriz de Probabilidade x Impacto

MATRIZ DE RISCO DA UFG							
Impacto	Muito Alto 5		5 RM	10 RM	15 RA	20 RMA	25 RMA
	Alto 4		4 RB	8 RM	12 RA	16 RA	20 RMA
	Médio 3		3 RB	6 RM	9 RM	12 RA	15 RA
	Baixo 2		2 RMB	4 RB	6 RM	8 RM	10 RM
	Muito Baixo 1		1 RMB	2 RMB	3 RB	4 RB	5 RM
		Muito Baixa 1	Baixa 2	Média 3	Alta 4	Muito Alta 5	
		Probabilidade					
Legenda: RMB: Risco Muito Baixo; RB: Risco Baixo; RM: Risco Médio; RA: Risco Alto; RMA: Risco Muito Alto.							

Fonte: Elaborado pelos autores com base em UFPA (2020).

Por fim, na Tab. 5, está apresentada, de forma escalar, a classificação do nível de risco para cada agente de risco identificado em determinado ambiente laboral. De modo que, a partir do nível do risco torna-se possível determinar a intensidade do nível de cada agente de risco avaliado. Quanto maior a valoração obtida na matriz de risco, maior será a intensidade do risco.

Tabela 5. Classificação do nível de risco

Classificação do Nível de Risco na UFG	
Intensidade do Risco	Escala
Baixo	1 a 4
Médio	5 a 10
Alto	11 a 25

Fonte: Elaborado pelos autores com base em UFPA (2020).

Importância e destaque destes métodos

Desta forma, o presente método para criação de mapas de risco, prova sua importância pela capacidade de fornecer uma avaliação detalhada e precisa dos riscos ocupacionais. Neste sentido, a combinação de análises qualitativas e quantitativas permitiu uma compreensão mais completa dos riscos, equilibrando dados objetivos com a percepção dos usuários. Este processo fortaleceu a prevenção de acidentes ao integrar diferentes perspectivas e promover uma visão mais ampla dos riscos presentes no ambiente de trabalho.

Ademais, o uso de uma matriz de risco facilitou a classificação estruturada dos riscos, fornecendo um suporte lógico e técnico à avaliação. Enquanto a coleta de dados qualitativos, trouxe *insights* do cotidiano, tornando o processo mais realista e contextualizado, gerando, assim, decisões mais seguras e eficazes na prevenção de acidentes em laboratórios universitários.

CONCLUSÕES

A implementação de uma metodologia robusta e assertiva para a criação de mapas de risco em ambientes laboratoriais universitários é essencial para a promoção de um ambiente

de trabalho seguro e saudável. A combinação de análises quantitativas, com o uso de matrizes de probabilidade e impacto, e qualitativas, por meio de questionários aplicados aos usuários, permite uma avaliação precisa e abrangente dos riscos, resultando no alinhamento da percepção dos trabalhadores à realidade técnica dos riscos.

Esse método não apenas contribui para a redução de acidentes e doenças ocupacionais, mas também fortalece a cultura de segurança dentro dos laboratórios de uma universidade, envolvendo ativamente os seus usuários. Assim, a adoção de um mapa de risco elaborado com a metodologia correta se mostra um recurso indispensável para a identificação e prevenção de possíveis incidentes, garantindo um ambiente mais seguro e produtivo.

Por fim, espera-se que esta abordagem sirva de referência para a elaboração de mapas de risco em ambientes acadêmicos, mas também podendo ser estendidos a empresas e indústrias que desejem fazer um mapa de riscos detalhado, o que contribui para uma gestão de riscos mais eficaz, consciente e completa.

Agradecimentos. Os autores agradecem o Projeto “Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia para Identificação de Riscos em Espaços Laborais com Foco na Segurança do Trabalho”, vinculado à Universidade Federal de Goiás (C.C. 14.251 – FUNAPE), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. 1991. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 7 nov. 2024.
- BRASIL. Lei nº 8.213, de 24 de julho de 1991. Dispõe sobre os Planos de Benefícios da Previdência Social. 1991. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8213cons.htm. Acesso: 08/11v. 2024
- BRASIL. Ministério do Trabalho e da Administração. Portaria nº 5, de 17 de agosto de 1992. Altera a Norma Regulamentadora nº 9 estabelecendo a obrigatoriedade da elaboração de Mapa de Riscos Ambientais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 ago. 1992.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 4 - Serviços especializados em segurança e medicina do

trabalho. Portaria n.º 2.318, de 03 de agosto de 2022. Brasília, DF: MTE, 2022.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 5 - Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA). Portaria n.º 3.214, de 08 de junho de 1978. Brasília, DF: MTE, 1978.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Portaria n.º 3.214, de 08 de junho de 1978. Brasília, DF: MTE, 1978.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 15 - Atividades e Operações Insalubres. Portaria n.º 3.214, de 08 de junho de 1978. Brasília, DF: MTE, 1978.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. Portaria n.º 422 (Altera a NR-05), de 07 de outubro de 2021. Brasília, DF: MTP, 2021.

KATAKI, Thiago Henrique Gomes. Implementação do Programa 5S em Laboratório de Soldagem e Fundição de uma Universidade. 2023. Monografia – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023

MIRANZI, et. al. Acidentes de Trabalho entre os Trabalhadores de uma Universidade Pública, Rev. bras. Saúde ocupacional, São Paulo, 33 (118): 40-47, 2008.

MOTA, Tamiris T.; FROTA, Oleci P. A implantação do Mapa de Riscos no ambiente de trabalho: revisão integrativa acerca de técnicas inovadoras. Revista Saúde e Pesquisa. Rio de Janeiro, vol.6, no. 3, p. 495-501, dez. 2013.

NEVES, W. B. et al. Mapa de risco em laboratório clínico. Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento. Recife, p. 78, 2006.

PEREIRA, M. E. de C. et al. A Importância da abordagem contextual no ensino de biossegurança. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, 1643-1648, 2012.

PINTO, V. M. A importância do mapa de risco para a prevenção de acidentes de trabalho em cozinhas/copas de hospitais do interior do Rio Grande do Sul/RS. Saúde (Santa Maria), 2014.

SEGPLAN – Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento. Gerência de Saúde e Prevenção da Superintendência Central de Recursos Humanos. Manual de elaboração mapa de riscos. Goiânia/GO, 16 p., 2021.

UFPA – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Manual de Gestão de Riscos Organizacionais da UFPA. Versão 2, 30 abr. 2020. Disponível em: <https://portal.ufpa.br/index.php/transparencia-publica>. Acesso em: 7 nov. 2024.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616712>

AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE PRÉ-FORMAS DE AÇO INOX SUPER DUPLEX FABRICADAS POR MADA UTILIZANDO RESFRIAMENTO POR QUASE IMERSÃO

João V. O. Silva¹, Ruham P. Reis², Daniel Souza¹

¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG)

Alameda Ingá, quadra B, bloco 5, s/n - Chácaras Califórnia, 74045-155, Goiânia/Goiás, Brasil joao.silva2@discente.ufg.br, daniel.souza@ufg.br

²Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG, 38408-100

ruhamreis@ufu.br

Resumo. Este estudo aborda a caracterização e análise das microestruturas de pré-formas produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), tanto sob resfriamento natural quanto com a aplicação do Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI). Além dessas pré-formas, foram investigadas as microestruturas de materiais laminados comparáveis, com o objetivo de fornecer uma referência microestrutural e da distribuição da fração de fases. Os resultados destacaram a presença de fases secundárias significativas nas pré-formas obtidas por MADA, notadamente a austenita secundária e a fase σ , as quais podem impactar a resistência à corrosão e a tenacidade do material em estudos futuros.

Palavras-chave: Mada. Aço Inoxidável Duplex. Microestrutura.

INTRODUÇÃO

O aço inoxidável é um dos materiais mais importantes no mundo da engenharia. Suas amplas aplicações em plantas químicas, petroquímicas, offshore e de geração de energia demonstram sua confiabilidade. Em particular, os aços inoxidáveis duplex (austenítico-ferríticos) e super duplex tornaram-se muito populares nas indústrias de petróleo e gás após a década de 1970. Essa expansão está associada à excelente combinação de propriedades, como maior resistência que os aços inoxidáveis austeníticos, melhor resistência à corrosão sob tensão e preço semelhante aos aços inoxidáveis convencionais.

Tradicionalmente, a expressão “aço inoxidável duplex” refere-se a uma mistura das estruturas cristalinas de ferrita cúbica de corpo centrado (CCC) e austenita cúbica de face centrada (CFC). A maioria dos aços inoxidáveis duplex destina-se a conter quantidades

semelhantes de fases de ferrita e austenita na condição recozida. Os aços inoxidáveis duplex geralmente possuem resistência à corrosão semelhante às ligas austeníticas e, tipicamente, têm melhor resistência à corrosão sob tensão do que os aços inoxidáveis austeníticos. (PRAWOTO et al., 2008).

Os primeiros aços inoxidáveis duplex forjados foram produzidos na Suécia em 1930 e foram usados na indústria de papel sulfite. Essas ligas foram desenvolvidas para reduzir os problemas de corrosão intergranular nos primeiros aços inoxidáveis austeníticos de alto teor de carbono. Uma das primeiras ligas duplex desenvolvidas especificamente para melhorar a resistência à corrosão sob tensão de cloretos (SCC) foi a 3RE60. O tipo AISI 329 tornou-se bem estabelecido após a Segunda Guerra Mundial e foi usado extensivamente para tubos trocadores de calor em serviços de ácido nítrico. Atualmente, o tipo 2205 é a liga de aço inoxidável duplex mais amplamente utilizada. Ele encontra aplicações devido à sua excelente resistência à corrosão e alta resistência mecânica (IMOA, 2014).

Os ciclos térmicos, juntamente com elementos de liga como Nb, Cr, Mo, Si, W e Cu, podem causar um desequilíbrio na estrutura duplex de ferrita/austenita e a precipitação de compostos intermetálicos, o que afeta negativamente as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex (AID). (IMOA, 2014)

Entre os processos de deposição de energia direta (DED) existentes, o método de deposição por arco elétrico é de particular interesse para este estudo. A fabricação ocorre através da energia do arco elétrico e da adição de material na forma de arame, camada por camada. Este processo é referido em inglês como "Wire Arc Additive Manufacturing" (WAAM), conforme Ahn (2021). Em português, este termo pode ser adaptado como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA).

Diante do fato, o gerenciamento térmico é um fator importante, ao definir estratégias para mitigar problemas de acúmulo de calor. Uma abordagem inclui técnicas de dissipação de calor nas pré-formas, tanto entre os passes quanto durante a deposição de material. É comum adotar intervalos de espera entre as camadas para que a temperatura atinja um nível

suficientemente baixo. No entanto, quando a dissipação de calor é natural, esses intervalos podem se prolongar, afetando a produtividade. Por isso, as inovações recentes em manufatura aditiva buscam otimizar a extração de calor das pré-formas durante a deposição, como na técnica de Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI). (SCOTTI, 2021)

Este estudo tem como objetivo a avaliação microestrutural de pré-formas de aço inoxidável super duplex (AISD) fabricadas por MADA, utilizando técnica de resfriamento natural (RN) e RAQI. Para tal comparação, utilizou-se como referência de avaliação a microestrutura de um AID fabricado por processo convencional e laminado. A investigação do assunto se deu a fim de identificar possíveis diferenças entre as possibilidades de formação das fases de Austenita, Ferrita e a precipitação de fases secundárias resultantes do processo de fabricação e de seu resfriamento.

As pré-formas utilizadas nos experimentos foram desenvolvidas durante a pesquisa sobre manufatura aditiva por deposição a arco de paredes finas de aço inoxidável super duplex, que contou com a aplicação da técnica de Resfriamento Ativo por Quase-Imersão, conforme descrito por Scotti (2021).

DESENVOLVIMENTO

Manufatura aditiva por deposição a arco (MADA)

No processo MADA, o arame é aquecido, fundido e transferido para a poça de fusão, onde solidifica na borda dessa poça e forma as peças projetadas camada por camada. O processo MADA é derivado da tecnologia tradicional de soldagem por arco. O MADA, também conhecido como “*shape welding*” (termo europeu) e “*structural weld build up*” (termo americano), é utilizado há bastante tempo. Já em 1926, Baker patenteou a aplicação do arco elétrico como fonte de calor para produzir objetos volumosos ao pulverizar metal fundido nas camadas depositadas. Em 1983, Kussmaul empregou o “*shape welding*” para fabricar produtos de grande escala em aço de alta resistência 20MnMoNi5, com peso de 79 toneladas. O MADA (*shape*

welding) foi utilizado pelos alemães para produzir componentes nucleares primários no final do século XX. Atualmente, o processo MADA é aplicado em indústrias como a aeroespacial (por exemplo, em painéis reforçados, costelas de asa), nuclear, naval (como hélices de navios) e de arquitetura (como em pontes de aço). (JIN et al., 2020)

Aços inoxidáveis duplex

Os aços Inoxidáveis duplex (AID) são ligas compostas de Fe-Cr-Ni-Mo-N e podem incluir também adições de Cu e outros elementos. Elas apresentam uma estrutura austeno-ferrítica, com cerca de 50% de cada fase (COPAERT, 2008). São conhecidas por sua alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão, especialmente em ambientes com cloretos, nos quais os aços austeníticos tendem a apresentar um desempenho inferior. Um resfriamento muito lento e a manutenção por tempos longos a temperaturas entre cerca de 1000 e 600°C pode levar a precipitação de compostos intermetálicos que também prejudicam as propriedades mecânicas e químicas. (MODENESI, 2008)

Um fator econômico relevante é o baixo teor de níquel, geralmente de 4-7%, comparado aos 10% ou mais dos aços austeníticos, o que reduz o custo do ciclo de vida dos AID em muitas aplicações. Nos últimos anos, o uso de nitrogênio como elemento de liga tem aumentado, pois estabiliza a austenita, substituindo parcialmente o níquel. Como consequência, a formação de austenita durante a soldagem é acelerada e a resistência à corrosão, especialmente à corrosão por pites, também aumenta. (NILSSON, 1992)

A resistência à corrosão por pites é calculada através da Eq. 1, definindo *Pitting Resistance Equivalent* (PRE) para classificação destes aços entre quartos diferentes grupos, sendo estes apresentados na Tab 1.

$$PRE = Cr + 3,3(Mo + 0,5W) + 16N \quad (1)$$

Comparados aos aços inoxidáveis austeníticos, os aços inoxidáveis duplex diferem principalmente nos teores de cromo, níquel e molibdênio. O cromo é um formador de ferrita;

em concentrações mais altas, exige maior quantidade de níquel para formar uma estrutura austenítica ou duplex. Além disso, concentrações elevadas de cromo promovem a formação de fases intermetálicas. Nos aços inoxidáveis austeníticos, o teor de cromo é geralmente de, no mínimo, 18%, enquanto nos aços inoxidáveis duplex de segunda geração, o teor mínimo é de 22%. O cromo também aumenta a resistência à oxidação em temperaturas elevadas, o que é essencial para a formação e remoção da camada de óxido ou coloração de aquecimento resultante de tratamentos térmicos ou soldagem. (ARMAS, 2008)

Tabela 1. Composição química e PRE dos grupos de AID (KAHAR, 2017)

Tipo	%Cr	%Ni	%Mo	%N	PRE
<i>Lean</i> Duplex	20-24	1-5	0,1-0,3	0,1-0,22	24-25
Standard Duplex	21-23	4,5-6	2,5-3,5	0,1-0,22	33-35
<i>Super</i> Duplex	24-29	4,5-8	2,7-4,5	0,1-0,35	>40
<i>Hyper</i> Duplex	27	6,5	5	0,4	49

Por outro lado, o níquel atua como estabilizador da austenita, ou seja, sua adição a ligas à base de ferro favorece a mudança da estrutura cristalina do aço inoxidável de cúbica de corpo centrado (CCC) que é ferrítica para cúbica de face centrada (CFC) que é austenítica. Os aços inoxidáveis ferríticos contêm pouco ou nenhum níquel, os duplex contêm uma quantidade intermediária, como de 4 a 7%, enquanto os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 apresentam, no mínimo, 8% de níquel (PRAWOTO et al., 2008). A adição de níquel retarda a formação de fases intermetálicas prejudiciais nos aços inoxidáveis austeníticos, embora seja menos eficaz que o nitrogênio na inibição dessas fases nos aços duplex. A estrutura cúbica de face centrada é responsável pela excelente tenacidade dos aços inoxidáveis austeníticos, e sua presença em aproximadamente metade da microestrutura dos aços duplex aumenta significativamente a tenacidade em comparação com os aços inoxidáveis ferríticos (PRAWOTO et al., 2008).

Resfriamento ativo por quase-imersão (RAQI)

A técnica conhecida como Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI), apresentado por da Silva et. al (2018), envolve realizar a deposição dentro de um tanque onde o nível do

fluido é controlado continuamente. Esse controle garante a dissipação eficaz do calor da pré-forma sem a necessidade de submergi-la completamente (da SILVA et. al, 2018).

Devido ao método de resfriamento permitir um contato direto das camadas submersas de deposição durante todo o tempo de construção, resulta-se em uma dissipação de calor contínua e com maior transferência de calor por convecção.

Segundo o apresentado pelos autores supracitados, o método de resfriamento apresentado, foi capaz de: Aumentar substancialmente a taxa de resfriamento e reduzir significativamente a temperatura de interpasse e, portanto, o acúmulo de calor em pré-formas; Aumentar a produtividade de construção de pré-formas por permitir redução ou eliminação do tempo de interpasse; Melhorar a regularidade geométrica e, portanto, reduzir a quantidade de usinagem requerida para transformar pré-formas em peças; Não induzir porosidade em pré-formas e equilibrar (tendência) as propriedades mecânicas de pré-formas (da SILVA et. al, 2018).

METODOLOGIA

Material

As pré-formas fabricadas por Scotti (2021) utilizaram como metal de adição o arame AWS ER2594 comumente utilizado na soldagem de AISD, com composição química semelhante ao SAF 2507. Esta composição química é apresentada na Tab. 2.

Tabela 2: Composição química dos elementos do arame AWS ER2594 (BÖHLER)

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
% Massa	0,015	0,35	0,5	25	9,5	4,0	0,25

Os materiais laminados utilizados para referência são os AID SAF 2304 e SAF 2205, fornecidos pelo fabricante Aperam South America, que possuem sua composição química apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3: Composição química em porcentagem de massa dos elementos dos aços SAF 2304 e SAF 2205 (FABRICANTE APERAM SOUTH AMERICA)

Material (SAF)	Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
2304	% Massa	0,011	0,51	01,33	22,26	4,01	0,19	1228
2205	% Massa	0,012	0,57	1,73	22,45	5,35	3,01	1624

Preparação Metalográfica

As amostras foram cortadas em formato regular de tamanhos padrão de 10 x 48 mm e usinadas em uma de suas faces laterais. Para as amostras fabricadas em MADA, as superfícies das faces escolhidas para avaliação foram lixadas com lixas em ordem crescente de granulometria (120, 220, 320, 400, 600 e 1200) e atacadas com ataque eletrolítico de 10 V por 35 s, utilizando o reagente Vilella. Para as amostras laminadas, as superfícies das faces escolhidas para avaliação foram lixadas com lixas em ordem crescente de granulometria (120, 220, 320, 400, 600 e 1200) e atacadas com Nital em concentração de 5% por 10 s. Após realizou-se polimento com aluminas de 1µm em todas as peças. As micrografias foram obtidas em um microscópio ZEISS Axio Imager M2m.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização microestrutural das peças fabricadas em MADA

A Fig. 1 apresenta as microestruturas encontradas na base, meio e topo em cada uma das duas amostras utilizadas no estudo. Onde a primeira pré-forma foi fabricada com resfriamento natural e tempo de espera de 30 s entre as deposições de cada camada enquanto a segunda pré-forma possui fabricação com RAQI, tempo de espera de 15 s entre as deposições de cada camada e distância entre a lâmina de água e a deposição (DLAP) de 13 mm. Ambas as pré-formas foram fabricadas com modo de operação CMT e velocidade de deposição de 20cm/min.

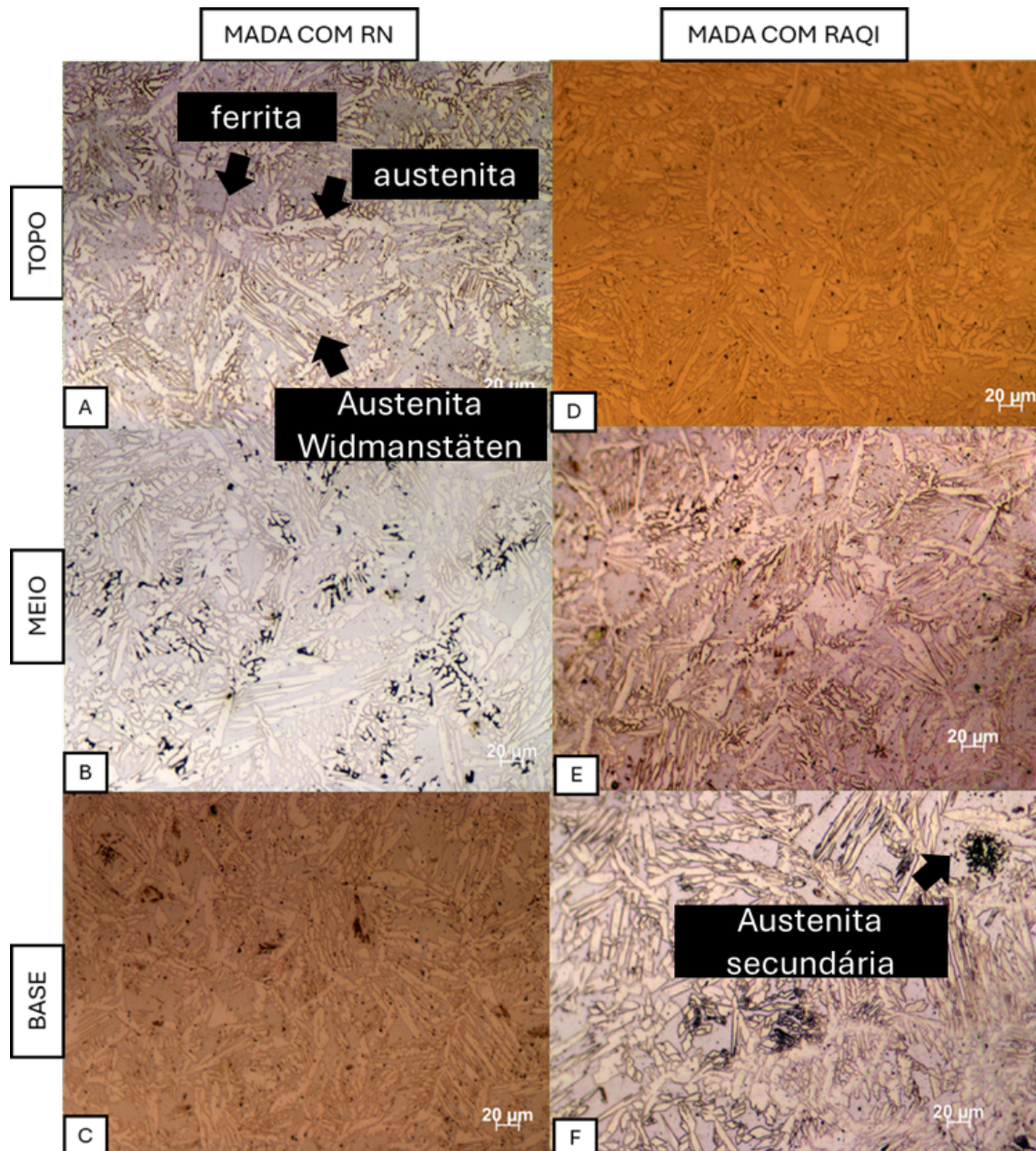


Figura 1. Microestruturas das pré-formas fabricadas em MADA.

As imagens revelam duas fases predominantes, onde as cores claras se mostram como Austenita e as cores escuras como ferrita. Pode-se perceber também a presença de formação de austenita nas regiões intragranulares, e do crescimento de austenita de Widmanstätten. Ninhos de Austenita secundária também são identificados, principalmente nas regiões próximas a base, evidenciando o crescimento desta fase nas regiões de maior aquecimento.

A fase σ pode ser observada nas partes A, B e E da Fig. 1, especialmente nas regiões de crescimento dendrítico, indicando possíveis efeitos indesejáveis na tenacidade e resistência à corrosão.

Caracterização microestrutural das peças laminadas

A Fig. 2 apresenta as microestruturas dos aços inoxidáveis super duplex SAF 2304 e SAF 2205 após o processo de laminação. Conforme relatado por Wen & Ludin, (2005) observa-se uma clara orientação dos grãos na direção de laminação, evidenciada pelo alongamento das fases austenita e ferrita. A distribuição e a proporção entre as fases indicam uma estrutura bifásica homogênea, com características que confirmam a presença do alinhamento dos grãos. Essa morfologia alongada pode dificultar a distinção das placas de austenita de Widmanstätten e das regiões intragranulares de austenita que seriam facilmente encontradas nestes materiais em estado de estrutura bruta de fusão. Hosseini et al. (2016) encontraram resultados semelhantes ao verificar um material similar. Este estudo, entretanto, não apresentou segregação de solidificação. Em ambos, não se identificou nenhuma fase secundária nos materiais.

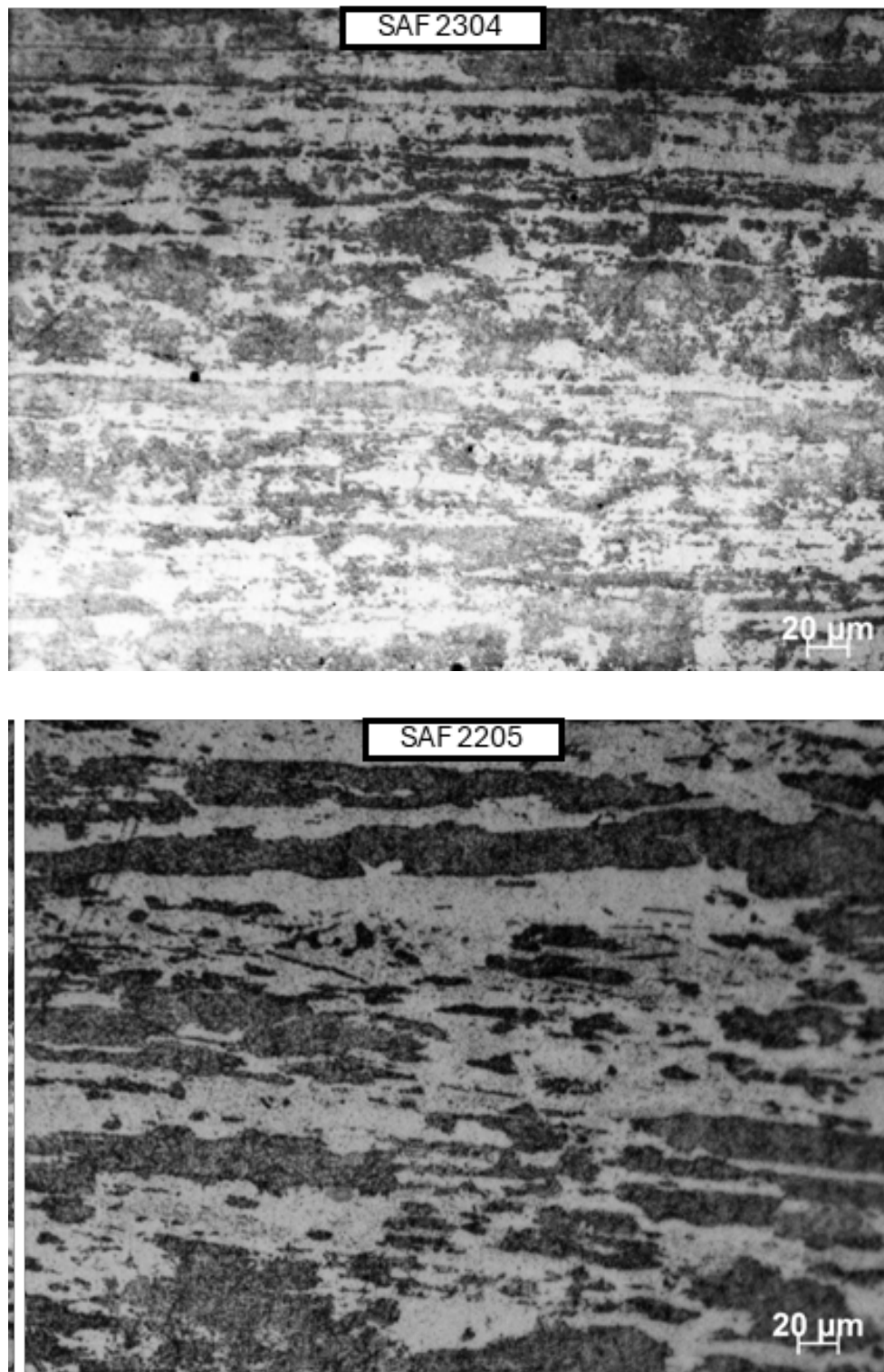


Figura 2. Microestruturas das peças laminadas.

Identificação das fases secundárias nas pré-formas fabricadas em MADA

A Fig. 3 apresenta a identificação das fases encontradas nas microscopias anteriormente apresentadas na Fig. 1. A presença de austenita secundária é evidente em locais mais próximos às bases da pré-formas, o que pode ser entendido devido o reaquecimento resultante das deposições multipasses. Este resultado confirma estudos anteriores que observaram fenômeno semelhante. Bermejo et al. (2019) indicam que os ciclos de reaquecimento provocaram a formação de austenita nas regiões intragranulares. Scotti (2021) reforça que a austenita secundária apresenta maior suscetibilidade à corrosão localizada, pois possui concentrações mais baixas de N, Cr e Mo em comparação com a austenita intergranular e a austenita de Widmanstätten. Eriksson et al., (2018) encontraram fato similar à austenita secundária dentro dos grãos de ferrita, e reforça que a precipitação de austenita secundária melhora a tenacidade, mas pode prejudicar a resistência à corrosão. A Fig. 3, detalhe F2 apresenta detalhe de um ninho de austenita secundária com processo de oxidação iniciado devido ataque eletrolítico.

A fase σ encontrada nas seções A, B e E são indicadas em estudos anteriores, apontando possíveis efeitos indesejáveis de resistência a corrosão e tenacidade. Bermejo et al. (2019) também localiza a fase em seu estudo, porém em menor quantidade em relação ao aqui apresentado. Hosseini et al. (2016) apontam como fator importante para a formação da fase, a permanência em temperaturas críticas combinadas à vários ciclos de reaquecimento, o que pode explicar este aumento presente neste estudo em relação à Bermejo et al. (2019).

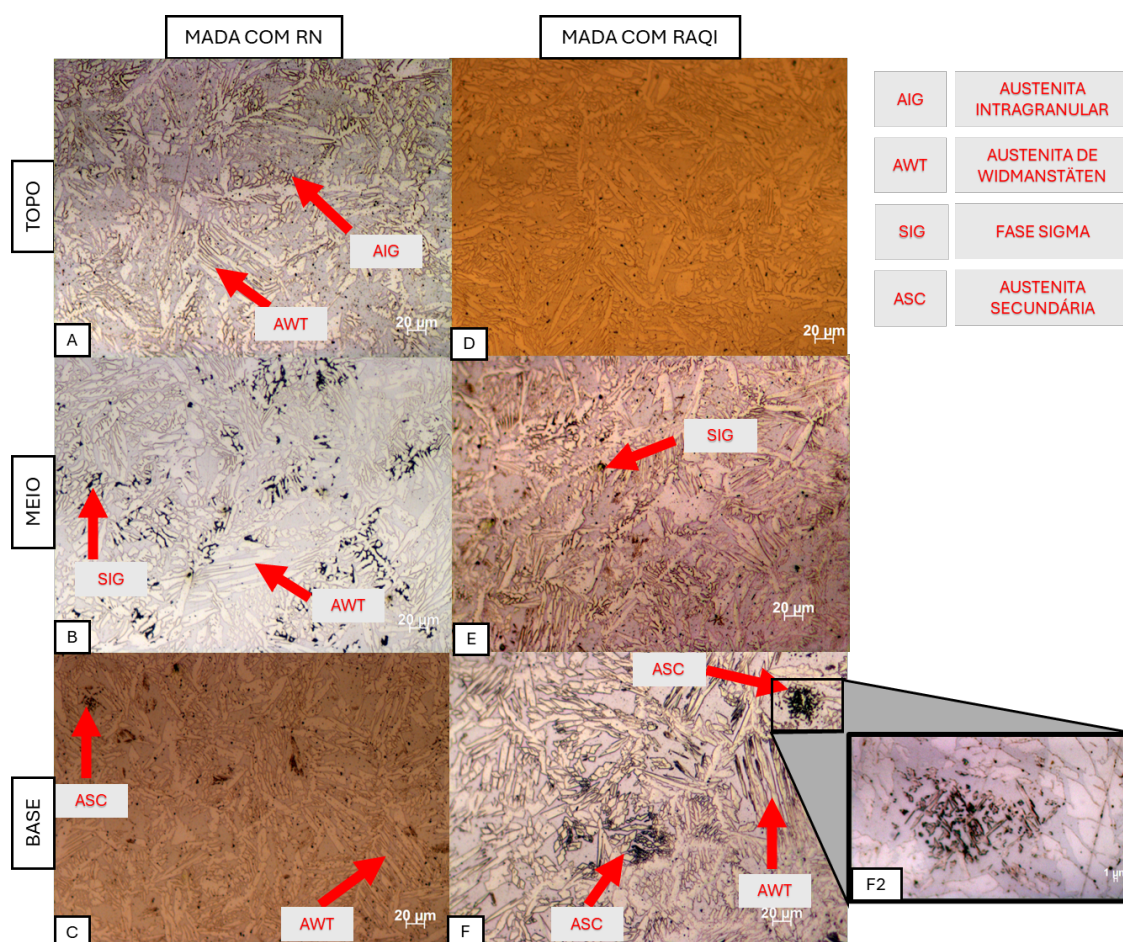


Figura 3: Identificação das Microestruturas nas pré-formas de MADA.

CONCLUSÕES

O presente estudo identificou potencialidades do RAQI ao observar a redução de fases secundárias nos topos e meio das amostras quando comparado ao grau encontrado nas peças em MADA com resfriamento natural.

A presença de austenita secundária apresentou-se como um ponto a ser verificado com maior cautela, visto que sua aparição em regiões da base das pré-formas indica que os múltiplos reaquecimentos podem ainda influenciar a resistência a corrosão do material mesmo com utilização de RAQI.

A utilização do RAQI também foi positiva na presença de fase σ observada em ambas as amostras de MADA, porém em menor quantidade quando fabricada por RAQI.

As peças laminadas não apresentaram variações expressivas, como esperado, com percentual de fases equivalentes entre austenita e ferrita e sem detecção de fases secundárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHN, D. G. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology Korean Society for Precision Engineering, 1 mar. 2021.
- BERMEJO, M. A. V., HURTIG, K., EYZOP, D., KALSSON, L. A new approach to the study of multi-pass welds- microstructure and properties of welded 20-mm-thick superduplex stainless steel. Applied Sciences (Switzerland), v. 9, n. 6, 2019.
- ERIKSSON, M.; LERVÅG, M.; SØRENSEN, C.; ROBERTSTAD, A.; BRØNSTAD, B. M.; NYHUS, B.; AUNE, R.; REN, X.; AKSELSSEN, O. M. Additive manufacture of superduplex stainless steel using WAAM. MATEC Web of Conferences. Anais...EDP Sciences, 7 ago. 2018.
- HOSSEINI, V. A.; BERMEJO, A. V. M.; GÅRDSTAM, J.; HURTIG, K.; KARLSSON, L. Influence of multiple thermal cycles on microstructure of heat-affected zone in TIG-welded super duplex stainless steel. Welding in the World, v. 60, n. 2, p. 233–245, 1 fev. 2016.
- HUBERTUS COPAERT. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- IMOA. Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels 2. 3. ed. London: International Molybdenum Association (IMOA), 2014.
- JIN, W. et al. Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review. Applied Sciences (Switzerland)MDPI AG, 1 mar. 2020.
- JOÃO DA SILVA, L.; SOUZA, D. M.; BEZERRA DE ARAÚJO, D. Gerenciamento Térmico via Resfriamento Ativo por Quase-imersão Aplicado à Manufatura Aditiva por Fusão-Deposição a Arco. 2018.
- KOTECKI, D. J. Some Pitfalls in Welding of Duplex Stainless Steels (Algumas Armadilhas na Soldagem de Aços Inoxidáveis Duplex). Soldag e Inspeção, Vol. 15 No. 4, p. 336–343, out. 2010.

NILSSON, J.-O. Overview Super duplex stainless steels. *Materials Science and Technology*, p. 685–701, ago. 1992.

PRAWOTO, Y. et al. Design and failure modes of automotive suspension springs. *Engineering Failure Analysis*, v. 15, n. 8, p. 1155–1174, dez. 2008.

SCOTTI, F. *Manufatura Aditiva Por Deposição A Arco De Paredes Finas De Aço Inoxidável Super Duplex Com Resfriamento Ativo Por Quase-Imersão*. (Dissertação de mestrado), Universidade Federal de Uberlândia: Disponível em: <<http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.471>>.

WEN, S.; LUNDIN, C. D.; BATTEN, G. *Metallurgical Evaluation Of Cast Duplex Stainless Steels And Their Weldments Submitted To U. S. Department Of Energy*. 2005.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616747>

DESENVOLVIMENTO DE DOMÍNIO EM PDDL PARA PLANEJAMENTO AUTOMATIZADO E REPROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Hiago S. Motta¹, João P. S Fonseca¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás
Alameda Ingá, quadra B, bloco 5 - Chácara Califórnia, 74045-155, Goiânia - GO, Brasil.
hiagosmotta@gmail.com, jpsfonseca@ufg.br

Resumo. Uso da Planning Domain Definition Language (PDDL) permite o planejamento e reprogramação automaticamente de processos. A metodologia envolve a modelagem do domínio em PDDL, representando os objetos e suas interações no ambiente automatizado. No domínio, são definidos setores como classificação, transporte, separação e estoque, com ações e estados descritos conforme suas precondições e efeitos. No código problema, o cliente pode definir as condições iniciais e os objetivos que irão interagir com o domínio para montar o planejamento. Foi utilizado o *Solver* LAMA-first, para planejamento automatizado, que gerou um plano de execução ágil. O plano pode ser convertido para leitura e escrita em entradas e saídas de um CLP, permitindo a programação e reprogramação automáticas com grande aplicação na indústria 4.0. Os resultados demonstram a eficácia do uso de PDDL e inteligência artificial para planejar e adaptar processos industriais tornando o processo de automação ágil e flexível, reduzindo a necessidade de reprogramação manual, os custos e otimizando a produção.

Palavras-chave: Planejadores Automatizados. CLP. PDDL. Inteligência Artificial.

INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 visa alcançar modularidade e reconfigurabilidade elevadas, integrando todos os sistemas produtivos para responder de forma ágil e eficiente às mudanças constantes do mercado (HOEBERT, 2023). Diante do aumento da variabilidade nos negócios e a redução do ciclo de vida dos produtos, a demanda por planejamento e replanejamento de fábricas cresce exponencialmente, colocando pressão sobre custos e prazos (BURGGRÄF, 2021). Segundo VYSKOCIL (2023), os sistemas de manufatura precisam de flexibilidade para operar em larga escala, atender pedidos personalizados e respeitar prazos curtos. Portanto, robôs e sistemas

automatizados assumem um papel essencial pela capacidade de executar tarefas com alta velocidade, precisão e eficiência por períodos prolongados.

No entanto, o principal desafio surge nas atualizações de produtos, que exigem modificações no código de programação — um processo demorado e que exige alto nível de conhecimento técnico nos métodos de controle tradicionais. Para superar essa barreira, é crucial que as plantas industriais autônomas utilizem modelos que representem o conhecimento do domínio de forma que a automação possa inferir e executar atividades com base em raciocínio predefinido (GHALLAB, 2016). A implementação da *Planning Domain Definition Language* (PDDL), linguagem projetada para especificar qualquer problema de planejamento ou agendamento (WIKI, 2024), para descrever o domínio do conhecimento de uma planta industrial é uma ferramenta poderosa nesse contexto, pois permite a separação entre conhecimento e lógica de programação. Isso facilita a aplicação de planejadores automáticos que podem gerar novos planos de ação sem necessidade de reprogramação completa.

Para alcançar essa autonomia, um domínio bem definido em PDDL é essencial, pois ele deve representar com precisão os recursos, as condições e as restrições do sistema de produção. A definição robusta do domínio permite que os planejadores automáticos façam uso do modelo descritivo para definir o "o quê" de cada etapa, enquanto o CLP executa o "como" com base em instruções derivadas do modelo operacional. Esse design garante que o planejamento ocorra em um loop aberto, enquanto a execução segue um loop fechado, otimizando as operações e a reprogramação contínua dos CLPs (FONSECA, 2016).

O código em PDDL desenvolvido para este estudo serve como base para o planejamento automatizado em ambientes industriais, proporcionando uma descrição detalhada e formal dos elementos e ações que compõem o sistema produtivo. Essa linguagem permite representar objetos, classes, estados e condições do domínio, facilitando o entendimento e a interação de cada componente envolvido.

Assim, a integração entre CLPs, que utilizam linguagens de programação de baixo nível, e planejadores automáticos com PDDL permite descrever domínios, ações e objetivos em um nível formal de alto nível. Ao definir precisamente as características e as relações entre os objetos, como peças, esteiras e atuadores, o código PDDL possibilita que o sistema seja capaz de responder automaticamente a mudanças e demandas. Essa abordagem viabiliza uma programação e reprogramação mais eficiente dos CLPs, adaptando o sistema automaticamente para mudanças de produto e produção.

METODOLOGIA

O sucesso da programação em PDDL, uma linguagem de programação orientada por objeto, depende diretamente da descrição correta do domínio para desenvolvimento de um planejamento automatizado. O domínio deve conter todos os objetos que possuem alguma interação com o ambiente a ser automatizado e suas classes correspondentes. A partir desses objetos e classes, todo o sistema deve ser modelado pautando os estados que esses objetos podem assumir, podendo também, por herança, herdar das suas classes os estados determinados.

Para AU (2009) a entrada do planejador inclui descrições de Σ (ambiente), o(s) estado(s) inicial(is) em que Σ pode estar antes de o agente de execução do plano realizar qualquer ação, e os objetivos desejados. Se o planejamento estiver sendo feito online (ou seja, se o planejamento e a execução do plano estiverem ocorrendo ao mesmo tempo), a entrada do planejador também incluirá feedback sobre o estado atual da execução do plano ou política, conforme ilustrado na figura 1. Portanto, a saída do planejador consiste em um plano (uma sequência linear de ações para o agente executar) ou em uma política (um conjunto de pares estado-ação, com no máximo uma ação para cada estado).

Portanto, a fim de descrever esse domínio, primeiro deve-se entender as relações presentes no sistema.

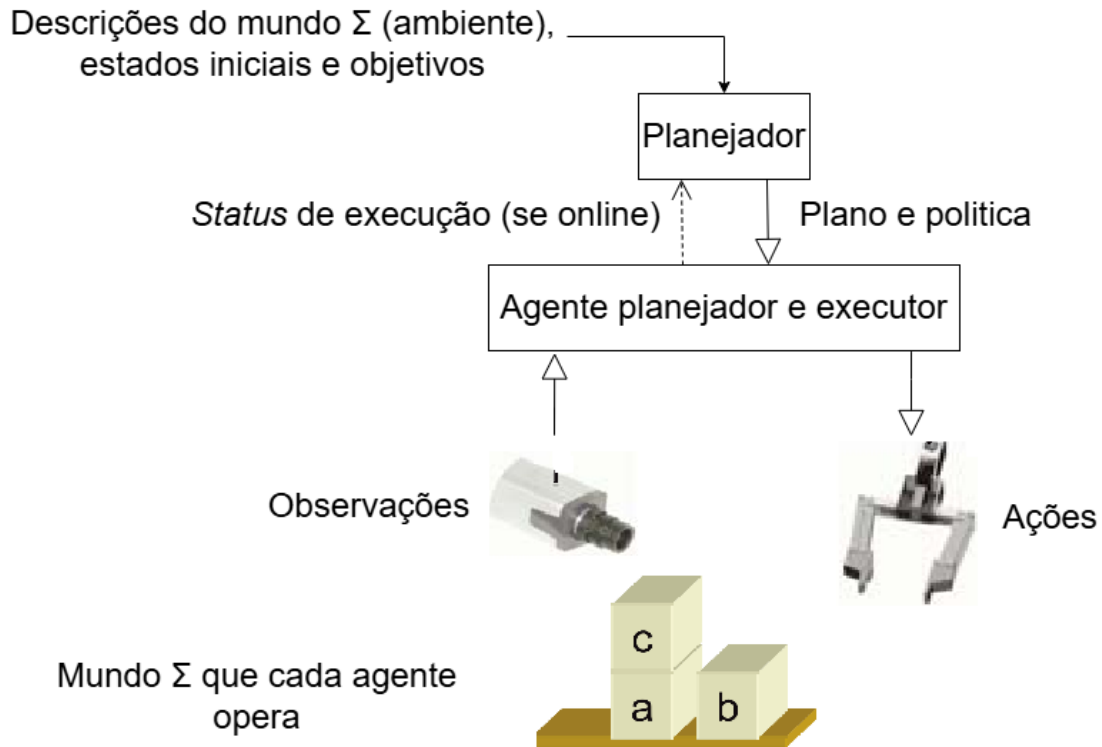


Figura 1 - Modelo conceitual de *AI Planning*, modificado de AU (2009)

2.1 Bancada de separação

A figura 2 mostra a bancada de separação didática da Universidade Federal de Goiás, referência utilizada para a modelagem do domínio em PDDL, controlada por um CLP da fabricante *Schneider* modelo M221. Na figura 2 é possível observar que ela possui, de maneira resumida, 4 setores triviais: classificação da peça (sensores na entrada da esteira), transporte da peça (esteira), separação da peça (atuadores pneumáticos) e estoques. Cada setor é descrito dentro do código domínio e problema em PDDL, sendo o setor de classificação descrita dentro do código problema (pois trata-se das condições iniciais do domínio de controle), a estação de transporte e separação já são descritas no domínio por se tratar de ações com precondições e efeitos que serão tomadas durante o processo e, por fim, o setor de estoque é descrito como um efeito dessas ações no domínio.

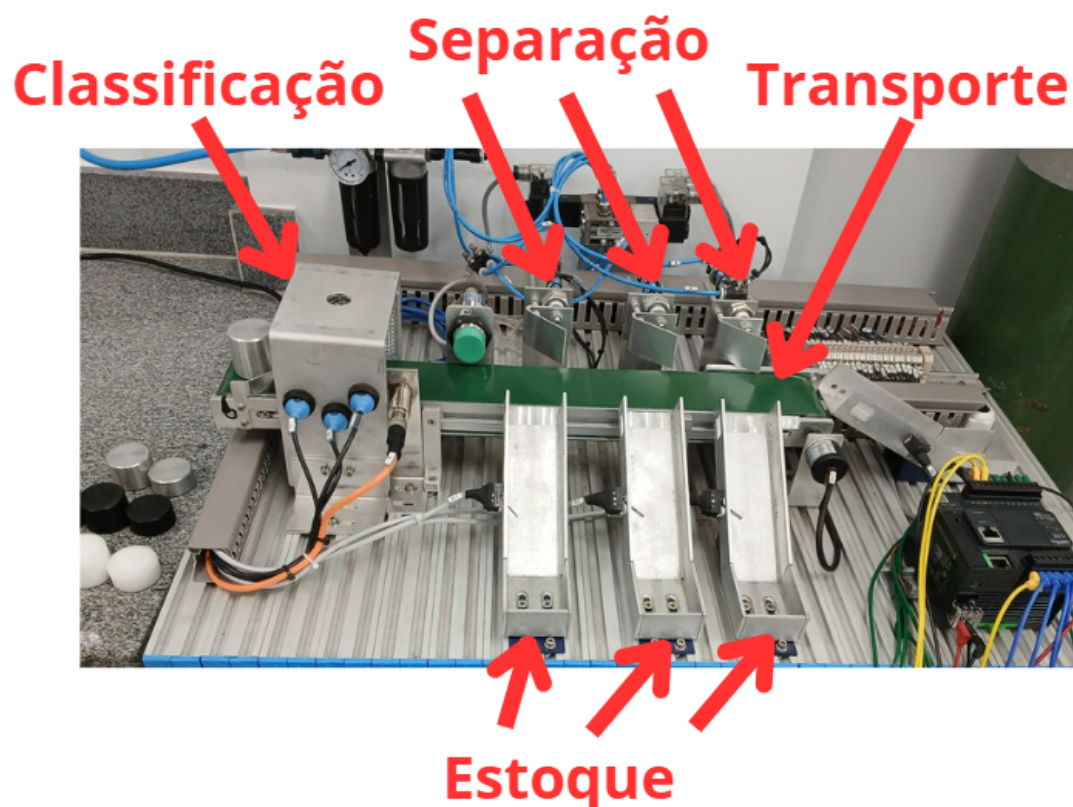


Figura 2. Bancada referência para modelagem

Fluxograma

Considerando a organização física do processo, foi elaborado um fluxograma para o processo de separação, ilustrado na Figura 3, com a implementação da solução de planejamento automatizado. Esse planejamento automatizado é ativado a partir das solicitações do cliente. De maneira intuitiva, o programa deve verificar e separar as peças posicionadas pelo operador no início da esteira, atendendo assim às especificações do cliente. O processo segue etapas sequenciais bem definidas, permitindo um fluxo contínuo e organizado até o final do processo de separação.

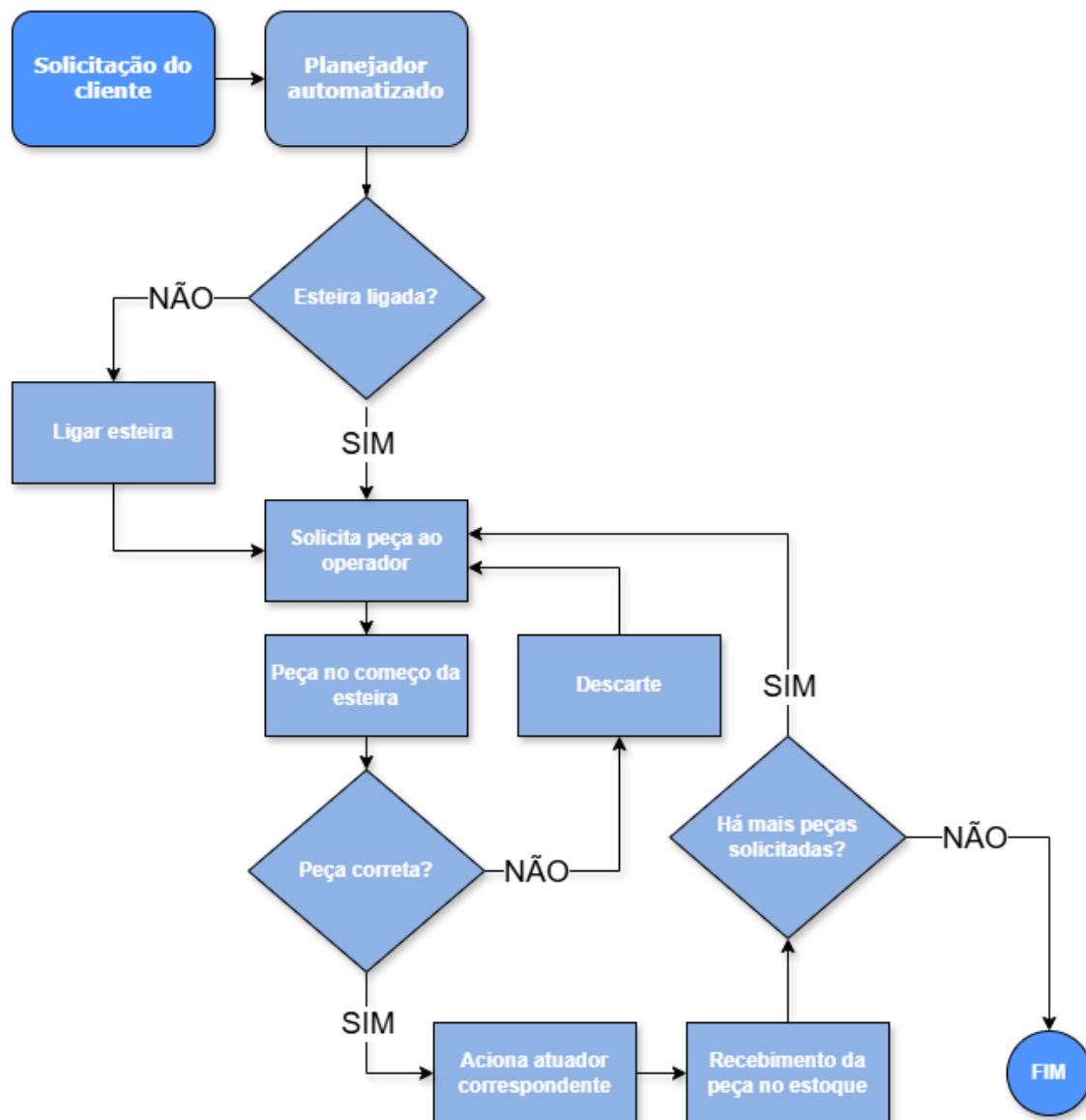


Figura 3 - Fluxograma de processos

Domínio PDDL

O domínio PDDL foi desenvolvido na ferramenta *editor.planning.domains* que é um editor de PDDL completo online que permite a programação de códigos domínios, problema e suporte a APIs, também capaz de gerar o planejamento automatizado através de um *Solver* auxiliado por a IA em nuvem.

O primeiro passo para iniciar a programação do código do domínio é definir os tipos de objetos e classes do código, que no quadro 1, estão representadas dentro dos *:type* (tipos) onde é definido a “esteira”, “tamanho”, “atuador” e “peça” da classe “objeto” e o “início” e “estoque” da classe “localizacao”.

```
(define (domain bancada_ufg)
  (:requirements :strips :typing)
  (:types
    esteira tamanho peca atuador – objeto
    inicio estoque – localizacao
  )
```

Quadro 1. Definição do domínio da bancada

Os objetos e classes podem receber estados, apresentados no quadro 2, através dos “*:predicates*” (predicados) onde é definido os estados dos objetos e classes em uma linha de separação automatizada, onde variáveis definem o estoque de destino da peça, status de recebimento, funcionamento de esteiras e atuadores, posição das peças e suas características, como o tamanho.

```
(:predicates
...
)
```

Quadro 2. Definição do domínio da bancada

Por fim, pode-se definir as ações que os objetos vão realizar baseado nos “*:parameters*” (parâmetros), “*:precondition*” (precondições) e “*:effect*” (efeitos) que aquela ação necessita e pode atribuir. O quadro 3 define as ações da esteira e atuadores, as ações envolvem a interação entre objetos do domínio, exigindo parâmetros como posição inicial, status da esteira, peça, tamanho, atuador e estoque de destino. As precondições incluem compatibilidade de tamanho,

caminho disponível, *status* da esteira e *status* do atuador. O efeito é o movimento da peça para o estoque, garantindo que a esteira continue ativa até a retração do atuador. O retorno envolve apenas o status da esteira e do atuador para permitir sua liberação.

```
(:action liga_esteira
  :parameters (...)
  :precondition (...)
  :effect (...))
(:action desliga_esteira
  ...
)
(:action solicita_peca_e_indica_atuador
  ...
)
(:action retorno_do_atuador
  ...
)
```

Quadro 3. Definição do domínio da bancada

2.4 Problema PDDL

O problema em PDDL é onde o cliente entra com os objetos, condições iniciais e objetivos definindo quantidade de peças, tipos de peças, quantos atuadores a planta possui, quantos estoques a planta possui, quantidade de esteiras, quais atuadores levam a quais estoques, posição inicial das peças e qual o objetivo final.

O quadro 4 mostra o código do problema em PDDL, no caso 1, os objetos definidos foram 3 atuadores, 3 estoques, 1 esteira, 3 tipos de peças, 1 posição inicial e 2 peças. Por fim, o objetivo inserido, no caso 1, é que a “peca1” vá para o “estoq1”, “peca2” vá para o “estoq3”, que esteira esteja desligada e todos os atuadores retraídos no final do plano. A efeito de ilustrar a escalabilidade, foram inseridos mais 2 casos de problemas, um que altera a quantidade de

peças e tamanhos solicitados e outro que altera a quantidade de atuadores, peças e estoques, parâmetros que podem ser alterados diretamente por um cliente ou sensores dentro de qualquer processo.

```
define (problem bancada_ufg)
  (:domain bancada_ufg)
  (:objects
    ...
  )
  (:init
    ...
  )
  (:goal (and
    ...
  ))
)
```

Quadro 4. Definição do domínio da bancada

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a utilização do *Solver LAMA-first*, que foi projetado para buscar soluções com maior velocidade sem levar em consideração custos e refinamentos, para o caso 1 foi obtido o plano ilustrado no figura 4 detalhando o passo a passo que deve ocorrer a fim de cumprir as requisições do cliente com tempo de processamento igual á 0,38 segundos até o planejador obter a solução.

Found Plan (output)

```
(liga_esteira esteira)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca1 pequena atuador1 estoq1)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador1)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca2 media atuador3 estoq3)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador3)
```

```
(desliga_esteira esteira)
```

```
(:action liga_esteira
:parameters (esteira)
:precondition
  (and
    (not
      (on esteira)
    )
  )
:effect
  (and
    (on esteira)
  )
)
```

Figura 4 - Plano obtido através do *Solver* LAMA-*first* para duas peças

O caso 2 é ilustrado na figura 5 e possui tempo de processamento de 0,40 segundos, ou seja, um aumento de 0,02 segundos em relação ao caso 1.

Found Plan (output)

```
(liga_esteira esteira)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca1 pequena atuador1 estoq1)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador1)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca2 media atuador3 estoq3)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador3)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca3 grande atuador2 estoq2)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador2)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca4 media atuador3 estoq3)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador3)
```

```
(desliga_esteira esteira)
```

```
(:action solicita_peca_e_indica_atuador
:parameters (inicio esteira peca1 pequena atuador1 estoq1)
:precondition
  (and
    (tam peca1 pequena)
    (link atuador1 estoq1)
    (on esteira)
    (not
      (on atuador1)
    )
    (not
      (lock_esteira esteira)
    )
    (at peca1 inicio)
  )
:effect
  (and
    (not
      (at peca1 inicio)
    )
    (at peca1 estoq1)
    (on atuador1)
    (recebimento atuador1)
    (lock_esteira esteira)
  )
)
```

Figura 5 - Plano obtido através do *SolverLAMA-first* para quatro peças

Por fim, o caso 3 é ilustrado na figura 6 e possui tempo de processamento de 0,41s, ou seja, um aumento de 0,03 segundos em relação ao caso 1 e 0,01 segundos em relação ao caso 2.

Found Plan (output)

```
(liga_esteira esteira)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca6 gigante atuador4 estoq4)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador4)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca1 pequena atuador1 estoq1)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador1)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca2 media atuador3 estoq3)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador3)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca3 grande atuador2 estoq2)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador2)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca4 media atuador3 estoq3)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador3)
```

```
(solicita_peca_e_indica_atuador inicio esteira peca5 media atuador3 estoq3)
```

```
(retorno_do_atuador esteira atuador3)
```

```
(desliga_esteira esteira)
```

```
(:action solicita_peca_e_indica_atuador
:parameters (inicio esteira peca1 pequena atuador1 estoq1)
:precondition
  (and
    (tam peca1 pequena)
    (link atuador1 estoq1)
    (on esteira)
    (not
      (on atuador1)
    )
    (not
      (lock_esteira esteira)
    )
    (at peca1 inicio)
  )
:effect
  (and
    (not
      (at peca1 inicio)
    )
    (at peca1 estoq1)
    (on atuador1)
    (recebimento atuador1)
    (lock_esteira esteira)
  )
)
```

Figura 6 - Plano obtido através do *SolverLAMA-first* para seis peças e quatro estoques/atuadores

De maneira geral, os planos gerados possuem baixo tempo de processamento com alto potencial de escalabilidade. Posteriormente a esse planejamento automatizado, é possível converter esse plano para ler e escrever em entradas e saídas de um controlador da planta física possibilitando a programação e reprogramação automática através das solicitações do cliente.

CONCLUSÕES

A aplicação de PDDL como linguagem para o planejamento e reprogramação automáticos em ambientes industriais tem potencial de avanço significativo na flexibilização e agilidade dos processos produtivos. A modelagem do domínio, com a descrição precisa dos objetos, classes e ações, permite que sistemas como o CLP possam se adaptar rapidamente a novas demandas e atualizações de produtos, minimizando a necessidade de intervenções manuais e reduzindo os custos de operação.

Com a utilização do Solver LAMA-first, foi possível obter planos de execução rápida, otimizando o tempo de resposta e assegurando o cumprimento das solicitações dos clientes sem a exigência de reprogramação completa do sistema, modificando apenas a situação problema. Os resultados indicam que a abordagem proposta, ao integrar PDDL e CLPs, pode se adaptar de forma eficaz a mudanças no fluxo de produção e atender demandas personalizadas, característica essencial para os princípios da Indústria 4.0.

A implementação desta solução em larga escala poderia, potencialmente, redefinir práticas de automação industrial, viabilizando uma manufatura mais inteligente e adaptável. Futuras pesquisas podem explorar a aplicação de PDDL com outros planejadores automáticos e testar sua integração com diversos tipos de CLPs, ampliando ainda mais o alcance e a versatilidade do planejamento automatizado em ambientes industriais complexos.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao PPGMEC/UFG e à CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AU, TC., KUTER, U., NAU, D. (2009). Planning for Interactions among Autonomous Agents. In: Hindriks, K.V., Pokahr, A., Sardina, S. (eds) Programming Multi-Agent Systems. ProMAS 2008. Lecture Notes in Computer Science(), vol 5442. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03278-3_1
- BURGGRÄF, P.; BERGS, T.; DANNAPFEL, M.; KORFF, A.; ESFAHANI, M. E.; SPLETTSTOESSER, A.; STEINLEIN,

J., 2021. Achieving parametric transparency in model-based factory planning. *Prod. Eng. Res. Devel.* 15, 57–67, <<https://doi.org/10.1007/s11740-020-01010-6>>.

FONSECA, J. P. S.; SOUSA, A. R.; FERREIRA, M. V. M.; TAVARES, J. J. Z. S., 2016. PlanPAS: PLC and automated planning integration, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29:11, 1200-1217, <<https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067909>>.

GHALLAB, M.; NAU, D.; TRAVERSO, P., 2016. *Automated Planning and Acting*. Manuscrito. Cambridge University Press.

HOEBERT, T., LEPUSCHITZ, W., VINCZE, M. ET AL. Knowledge-driven framework for industrial robotic systems. *J Intell Manuf* 34, 771–788 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01826-8>

MARRELLA, A., 2019. Automated Planning for Business Process Management. *J Data Semant* 8, 79–98, <<https://doi.org/10.1007/s13740-018-0096-0>>.

VYSKOCIL, J.; DOUDA, P.; NOVÁK, P.; WALLY, B., 2023. A Digital Twin-Based Distributed Manufacturing Execution System for Industry 4.0 with AI-Powered On-The-Fly Replanning Capabilities. *Sustainability* 2023, 15, 6251 <<https://doi.org/10.3390/su15076251>>.

PLANNING WIKI. Planning Wiki. Disponível em: <<https://planning.wiki/>>. Acesso em: 07 nov. 2024.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616759>

ESTUDO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE REGRESSÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DA PEEP PARA UM PROTÓTIPO DE VENTILADOR MECÂNICO PULMONAR

Hiago S. Motta¹, João P. S. Fonseca¹, Marlipe G. Fagundes Neto¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás
Alameda Ingá, quadra B, bloco 5 - Chácara Califórnia, 74045-155, Goiânia - GO, Brasil.
hiagosmotta@gmail.com, jpsfonseca@ufg.br, marlipe@ufg.br

Resumo. A pressão expiratória positiva final (PEEP) desempenha um papel importante na manutenção e preservação do pulmão durante o processo respiratório. Devido ao aumento de casos de pacientes com insuficiência respiratória, a Universidade Federal de Goiás (UFG) está desenvolvendo o ventilador pulmonar mecânico protótipo Pneuma. A PEEP é um fator essencial para a eficácia desses dispositivos, influenciando a ventilação adequada em pacientes com insuficiência respiratória. O estudo utiliza métodos estatísticos de planejamento experimental, com auxílio da ferramenta de software Minitab®, para identificar os fatores que mais influenciam o erro da PEEP e desenvolver uma equação de regressão para minimizá-lo. Experimentos foram realizados alterando os níveis dos fatores "Volume Controlado", "Fluxo Respiratório", "PEEP Desejada", "Frequência Respiratória" e "Tipo de Válvula", e posteriormente analisados utilizando técnicas de análise de variância (ANOVA) e regressão com o Minitab®. Os resultados mostram que o planejamento experimental é eficiente e eficaz na otimização do tempo experimental e melhora a precisão do protótipo Pneuma através da implementação de um fator de correção na lógica de programação, podendo contribuir para a segurança e eficácia dos tratamentos respiratórios.

Palavras-chave: Planejamento experimental. Equipamento biomédico. Regressão. Fator de correção. Ventilador pulmonar.

INTRODUÇÃO

O uso de ventiladores mecânicos pulmonares é fundamental na assistência a pacientes com insuficiência respiratória, permitindo a manutenção da ventilação adequada em situações críticas. A precisão na configuração e no controle da Pressão Expiratória Positiva Final (PEEP) é essencial para garantir a eficácia terapêutica desses dispositivos, prevenindo o colapso alveolar e melhorando a oxigenação do paciente (BRIEL ET AL., 2010; ESTEBAN ET AL., 2013).

A UFG, tem se empenhado no desenvolvimento de ventiladores mecânicos pulmonares que atendam aos padrões de qualidade e segurança exigidos pelas normas brasileiras (NBRs). Um desafio recorrente na fabricação desses dispositivos é a minimização do erro da PEEP, um parâmetro crítico que pode ser influenciado por diversas variáveis, incluindo a conformidade do sistema, atuadores e a precisão dos sensores de pressão (GATTINONI ET AL., 2001; AMATO ET AL., 1998).

Com o objetivo de identificar os fatores causadores do erro na PEEP, o planejamento experimental pode ser utilizado como ferramenta poderosa, permitindo a identificação e a quantificação dos fatores que mais influenciam o erro da PEEP. Segundo MONTGOMERY (2019) e BOX ET AL. (2005) o planejamento experimental demonstra a eficácia do uso de métodos estatísticos para otimizar parâmetros em dispositivos médicos, contribuindo para a melhoria contínua dos produtos e processos.

O Minitab® é reconhecido por suas capacidades de análise estatística e de planejamento de experimentos, frequentemente utilizado em estudos de engenharia e de qualidade (MASON ET AL., 2003; RYAN, 2007). Este artigo descreve a aplicação do planejamento experimental, com o auxílio da ferramenta de software Minitab®, na análise de experimentos conduzidos para medir o erro da PEEP, verificar os fatores significativos e a desenvolver uma equação de regressão que auxilie na sua minimização.

Ao integrar o planejamento experimental a otimização dos ventiladores mecânicos pulmonares, o estudo não só proporciona aprimorar a precisão dos ventiladores mecânicos, mas também contribui para o corpo de conhecimento na área de ventilação mecânica. O desenvolvimento desses conhecimentos tem o potencial de melhorar significativamente o desenvolvimento de segurança dos tratamentos respiratórios, beneficiando pacientes, profissionais de saúde e fabricantes de equipamentos hospitalares.

METODOLOGIA

Noções básicas do sistema respiratório

A ventilação mecânica é basicamente operada por 3 princípios: ventilação por pressão positiva intermitente (VPPI), ventilação por pressão negativa intermitente e ventilação de alta frequência, sendo a VPPI mais utilizada (LEI, 2017). Segundo LEI (2017), há cinco variáveis essenciais que determinam o tipo de respiração mecânica:

1. Estímulo: representa o começo do processo de inspiração;
2. Ciclo: representa o final da inspiração;
3. Controle: define e controla as propriedades do gás inspirado;
4. Limitador: define os tamanhos limites das propriedades da respiração mecânica;
5. Linha de base: Define a linha de pressão que a respiração mecânica ocorre.

Ainda segundo LEI (2017), essas variáveis essenciais há vários mecanismos associados, apresentados na Tabela 1, e cada princípio de ventilação são derivadas diretamente de diferentes combinações dos mecanismos empregados.

Tabela 1. Variáveis essenciais e seus mecanismos comum, traduzido de LEI (2017)

Variável	Estímulo	Ciclo	Controle
Mecanismos comuns	Tempo de estímulo	Tempo de ciclo	Controle de volume
	Pressão de estímulo	Fluxo de ciclo	Controle de pressão
	Fluxo de estímulo		Controle Adaptativo
	Manual de estímulo		Controle Híbrido

A VPPI é amplamente utilizada em ambientes clínicos, principalmente em unidades de terapia intensiva (UTIs) e consiste na administração do oxigênio ao pulmão do paciente por meio de uma pressão positiva por tempos intermitentes. Por meio do gráfico na Figura 1 é

possível observar os ciclos de respiração ocorrendo, sendo o intervalo de tempo representado no eixo das abscissas e a pressão pulmonar representada no eixo das ordenadas. Em termos técnicos, o processo de ventilação inicia com a abertura da válvula de inspiração (AVI) até atingir o volume desejado realizado o fechamento da válvula de inspiração (FVI) e abrindo a válvula de expiração (AVE) até atingir a PEEP desejada onde é feito o fechamento da válvula expiratória (FVE) que se mantém fechada até o final da pausa expiratória. A duração do ciclo, pausa expiratória e o tempo de aberturas de válvulas são todos definidos pelos setpoints de entrada (Fluxo, Volume, PEEP, Frequência respiratória e Pausa respiratória - quando houver). Contudo, devido ao controle não proporcional de fechamento e abertura de válvulas (ou seja, controle somente on/off), o valor da PEEP medida apresenta erro em relação a PEEP de setpoint no ventilador protótipo Pneuma. A PEEP é aplicada para evitar o colapso dos alvéolos ao final da expiração, melhorando a oxigenação e a troca gasosa.

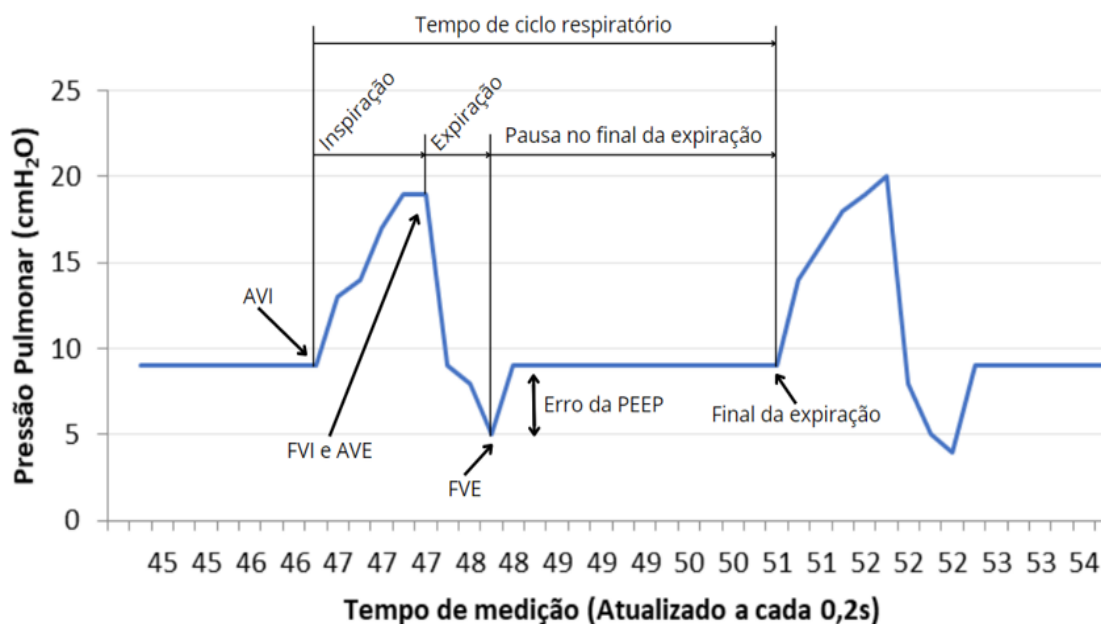


Figura 1. Gráfico de ciclo de VPPI

Análise de variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica estatística essencial para comparar as médias de três ou mais grupos e determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre eles. Ao testar a hipótese nula de que todas as médias dos grupos são iguais, a ANOVA utiliza a estatística F, que é a razão da variabilidade entre os grupos para a variabilidade dentro dos grupos. Um valor F elevado sugere que pelo menos um grupo difere significativamente dos outros, com o p-valor indicando a probabilidade de obter esses resultados sob a hipótese nula. Valores de p menores que 0,05 geralmente levam à rejeição da hipótese nula, indicando diferenças significativas entre as médias dos grupos (MONTGOMERY, 2019).

Existem diferentes tipos de ANOVA, incluindo a ANOVA de uma via, que considera um único fator ou variável independente, e a ANOVA de duas vias, que analisa dois fatores e a interação entre eles. Além disso, a ANOVA de medidas repetidas é usada quando os mesmos sujeitos são medidos sob diferentes condições. Essas variantes permitem uma análise detalhada dos dados experimentais e são amplamente aplicadas em diversas áreas de pesquisa, desde ciências biológicas até ciências sociais (FIELD, 2018).

Para que a ANOVA produza resultados válidos, certas suposições devem ser atendidas, como a independência das observações, homogeneidade das variâncias entre os grupos e normalidade dos dados. Quando essas suposições são violadas, métodos alternativos ou transformações de dados podem ser necessários. Após a identificação de uma diferença significativa, testes post-hoc, como o teste de Tukey, são frequentemente usados para determinar quais grupos específicos diferem entre si. A aplicação correta da ANOVA permite uma compreensão aprofundada das influências dos fatores estudados e das interações entre eles (KEPPEL & WICKENS, 2004).

A realização de experimentos controlados, nos quais variáveis como "Volume Controlado", "Fluxo Respiratório", "PEEP Desejada", "Frequência Respiratória" e "Tipo de Válvula" possuem diferentes níveis para avaliar seu impacto no erro da PEEP, assim, os dados

coletados podem então ser analisados utilizando técnicas de análise de variância (ANOVA) e regressão para identificar os fatores mais significativos e desenvolver um modelo preditivo robusto (HICKS & TURNER, 1999; MONTGOMERY, 2019).

RESULTADOS

Planejamento experimental

O principal objetivo do trabalho foi descobrir quais as variáveis tinham maior influência no erro da PEEP. Diferentes fatores foram levantados como possíveis responsáveis pelo erro obtido na PEEP. Para reduzir a quantidade de experimentos necessários para o estudo, utilizando o Minitab® - software de estatística utilizado para análise de dados, controle de qualidade e melhoria de processos, inicialmente foi conduzido um planejamento experimental fracionário 2k com resolução V composto por 5 fatores (“Volume controlado”, “Fluxo controlado”, “PEEP desejada”, “Frequência controlada” e “Tipo de válvula”) e 2 níveis, apresentados na Tabela 2, totalizando 16 combinações de experimentos. Caso o estudo fosse realizado, sem estudo prévio, o planejamento fatorial completo multinível, com 3 níveis (necessário para melhor aproximação da regressão) e utilizando 5 fatores, seria necessário conduzir o experimento com 243 combinações.

Tabela 2. Parâmetros do planejamento experimental fracionário 2k resolução V

Parâmetro	Níveis	
Volume controlado [mL]	300	500
Fluxo respiratório [L/min]	18	43
PEEP [cmH ₂ O]	5	10
Frequência respiratória [cpm]	10	14
Modelo de válvula	1	2

Contudo, devido à falta de graus de liberdade do erro, ainda não é possível fazer uma análise do valor P, por isso, apresentando que todos os fatores são não significativos conforme a análise do gráfico normal dos efeitos retirados do Minitab® ilustrado na Figura 3.

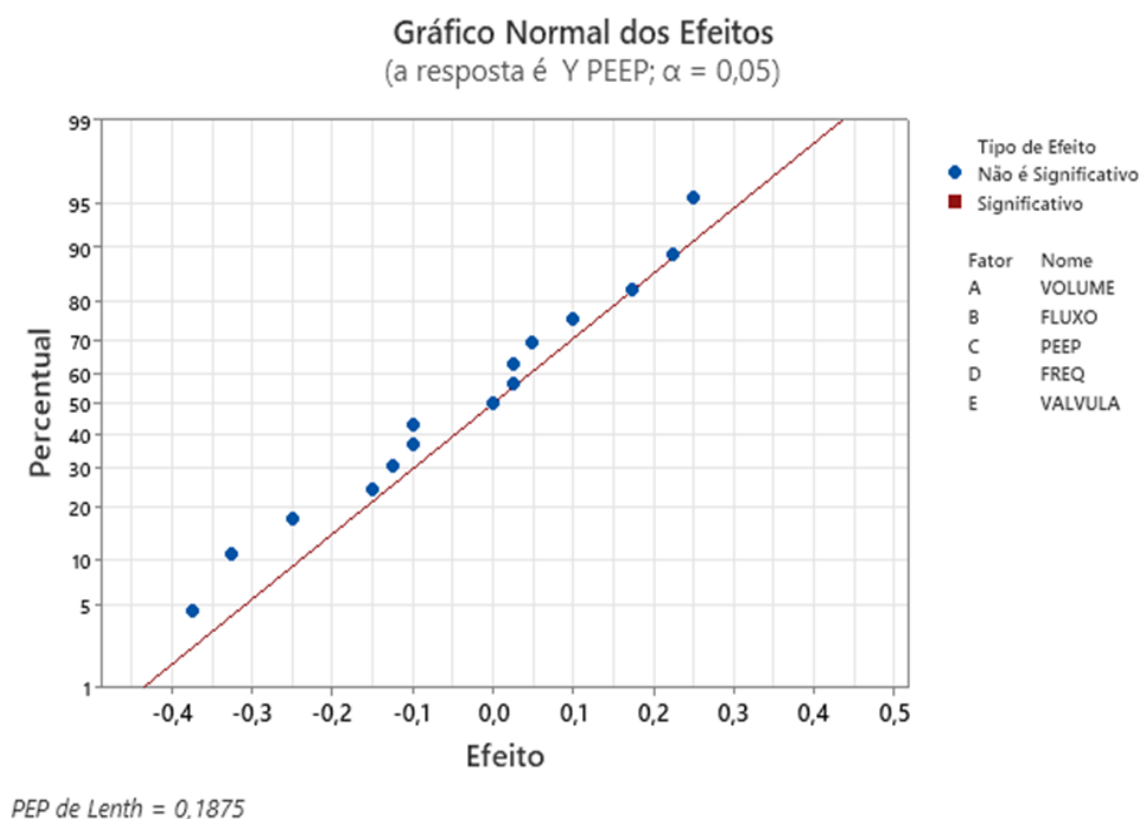


Figura 3. Gráfico normal dos efeitos planejamento experimental fracionário 2k resolução V com 5 fatores

Logo, foi realizada a ANOVA retirando os termos com menores contribuições lineares (“Frequência ajusta” e de “Tipo de válvula”) e seus fatores de interações respectivos, apresentada na Tabela 3, assim obtendo 9 graus de liberdade para o erro possibilitando verificar o valor P que apontou a “PEEP desejada” e a interação de “Volume controlado” “PEEP desejada” como principal responsável pelo erro da PEEP.

Dessa maneira, com o intuito de obter a equação de regressão que melhor representa o erro da PEEP, foi conduzido o planejamento fatorial completo multinível com 3 níveis totalizando 27 combinações experimentais. Os níveis escolhidos estão apresentados na Tabela 4.

De maneira análoga ao planejamento fatorial fracionário, retira-se os termos de menor contribuição para conseguir graus de liberdade para o erro, assim, a Tabela 5 apresenta a ANOVA com os termos de maior contribuição. Por meio da Tabela 7, o valor P indica grande

influência da “PEEP desejada” e o “Fluxo controlado” sobre o erro da PEEP com um R^2 ajustado de 95,23%, sendo um indicativo sobre a condução do experimento.

Tabela 3. ANOVA planejamento experimental fracionário 2k resolução V com 3 fatores

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	6	1,5675	74,73%	1,5675	0,26125	4,44	0,023
Linear	3	0,805	38,38%	0,805	0,26833	4,56	0,033
VOLUME	1	0,2025	9,65%	0,2025	0,2025	3,44	0,097
FLUXO	1	0,04	1,91%	0,04	0,04	0,68	0,431
PEEP	1	0,5625	26,82%	0,5625	0,5625	9,55	0,013
Interações de 2 fatores	3	0,7625	36,35%	0,7625	0,25417	4,32	0,038
VOLUME*FLUXO	1	0,09	4,29%	0,09	0,09	1,53	0,248
VOLUME*PEEP	1	0,4225	20,14%	0,4225	0,4225	7,17	0,025
FLUXO*PEEP	1	0,25	11,92%	0,25	0,25	4,25	0,069
Erro	9	0,53	0,2527	0,53	0,05889		
Total	15	2,0975	100,00%				

Tabela 4. Parâmetros do planejamento experimental fatorial completo multinível

Parâmetro	Níveis		
Volume controlado [mL]	300	400	500
Fluxo respiratório [L/min]	18	30	43
PEEP [cmH2O]	5	10	15
Frequência respiratória [cpm]		10	
Modelo de válvula		1	

Tabela 5. ANOVA planejamento experimental completo multinível com termos de maior contribuição

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	14	37,398	97,80%	37,398	2,6713	38,06	0
Linear	6	36,602	95,72%	36,602	6,1004	86,92	0
VOLUME	2	0,4467	1,17%	0,4467	0,2233	3,18	0,078
FLUXO	2	0,8289	2,17%	0,8289	0,4144	5,91	0,016
PEEP	2	35,327	92,38%	35,327	17,6633	251,7	0
Interações de 2 fatores	8	0,7956	2,08%	0,7956	0,0994	1,42	0,283
VOLUME*FLUXO	4	0,2711	0,71%	0,2711	0,0678	0,97	0,461
FLUXO*PEEP	4	0,5244	1,37%	0,5244	0,1311	1,87	0,181
Erro	12	0,8422	0,022	0,8422	0,0702		
Total	26	38,24	100,00%				

Regressão

Diante da validação do experimento conduzido, foi feito uma análise de regressão utilizando do R^2 ajustado e os gráficos de resíduos como referência, obtendo os melhores resultados quando considerado também os termos quadráticos conforme a ANOVA ilustrada na Tabela 6.

Tabela 6. ANOVA da regressão com termos de maior contribuição e seus quadráticos

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	8	39,791	99,14%	39,791	4,97392	259,6	0
VOLUME	1	0,7606	1,89%	0,0164	0,01636	0,85	0,368
FLUXO	1	0,8063	2,01%	0,0139	0,01389	0,72	0,406
PEEP	1	37,267	92,85%	3,0567	3,05675	159,5	0
VOLUME*VOLUME	1	0,0046	0,01%	0,0046	0,00463	0,24	0,629
FLUXO*FLUXO	1	0,0078	0,02%	0,0078	0,00777	0,41	0,532
PEEP*PEEP	1	0,6446	1,61%	0,6446	0,64463	33,64	0
VOLUME*FLUXO	1	0	0,00%	0	0	0	0,996
FLUXO*PEEP	1	0,3003	0,75%	0,3003	0,30025	15,67	0,001
Erro	18	0,3449	0,86%	0,3449	0,01916		
Total	26	40,136	100,00%				

O R^2 ajustado foi de 98,76% e o gráfico de resíduos, apresentado na Figura 4, mostrou-se melhor que o gráfico apresentado na Figura 3 com melhor aproximação à normal e melhor dispersão dos resíduos, indicando uma melhor aproximação do experimento. Um R^2 muito alto pode ser um sinal de *overfitting*, onde o modelo está tão bem ajustado aos dados de coletados que pode perder a capacidade de generalizar para novos dados não performando bem em dados fora da amostra.

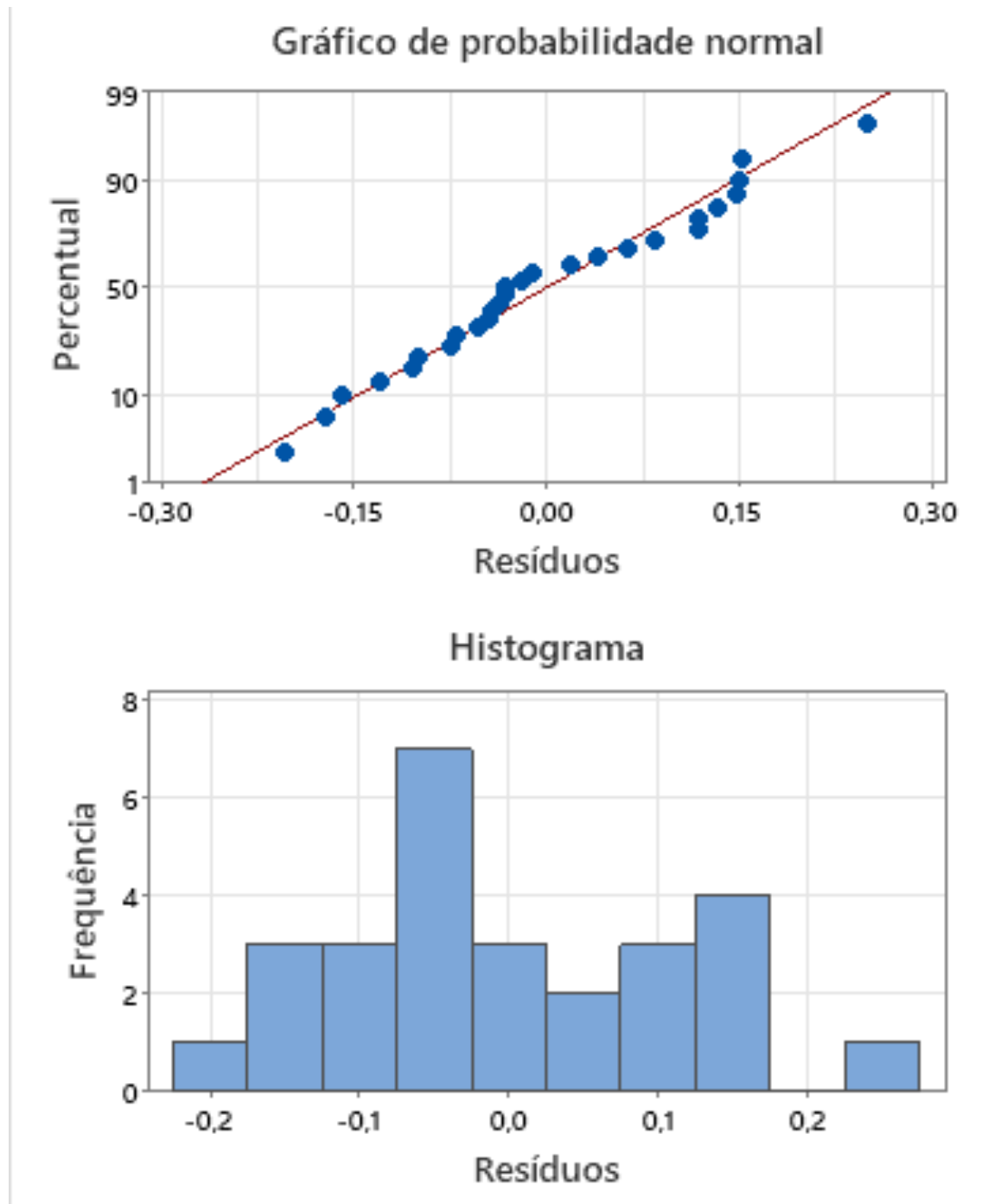


Figura 4 (a). Gráfico normal dos efeitos regressão de planejamento experimental multinível completo

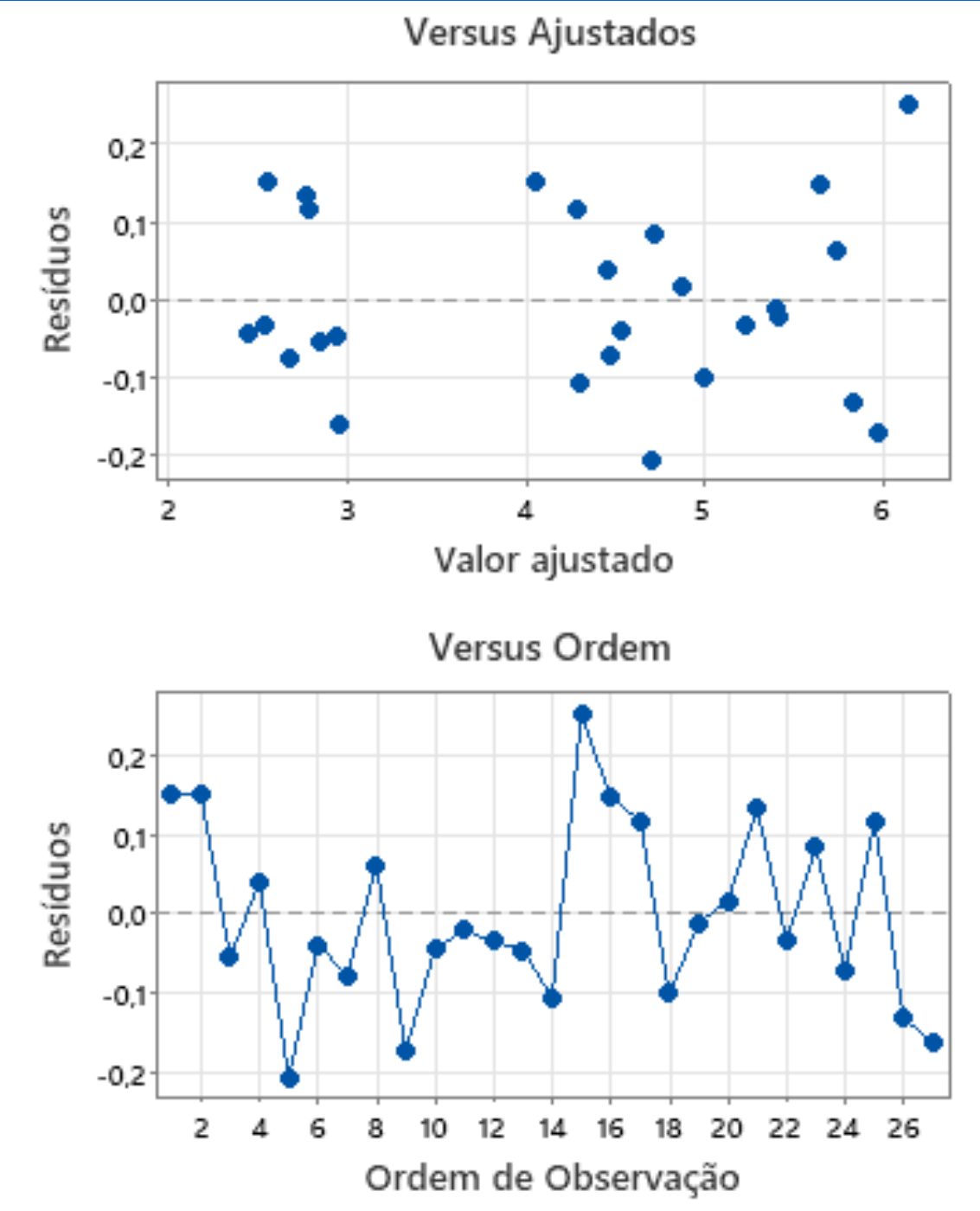


Figura 4 (b). Gráfico normal dos efeitos regressão de planejamento experimental multinível completo

Por fim, obtém-se a equação (1) de regressão do fator de correção do momento de FVE em função dos fatores, combinações e quadráticos.

$$K = -1,40 + 0,00428 VOLUME + 0,0226 FLUXO + 0,6267 PEEP - 0,000003 VOLUME * VOLUME - 0,000231 FLUXO * FLUXO \quad (1)$$

$$K = -1,40 + 0,00428 VOLUME + 0,0226 FLUXO + 0,6267 PEEP \quad (2)$$

Discussão dos Resultados

Sem a aplicação do fator de correção, o VPPI protótipo Pneuma apresenta o erro médio da PEEP medida de 78% em relação a PEEP desejada, conforme apresentado na Tabela 7, e, em alguns casos, chegando a apresentar um erro relativo de até 90%. Com o fator de correção, apresentado na equação (1), e utilizando dentro da lógica de programação para retardar o tempo de FVE em função dos parâmetros de settings, foi possível aproximar o valor da PEEP medida a PEEP desejada chegando a obter erro médio de 9% e máximo de 28%.

Tabela 7. Erro antes e após a implementação do fator de correção

	ERRO	Médio	Mínimo	Máximo
SEM FATOR DE CORREÇÃO	PEEP RELATIVA	78%	60%	90%
	PEEP ABSOLUTA [cmH2O]	6	3	9
COM FATOR DE CORREÇÃO	PEEP RELATIVA	9%	0%	28%
	PEEP ABSOLUTA [cmH2O]	0,69	0,00	1,40

Tabela 8. Cálculo do fator de correção em relação ao fator de correção empírico

ERRO	Médio	Mínimo	Máximo
FATOR DE CORREÇÃO CALCULADO DIRETAMENTE	12%	2%	30%
FATOR DE CORREÇÃO CALCULADO POR APROXIMAÇÕES DO CLP	11%	0%	31%
VARIAÇÃO EM FUNÇÃO DO MÉTODO	2%	1%	3%

Por se tratar da análise de volume de controle com os fatores principais em experimento puramente empírico, a aproximação pela equação de regressão não possui a mesma

assertividade em todo o domínio. Conforme a Tabela 8, pode-se observar o erro o fator de correção calculado diretamente na equação e o calculado por aproximações do CLP em relação ao fator de correção empírico necessário para correção da PEEP. Vale ressaltar que este erro de cálculo do fator de correção é diretamente proporcional ao erro da PEEP com a utilização do fator.

CONCLUSÕES

O uso da ferramenta de planejamento experimental mostrou-se bastante eficiente, reduzindo o número de fatores significativos de 5 para 3, a partir de um planejamento fatorial fracionário com apenas 16 experimentos, possibilitou-se realizar um planejamento multinível que seria realizado com 243 experimentos por 27 experimentos, assim, reduzindo o tempo de trabalho no laboratório em 82,3%. Além disso, eficaz, pois ao aplicar-se a equação de regressão para calcular o fator de correção do tempo de FVE, na lógica de programação do protótipo Pneuma, reduziu-se o erro médio da PEEP de 78% para 9%, não ultrapassando 1,40 cmH₂O de diferença com a PEEP desejada.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao PPGMEC/UFGe à CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMATO, M. B., BARBAS, C. S., MEDEIROS, D. M., MAGALDI, R. B., SCHETTINO, G. DE P., LORENZI-FILHO, G., ... & CARAMEZ, M. P., 1998. **Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome.** The New England Journal of Medicine, 338(6), 347-354.
- BRIEL, M., MEADE, M., MERCAT, A., BROWER, R. G., TALMOR, D., WALTER, S. D., ... & GUYATT, G., 2010. Higher vs lower positive end-expiratory pressure in patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome: systematic review and meta-analysis. JAMA, 303(9), 865-873.
- BOX, G. E., HUNTER, J. S., & HUNTER, W. G., 2005. **Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery.** John Wiley & Sons.

- ESTEBAN, A., FRUTOS-VIVAR, F., MURIEL, A., FERGUSON, N. D., PEÑUELAS, O., LORENTE, J. A., ... & VILLAR, J., 2013. **Evolution of mortality over time in patients receiving mechanical ventilation.** American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 188(2), 220-230.
- FIELD, A. 2018. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics.** 5th ed. London: Sage Publications.
- KEPPEL, G.; WICKENS, T. D. 2004. **Design and Analysis: A Researcher's Handbook.** 4th ed. Upper Saddle River: Pearson.
- FONSECA, J. P. da S.; NETO, M. G. F.; FRANCO, A. L. C.; KITATANI JÚNIOR, S 2021. **Defining a Meta-Model for a Commercial Pulmonary Mechanical Ventilator.** Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil.
- GATTINONI, L., CARLESSO, E., & CRESSONI, M., 2011. **Selecting the “right” positive end-expiratory pressure level.** Current Opinion in Critical Care, 17(1), 43-49.
- HICKS, C. R., & TURNER, K. V., 1999. **Fundamental concepts in the design of experiments.** Oxford University Press.
- LEI, Y., 2017. **Essential variables and breath types. in medical ventilator system basics: a clinical guide.** Oxford, UK: Oxford University Press. Retrieved 18 Jun. 2021, Acesso em: <<https://oxfordmedicine.com/view/10.1093/med/9780198784975.001.0001/med-9780198784975-chapter-7>>.
- MASON, R. L., GUNST, R. F., & HESS, J. L. (2003). **Statistical design and analysis of experiments: With applications to engineering and science.** John Wiley & Sons.
- MONTGOMERY, D. C. 2019. **Design and Analysis of Experiments.** 10th ed. Hoboken: Wiley.
- RYAN, T. P. (2007). **Modern experimental design.** John Wiley & Sons.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15677084>

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ESCOAMENTOS EM CAVIDADE COM TAMPA DESLIZANTE UTILIZANDO O SOFTWARE OPENFOAM

Hugo K. Noel^{1,2}, Andreia A. Nascimento^{1,2}, Felipe P. Mariano^{1,2}

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG)

Av. Esperança, Campus Samambaia, Al. Ingá, Prédio B5, CEP: 74.690-900 – Goiânia/Goiás, Brasil.

²Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Energéticas Sustentáveis (CEHTES), Universidade Federal de Goiás (UFG)

Parque Tecnológico Samambaia, Rodovia R2, n. 3.061, CEP: 74.690-631, Goiânia/Goiás, Brasil.

hugo_kalev@discente.ufg.br, fpmariano@ufg.br

Resumo. No presente trabalho são abordadas simulações computacionais do problema da cavidade com tampa deslizando, tido como clássico na aprendizagem da Fluidodinâmica Computacional (CFD). Através de ferramentas de CFD e com o uso do software livre, gratuito e aberto, OpenFOAM®, foi realizado um refinamento de malha, com o ajuste do número de Reynolds primeiramente em 10.000, posteriormente com 30.000. Como resultados, observou-se o comportamento do escoamento e a formação de recirculações tanto a primária quanto secundárias, além disso, os resultados quantitativos foram comparados com outras referências mostrando boa concordância.

Palavras-chave: Escoamento em cavidade tampa deslizando. OpenFOAM. Fluidodinâmica Computacional.

INTRODUÇÃO

A Fluidodinâmica Computacional, ou do inglês, Computational Fluid Dynamics (CFD) insere-se no desenvolvimento das pesquisas acadêmicas e industriais como ferramenta fundamental na simulação de modelos de escoamentos de diversas aplicações, concebidos para representar, dentro das condições numéricas pré-estabelecidas, escoamentos por muitas vezes de difícil reprodução em escala real, ou de custo elevado para sua experimentação prática.

No contexto científico dentro da engenharia mecânica, a dinâmica dos fluidos computacional permite ao pesquisador simular condições físicas de escoamentos conhecidos ou a priori desconhecidos, através do cálculo numérico e implementação de códigos computacionais, que ao serem compilados, oferecem bases de dados que podem ser utilizadas

para a representação gráfica dos fenômenos estudados, e oferecem a oportunidade de simular o comportamento de fluidos apenas com o "gasto" computacional.

Nesse sentido, a utilização de escoamentos ditos canônicos, ou seja, que já têm seu comportamento conhecido e mapeado, permite aos pesquisadores estudos e simulações de problemas fundamentais que podem ser usados como base para soluções aplicáveis a problemas mais complexos de dinâmica dos fluidos através da validação de códigos computacionais alimentados com as condições auxiliares (contornos e inicial) dos cenários reais, comparando-se os resultados obtidos com aqueles já consolidados por simulações anteriores ou soluções analíticas.

Dessa forma, pode-se citar o problema de escoamentos em cavidade com tampa deslizante (ou "Lid-Driven Cavity Flow") como um problema clássico do CFD, pois apresenta uma geometria simples, com condições de contorno bem estabelecidas e, ao mesmo tempo, gera um escoamento complexo. Sucintamente, pode-se caracterizar o experimento da cavidade com tampa deslizante como uma cavidade retangular onde as paredes laterais e o fundo da cavidade são estacionários, enquanto a tampa move-se com velocidade constante em relação ao eixo horizontal, paralelo ao fundo da cavidade, vide Fig. 1.

Logo, é um problema utilizado, principalmente, para validar e comparar métodos numéricos, algoritmos e novos softwares, uma vez que, seu estudo permite analisar a formação de estruturas turbilhonares primárias e secundárias além de instabilidades geradas no escoamento e até mesmo transições para regimes turbulentos à medida que se aumenta o número de Reynolds. Através dos resultados de suas simulações, torna-se possível aferir a acurácia e eficiência de distintos métodos numéricos, tais como: volumes finitos, elementos finitos e diferenças finitas, sendo também, uma forma de validação de diferentes tipos de malhas e de algoritmos de discretização temporal e sistemas lineares.

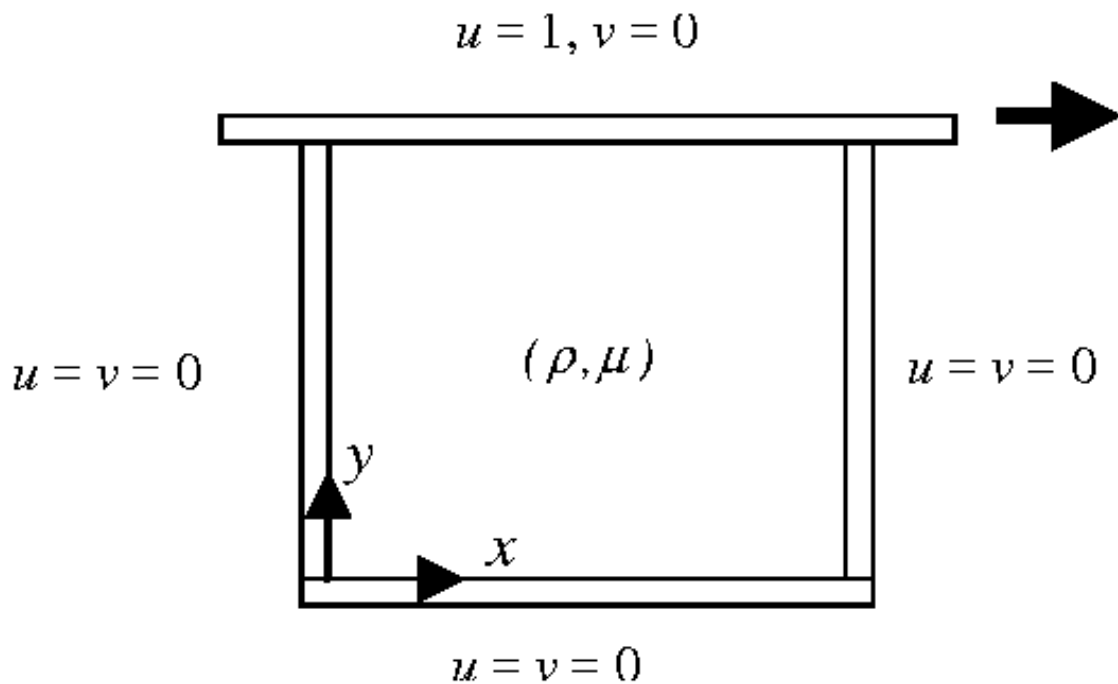


Figura 1. Cavidade com tampa deslizante (autores, 2024)

E, ainda que seja um problema com certa simplificação geométrica, o escoamento em cavidade com tampa deslizante tem considerável aplicabilidade. Seu desenvolvimento pode ser implementado para simular a ventilação em ambientes fechados, mistura em tanques, processos de convecção em cavidades ou salas, e assim, contribuir para o estudo de escoamentos em regiões delimitadas por barreiras físicas, semelhante a cavidade da Fig. 1.

Então, o objetivo do presente trabalho concentrou-se em variar o número de Reynolds dentro de uma faixa preestabelecida para a verificação de sua influência sobre o escoamento na formação de recirculações central e secundárias. Além disso, faz-se um refinamento de malha para analisar a convergência numérica dos resultados e, assim, validar o aprendizado do software OpenFOAM.

DESENVOLVIMENTO

Em linhas gerais, a cavidade com tampa deslizante caracteriza-se por uma cavidade retangular com altura H e largura L . Sua parede superior se move com velocidade $\vec{V} = u\hat{i} + 0\hat{j}$ e as demais paredes permanecem estáticas, onde u e v são as componentes do vetor velocidade $\vec{V}$ e P é a pressão no interior da cavidade (Fig. 1), e no tempo inicial, $t = 0$ s, as condições iniciais são $u = v = 0$ e $P = 0$. Na Tab. 1 estão expostas a condições de contorno.

Tabela 1. Condições de Contorno do problema

Variável	Intervalo	Valor
u	$y = 0$	0,0
	$y = H$	1,0
v	$x = 0$	0,0
	$x = L$	0,0
$\frac{\partial P}{\partial x}$	$x = 0$	0,0
$\frac{\partial P}{\partial x}$	$x = L$	0,0
$\frac{\partial P}{\partial y}$	$y = 0$	0,0
$\frac{\partial P}{\partial y}$	$y = H$	0,0

O escoamento é caracterizado pelo número de Reynolds, o qual é dado por:

$$Re = \frac{UH}{\nu} \quad (1)$$

No desenvolvimento do problema da cavidade com tampa deslizante algumas hipóteses são aplicadas no arranjo das equações governantes. Considerou-se neste trabalho um fluido newtoniano, escoamento bidimensional, incompressível e isotérmico e com viscosidade dinâmica constante. A eqs. (2) e (3) são as Equações de Navier-Stokes que são usadas para modelar a dinâmica dos fluidos, enquanto a eq. (4) modela matematicamente a conservação de massa dentro do domínio do escoamento, já simplificadas pelas hipóteses citadas.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Conforme observa-se nas eqs. (2) a (4), há três equações e três incógnitas, sendo as duas componentes de velocidade e o campo de pressão. Logo, existe um acoplamento entre as variáveis de velocidade e pressão em função da natureza das equações diferenciais parciais (EDP). Segundo Maliska (1995), a forma mais eficaz de se resolver este tipo de acoplamento é proceder com a resolução separada através de métodos iterativos para cada sistema linear de equações. Dessa forma, é necessário definir um gradiente de pressão que inserido nas equações de movimento determine um campo de velocidades capaz de satisfazer a conservação da massa.

Com o intuito de resolver este problema, recorreu-se ao algoritmo de solução “Pressure Implicit with Splitting of Operators” (PISO) que consta no rol de algoritmos previamente disponibilizados no software OpenFOAM com o nome de “PISOFOAM”, indicado para escoamentos incompressíveis e turbulentos e com as demais hipóteses já apresentadas.

Em síntese, esse algoritmo executa uma estimativa do valor da velocidade e calcula duas correções, uma para a velocidade e outra para a pressão, que são utilizadas na resolução da equação de Navier-Stokes e da Continuidade, que por sua vez, determinam os campos de velocidade e pressão em cada avanço temporal.

METODOLOGIA

O primeiro passo foi definir a malha como regular, com tamanho de 25 x 25 volumes e dentro da programação do algoritmo “PISOFOAM” foram introduzidos os dados da velocidade

da tampa $\vec{V} = 1\hat{i} + 0\hat{j}$, os dados da malha, e inicialmente a viscosidade cinemática foi parametrizada com valor de $1.0\text{e-}4 \text{ [m}^2/\text{s]}$, que de acordo com a eq. (1), resulta em um número de Reynolds igual a 10.000.

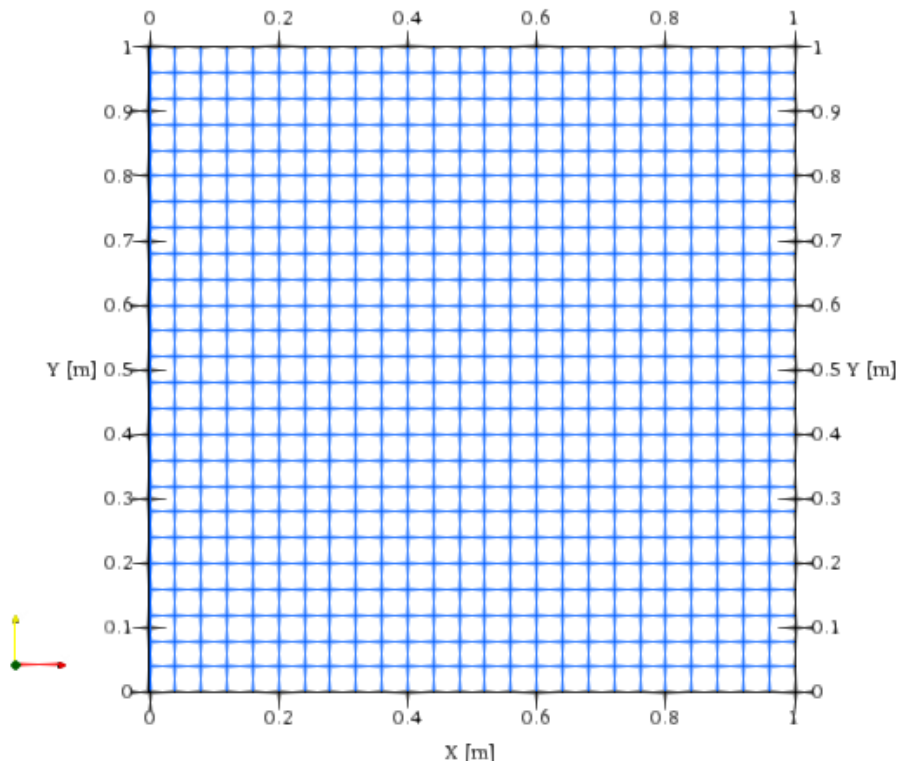
Então, com o número Reynolds ajustado em 10.000, realizou-se o refinamento da malha. Realizando três diferentes simulações com a malha de 25×25 , 50×50 e finalmente 100×100 . Esse refinamento buscou a visualização de recirculações para diferentes tamanhos de malha através do uso de linhas de corrente.

Posteriormente, realizou-se os mesmos refinamentos de malha, porém com um número de Reynolds igual a 30.000, isto é, usou-se um valor de viscosidade cinemática de $3,3\text{e-}5 \text{ [m}^2/\text{s]}$, para a visualização das recirculações.

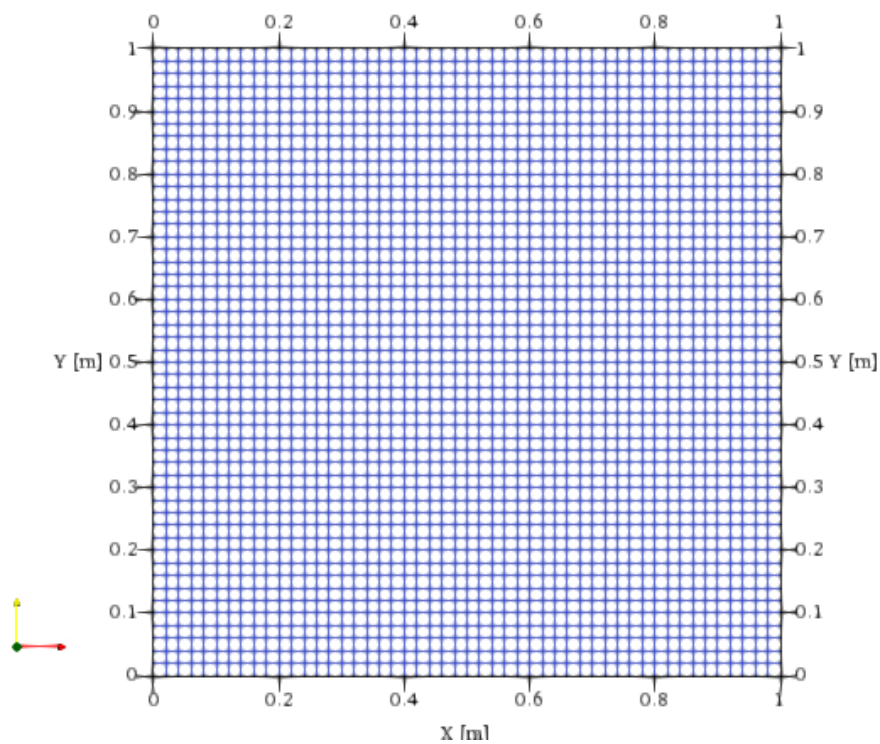
Os resultados das simulações foram compilados no visualizador ParaVIEW, onde foram traçadas as linhas de corrente. Com o auxílio de ferramentas de visualização, as recirculações foram detalhadas para as malhas definidas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

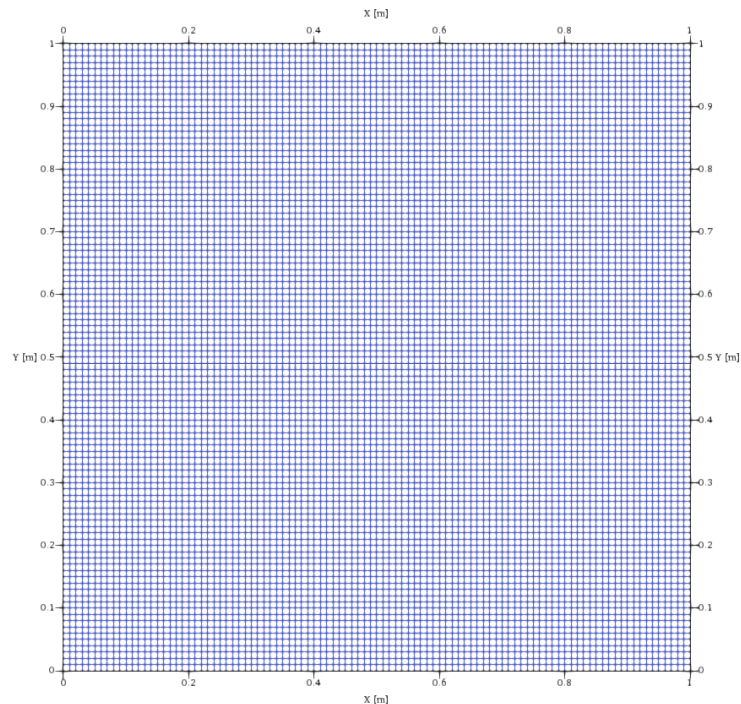
Mostra-se primeiramente as malhas geradas com 25×25 , 50×50 e 100×100 volumes na Fig. 2.



(a)



(b)

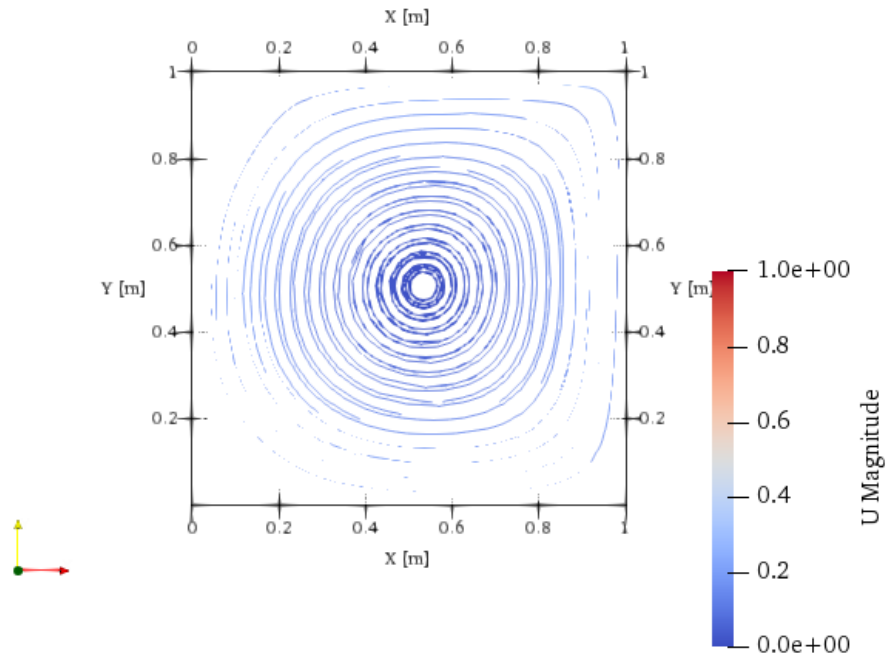


(c)

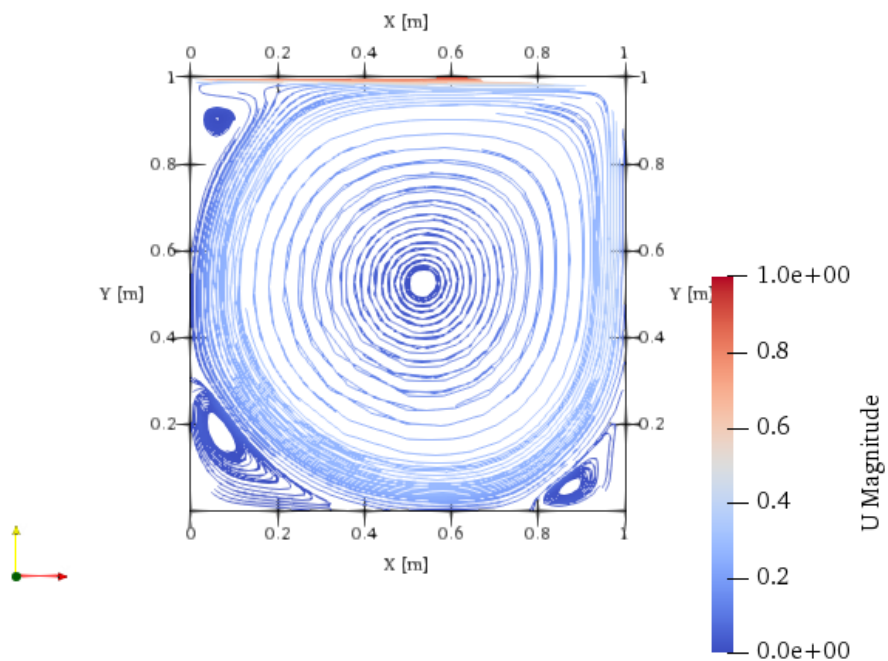
Figura 2: Malhas geradas no OpenFoam para as simulações de escoamentos em cavidade com tampa deslizante: a) 25x25; b) 50x50 e c) 100x100 volumes.

Como referência para validação da aprendizagem do software OpenFOAM, utiliza-se o trabalho de Yannis (2016), o qual compilou os resultados do escoamento em cavidade com tampa deslizante para números de Reynolds de 1000 até 30.000 também utilizando o método dos volumes finitos. Em seu trabalho, ele utiliza uma malha de 1201 x 1201, e com o incremento do número de Reynolds observa-se a criação de uma recirculação central primária, e com o avanço temporal aparecem recirculações nos cantos da cavidade.

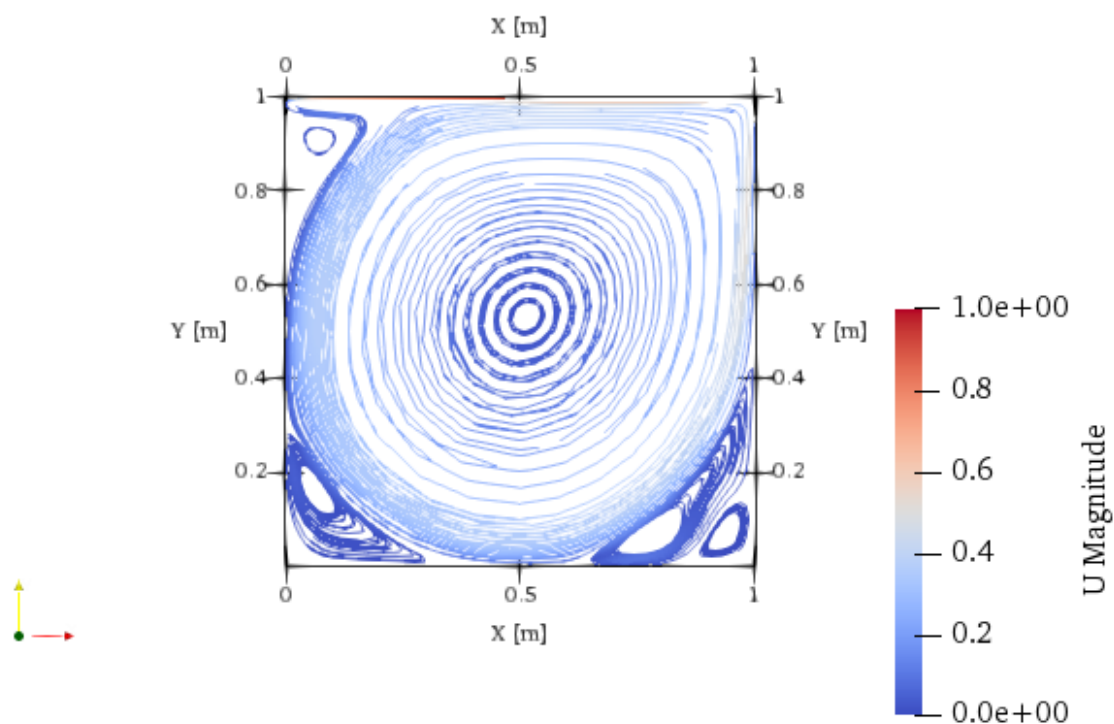
Os resultados das simulações estão expostos nas Figs. 3 e 4, com a indicação dos resultados obtidos no presente trabalho nos itens a), b) e c) e os resultados de Yannis (2016) no item d). São apresentadas as linhas de corrente coloridas pela magnitude de velocidade.



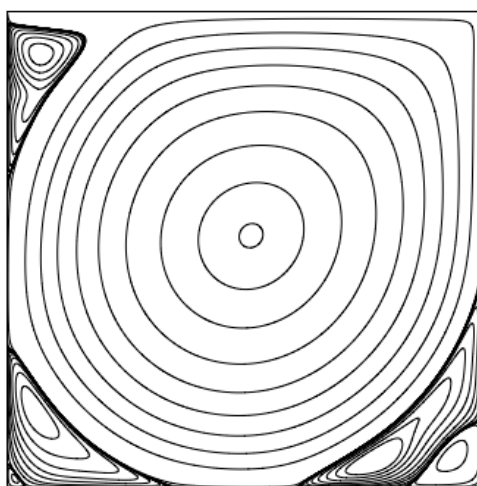
(a)



(b)



(c)



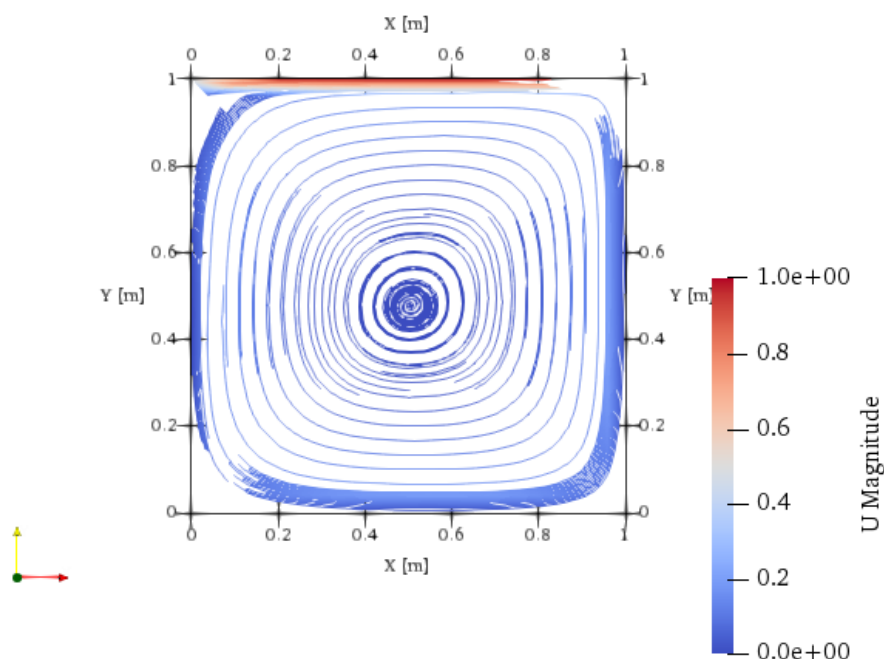
(d)

Figura 3. Linhas de corrente coloridas pela magnitude de velocidade, a $Re = 10.000$. a) malha 25×25 , b) malha 50×50 , c) malha 100×100 , d) Yannis (2016).

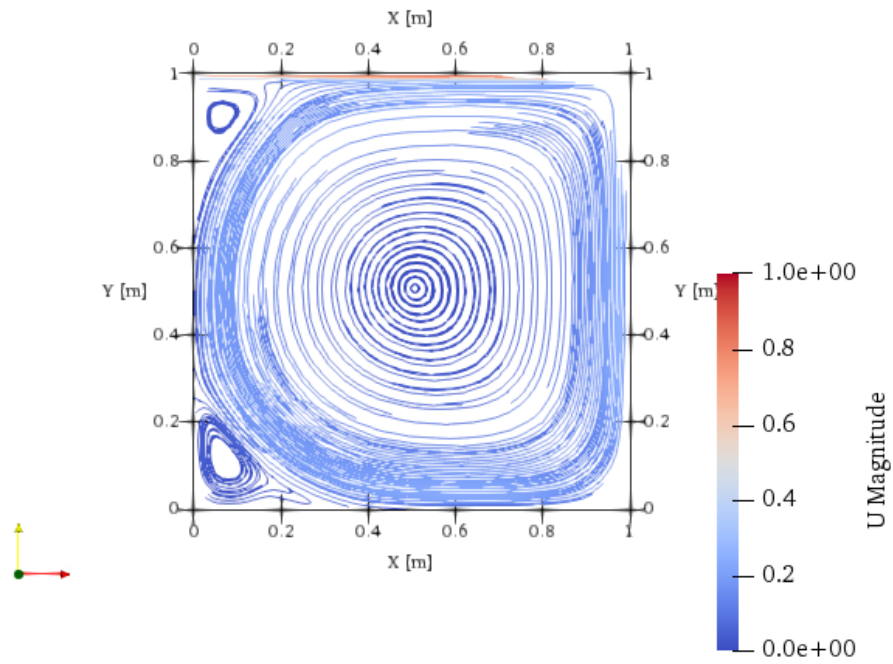
Nos resultados da Fig. 3 observa-se a formação da recirculação central em todas as simulações, entretanto, apenas com o refinamento da malha torna-se possível visualizar as recirculações secundárias, as quais são formadas nos cantos inferiores tanto direito quanto esquerdo e no canto superior esquerdo. Para a simulação com a malha mais fina, é possível ainda identificar duas recirculações em cada um dos cantos inferiores.

A influência do refinamento de malha fica clara ao compreender que somente com a discretização correta é possível simular adequadamente a física envolvida no escoamento. Além disso, é notório as semelhanças com o resultado de Yannis (2016).

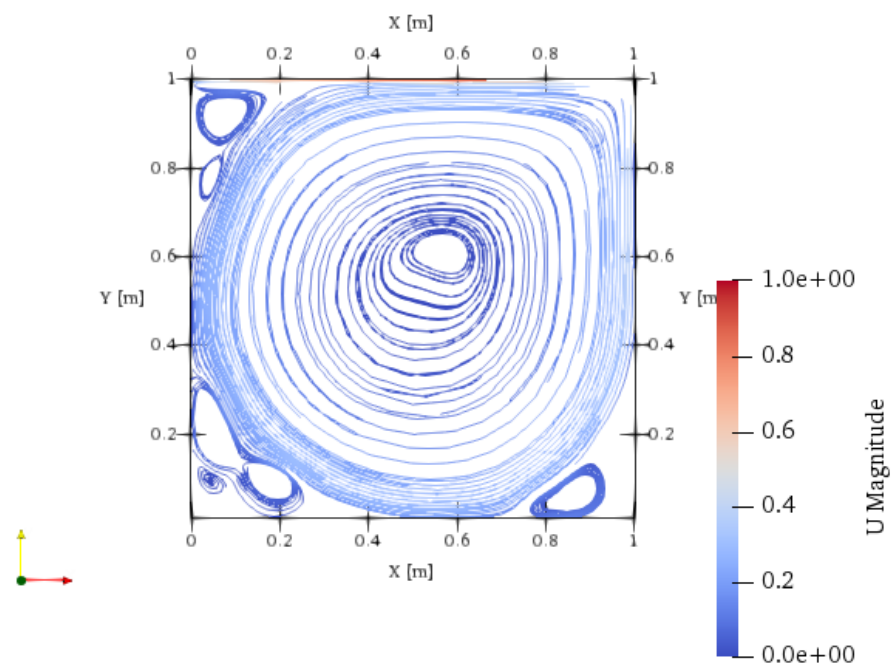
Os resultados das linhas de corrente coloridas pela magnitude de velocidade são apresentados na Fig. 4 para as simulações com número de Reynolds igual a 30.000.



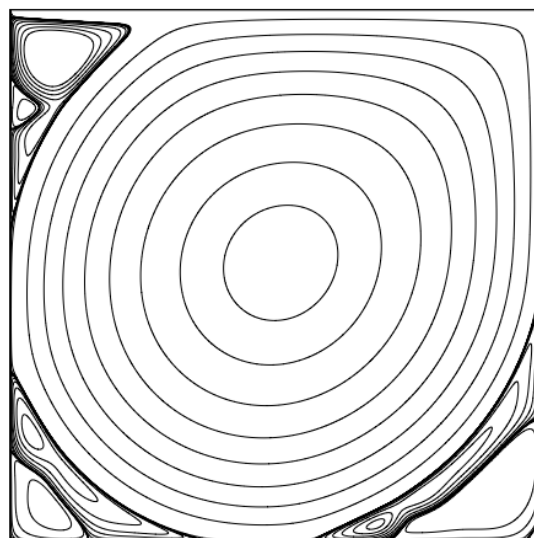
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. Linhas de corrente coloridas pela magnitude de velocidade, a $Re=30.000$. a) malha 25×25 , b) malha 50×50 , c) malha 100×100 , d) Yannis (2016).

Observa-se na Fig. 4 que para a malha mais grosseira de 25×25 , só é possível ver uma única recirculação central. Já para malhas mais refinadas 50×50 e 100×100 há formação de mais recirculações em ambos os cantos inferiores e no canto superior esquerdo. E para a malha mais refinada, obtém-se duas recirculações no canto inferior esquerdo e três recirculações no canto superior esquerdo, deixando semelhantes os resultados do presente trabalho com os resultados de Yannis (2016).

CONCLUSÕES

As visualizações das linhas de correntes do escoamento obtidas nas simulações utilizando o algoritmo “PISOFOAM” estão condizentes com as respostas já consolidadas do trabalho de Yannis (2016). Mesmo que, o trabalho de Yannis (2016) utilize em sua resolução uma malha de 1201×1201 pontos, as soluções obtidas no presente trabalho mostram convergência quando realiza-se o refinamento da malha.

Nas Figs. 2 a), b) e c) e 3 a), b) e c) observa-se que o refinamento da malha permite a visualização de recirculações que ficam “escondidas” quando o processamento é feito com malhas mais grossas.

Na Fig. 2c) é representado o escoamento com $Re = 10.000$ e malha de 100×100 pontos, e em comparação com a Fig. 2d), na qual é mostrado o campo clássico de resposta, demonstra-se que as similaridades nas recirculações tanto central quanto as dos cantos estão presentes. Isso é observado quando se compara a Fig. 3c) $Re=30.000$ e malha 100×100 , com a Fig. 3d).

Portanto, o software OpenFOAM mostrou-se eficaz na solução do escoamento em cavidade com tampa deslizante validando o uso e aprendizagem do algoritmo “PISOFOAM” como ferramenta útil na simulação de escoamentos complexos.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao CEHTES, à Eletrobras e ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL pela infraestrutura e suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FORTUNA, A. O. Técnicas Computacionais para Mecânica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade Federal de São Paulo, 2020.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

OPENFOAM®. 2.1 Lid-driven cavity flow. Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/2-incompressible-flow/2.1-lid-driven-cavity-flow>. Acesso em: 25 out. 2024.

YANNIS, P. 2-D Lid-Driven Cavity Flow Benchmark Solutions. Disponível em: <https://www.acenumerics.com/the-benchmarks.html>. Acesso em: 28 out. 2024.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616763>

COMPARAÇÃO ENERGÉTICA E DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA ENTRE OS COMBUSTÍVEIS METANO E HIDROGÊNIO

Felipe P. Mariano¹, Gino B. Colherinhas¹, Paulo Henrique N. Pimenta², Getúlio S. Santos Junior³, Gabriela M. Fraga³

*¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás
Av. Esperança, Campus Samambaia, Goiânia/Goiás, Brasil
fpmariano@ufg.br, gino@ufg.br*

*²Departamento Acadêmico Área IV, Instituto Federal de Goiás
R. 75, nº 46, Goiânia-GO, Brasil
paulo.pimenta@ifg.edu.br*

*³Secretaria Geral de Governo do Estado de Goiás
R. 82, nº 400, Ed. Palácio Pedro Ludovico Teixeira Goiânia/Goiás, Brasil
getulio.santos@goias.gov.br, gabriela.fraga@goias.gov.br*

Resumo. O presente trabalho desenvolve uma metodologia para quantificar a produção de potência em um motor a gás, modelado via ciclo padrão-Brayton, utilizando a combustão do hidrogênio. Compara-se os resultados com a produção de potência provinda do metano, que é um dos combustíveis gasosos mais utilizados na indústria. Para tanto, apresentam-se os balanços estequiométricos e de energia no processo de combustão de ambos os combustíveis analisados. Como resultados tem-se que o hidrogênio produz 19,55 vezes mais energia que o metano e, ao mesmo tempo, não emite gás carbônico, que é um dos gases responsáveis pelo Efeito Estufa. Entretanto, apesar da alta produção de potência, deve-se considerar que há dificuldades tecnológicas importantes tanto para a produção quanto para o armazenamento de hidrogênio em larga escala.

Palavras-chave: Ciclo Brayton. Combustão. Metano. Hidrogênio.

INTRODUÇÃO

O hidrogênio, na sua forma H_2 , é visto como um combustível com o potencial de desempenhar um papel importante na transição energética, pois os produtos da sua combustão com o ar atmosférico são apenas água (H_2O) e nitrogênio (N_2). Os produtos da combustão de outros combustíveis tradicionais como por exemplo, metano, gasolina, etanol, diesel etc, além de H_2O e N_2 também tem o dióxido de carbono (CO_2), que é um dos gases responsáveis pelo Efeito Estufa. Além desses produtos, deve ser observado que outros gases, até mais poluentes,

também são formados, *e.g.*, o monóxido de carbono (CO) e os óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre devido a combustão incompleta.

Soma-se as características favoráveis do H₂ como combustível, o alto poder calorífico e os diversos processos de produção, comparado aos demais combustíveis tradicionais. Dessa forma, entende-se que o H₂ é um meio de se ter energia disponível e, dependendo da forma como é obtido, esta energia é limpa e sustentável. O H₂ possui alta densidade energética e, quando utilizado em células a combustível, libera apenas água como subproduto, tornando-o uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis.

No entanto, o hidrogênio raramente é encontrado de forma pura na natureza, o que torna necessária à sua produção a partir de fontes de carbono, ou através da água. A eficiência, custo e impacto ambiental das diversas técnicas de geração e armazenamento de H₂ variam significativamente, afetando a viabilidade e a sustentabilidade de sua utilização em grande escala.

Além disso, após a produção, o H₂ pode ser usado diretamente para alguma aplicação, ou transportado e armazenado para ser utilizado posteriormente. É justamente nesse ponto que se encontra o maior desafio na cadeia produtiva, pois armazenar hidrogênio é um desafio técnico e econômico. Logo, como objetivos do presente trabalho, a partir das propriedades físicas, mostra-se as dificuldades de armazenamento e, ao mesmo tempo, a grande disponibilidade energética do gás H₂.

DESENVOLVIMENTO

Técnicas de Produção de H₂

As principais técnicas de produção de hidrogênio podem ser classificadas de acordo com os insumos e a fonte de energia empregada. Na sequência, descreve-se os métodos mais usados industrialmente e outros processos que, embora estejam em desenvolvimento, são promissores para a produção de hidrogênio sustentável (PROPEQ, 2022; EPE, 2021; Basu, 2013).

A Reforma a Vapor do Gás Natural (Steam Methane Reforming - SMR), também conhecida como Hidrogênio Cinza, é a técnica mais empregada para a produção de H₂ em escala industrial, respondendo por cerca de 48% da produção global de hidrogênio (Barbir, 2005; Bridgwater, 2006; IEA, 2021). Esse processo envolve a reação do metano (CH₄) com vapor d'água a temperaturas entre 700 °C e 1000 °C e em pressões elevadas, gerando hidrogênio e monóxido de carbono (CO), vide Eq. 1a. Posteriormente, o CO passa por uma reação de deslocamento (shift reaction) com mais vapor, produzindo CO₂ e hidrogênio adicional, Eq. 1b:



Este método é economicamente viável em comparação com a eletrólise, embora produza emissões consideráveis de CO₂, estimadas em cerca de 9,0 kg de CO₂ por cada 1,0 kg de H₂ gerado (IEA, 2021). Com a adição e tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), é possível reduzir essas emissões, transformando o Hidrogênio Cinza em Hidrogênio Azul, sendo considerada uma rota (processo de produção) de transição de baixo carbono.

Processos de produção semelhantes são a gaseificação, que é um processo químico de decomposição do carvão mineral para obtenção do hidrogênio (Hidrogênio Marrom), que também libera grandes quantidades de gases de Efeito Estufa. Sendo que uma técnica alternativa é a pirolise do metano, ou rota do Hidrogênio Turquesa, processo químico que decompõem o metano em hidrogênio e carbono sólido (Eq. 2). A pirólise do metano, também conhecida como "decomposição térmica", é uma técnica que aquece o metano em altas temperaturas (800°C-1000°C), sem a presença de oxigênio, resultando na decomposição do metano em hidrogênio e carbono sólido:



A pirolise é um processo promissor por não gerar CO₂ como subproduto. O carbono é capturado na forma sólida, o que elimina a necessidade de CCS e reduz o impacto ambiental

do processo. No entanto, a pirólise enfrenta desafios técnicos relacionados à separação e armazenamento do carbono sólido e o custo energético mais alto, em relação a eletrólise, necessários para manter as temperaturas elevadas (Muradov, 2001).

A outra linha de processos de geração de H₂ são o Hidrogênio Amarelo, Rosa e Verde, que utilizam a eletrólise da água, como processo primário para dividir a molécula de água (H₂O) em hidrogênio e oxigênio por meio de uma corrente elétrica. A diferença entre cada umas dessas três alternativas é a geração da eletricidade para manter a corrente elétrica necessária para o processo.

Na rota do Hidrogênio Amarelo, a eletricidade é proveniente da rede elétrica mista, na qual inclui fontes renováveis e não renováveis. O Hidrogênio Rosa utiliza eletricidade provinda de fontes nucleares, que não emitem CO₂. E, por fim, a rota do Hidrogênio Verde que utiliza eletricidade fornecida exclusivamente por fontes de energia renováveis, como eólica e solar.

Quanto ao processo de eletrólise em si (Fujishima e Honda, 1972) existem três tipos principais: eletrólise alcalina, eletrólise de membrana de troca de prótons (PEM) e eletrólise de óxido sólido (SOE). A eletrólise é uma das rotas mais sustentáveis, especialmente quando a eletricidade empregada é proveniente de fontes renováveis, ou seja, o Hidrogênio Verde (Kothari et al., 2008; Zeng e Zhang, 2010), pois a molécula de água é decomposta em H₂ e O₂:



Apesar do potencial ambiental, a eletrólise é um processo caro e relativamente menos eficiente (com eficiência energética entre 60-70%) o que limita sua viabilidade comercial em relação à reforma a vapor. No entanto, com o avanço das fontes renováveis e a queda dos custos de energia solar e eólica, a eletrólise torna-se cada vez mais economicamente competitiva.

À medida que avançam as tecnologias de CCS e eletrólise, e que as energias renováveis se tornam mais acessíveis, o Hidrogênio Verde oferece um caminho promissor para a transição energética, com diversas técnicas de produção sendo desenvolvidas e aprimoradas para atender às necessidades de uma economia de baixo carbono.

Propriedade físicas do H₂

Apesar das várias opções de geração de H₂, há dificuldades práticas importantes no processo de armazenamento e transporte do hidrogênio para aplicações industriais e comerciais. Uma das principais características do H₂ é a sua baixa massa específica e baixa densidade energética (Moran et al., 2013). O hidrogênio, em sua forma gasosa, tem massa específica muito baixa, o que significa que ocupa um grande volume em comparação com outros combustíveis. Isso requer que ele seja comprimido ou liquefeito para armazenar uma quantidade mínima de massa em volumes que sejam manuseáveis e tenha uma quantidade mínima energia útil, o que torna o processo de armazenamento economicamente caro.

Do ponto de vista da compressão, normalmente, atinge-se pressões da ordem de 200 MPa a 400 MPa, ou seja, os compressores devem ser robustos e muitas vezes, são necessários vários compressores ligados em série para atingir a pressão desejada de armazenamento e ligados em paralelo para se ter uma vazão considerável para aplicações em escala. As tecnologias de armazenamento de hidrogênio, como compressão ou liquefação ainda são caras e exigem infraestrutura avançada, tendo o custo de produção e o de manutenção significativos em relação a todo o processo desde a geração até o uso.

Já para armazenar H₂ na fase líquida, o que promove o aumento da densidade energética, é exigido que resfriamento atinja temperaturas de aproximadamente 20 K, o que consome energia para refrigeração. Na Fig. 1 é apresentado o diagrama de temperatura por volume específico, sobreposto pelas linhas isobáricas e isoentálpicas (Moran *et al.*, 2013). Logo, entende-se que são exigidos conjunto de compressores e tanques de materiais específicos e com isolamento térmico adequado.

O hidrogênio é uma molécula muito pequena e, como tal, pode difundir-se facilmente através de muitos materiais, essa característica é denominada alta permeabilidade, logo, esse efeito pode causar vazamentos e, lógico, apresentar riscos de segurança. Inclusive, quando o H₂ é armazenado em recipientes de materiais metálicos ele penetra na microestrutura do metal e causa o defeito estrutural chamado de fragilização por hidrogênio, que é um tipo de corrosão,

tornando o material suscetível a fraturas frágeis. Isso limita a escolha de materiais para tanques de armazenamento e tubulações para transporte, muitas vezes exigindo ligas especiais ou revestimentos.

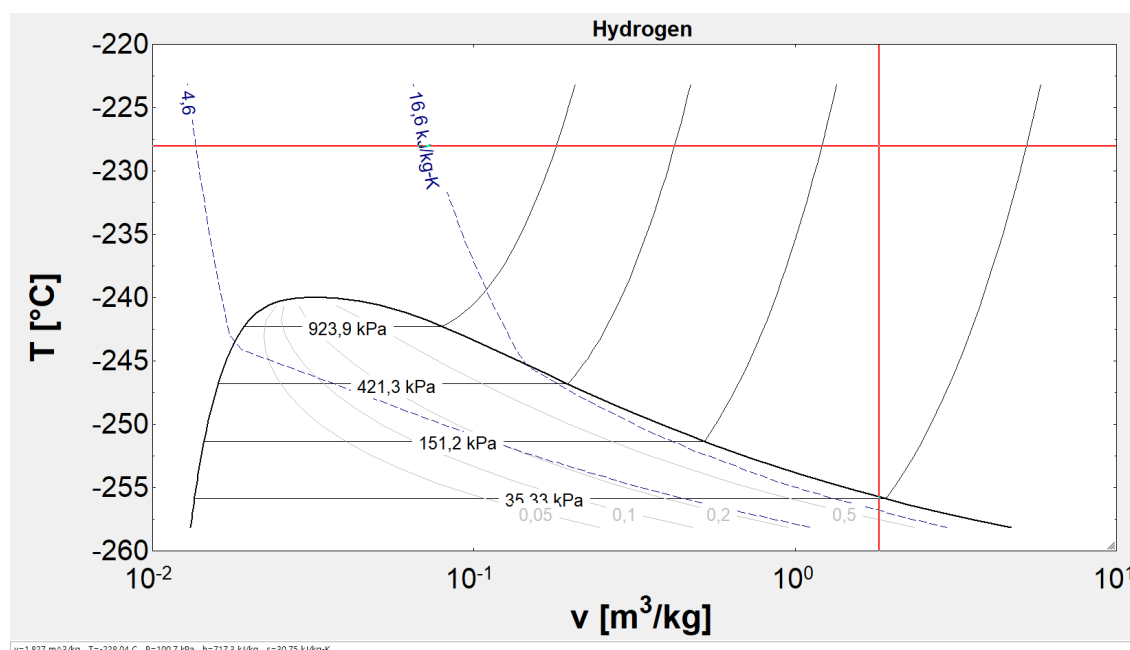


Figura 1: Diagrama termodinâmico de temperatura por volume específico do H_2 .

No caso do hidrogênio líquido, a evaporação é inevitável devido à sua baixa temperatura de ebulição gerando as perdas por Evaporação (*Boil-Off*). Mesmo em tanques criogênicos, parte do hidrogênio inevitavelmente se perde como vapor, especialmente durante o transporte ou armazenamento prolongado.

Uma última característica que se destaca é que o hidrogênio é altamente inflamável e pode formar misturas explosivas com o ar em uma ampla faixa de concentrações (de 4% a 75% em volume). Isso torna o armazenamento seguro de hidrogênio imperativo, exigindo medidas rigorosas de segurança para prevenir explosões e incêndios.

A armazenagem de hidrogênio requer infraestrutura especializada, como tanques de alta pressão, sistemas de criogenia e materiais que suportem as condições extremas sem

degradar. Projetar, construir e manter essa infraestrutura são tarefas complexas e dispendiosas. Aumenta-se ainda mais o desafio tecnológico quando é necessário armazenar grandes quantidades, para uso em larga escala, como em estações de reabastecimento ou em aplicações industriais. Esses fatores tornam o armazenamento de hidrogênio um dos maiores obstáculos à sua adoção como combustível limpo, incentivando a pesquisa contínua em novas tecnologias e materiais que possam mitigar essas dificuldades.

METODOLOGIA

Utilizando um volume de controle sobre um motor a gás, Fig. 2, que pode ser modelado através do ciclo Bryton ideal (Moran *et al.*, 2013; Borgnakke e Sonntag, 2015), onde se tem um compressor, que admite o ar atmosférico e seu eixo está conectado diretamente à turbina. O compressor envia o ar comprimido para a câmara de combustão, onde é misturado com o combustível, e é enviado para a turbina, onde se tem o eixo principal de potência, após passar pela turbina os produtos da combustão são expelidos para o ambiente.

No presente trabalho, considera-se o processo de combustão ideal (Moran *et al.*, 2013), com excesso de ar, de um combustível na forma C_xH_y , tendo como comburente o ar atmosférico composto por 21% oxigênio (O_2) e 79% de nitrogênio atmosférico (N_2), onde o N_2 contém tanto o nitrogênio quanto o argônio.

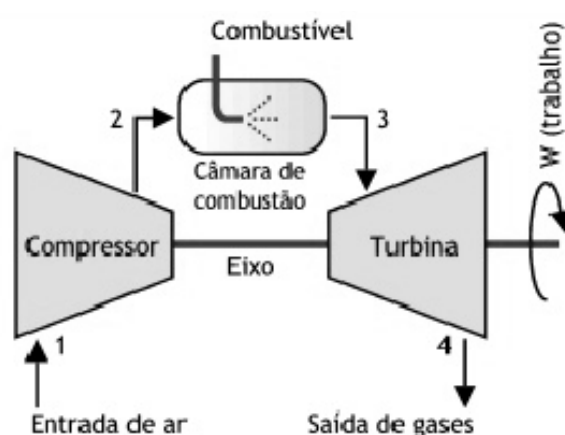
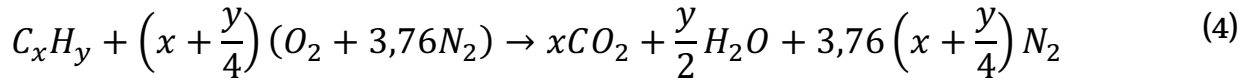
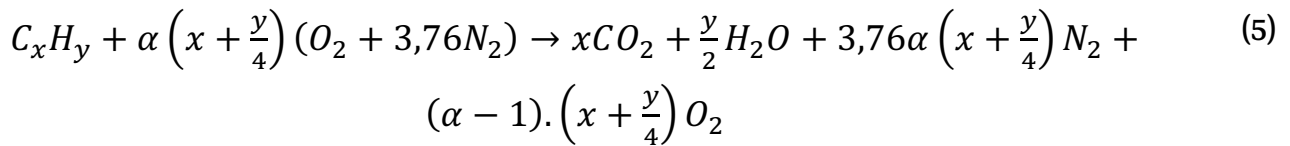


Figura 2: Desenho esquemático do motor a gás, que pode ser modelado pelo ciclo Bryton ideal.

Aplica-se as equações de balanço de massa em sua forma integral, obtendo a Eq. 4:



Com os coeficientes estequiométricos estabelecidos para a combustão ideal, desenvolve-se o equacionamento para a combustão com uma porcentagem de excesso de ar, indicada pelo coeficiente α , obtendo:



Quanto ao balanço de energia sobre o motor a gás, aplica-se a equação de balanço de energia na forma integral:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{entrada} \dot{m} \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_{saída} \dot{m} \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (6)$$

Deve-se observar na Fig. 2 que há ar atmosférico sendo captado pelo compressor e combustível sendo inserido na câmara de combustão e são expelidos gases de combustão. Considera-se ainda que o processo se dá em regime permanente, desprezam-se as variações de energia cinética e potencial e a taxa de transferência de calor, $\dot{Q}$, passa a ser uma fração, β , da potência produzida, $\dot{W}$, obtém-se:

$$0 = (1 - \beta)\dot{W} + \left(\dot{m}_{C_xH_y} h_{C_xH_y} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} + \dot{m}_{N_2} h_{N_2} \right)_e - \left(\dot{m}_{CO_2} h_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} h_{H_2O} + \dot{m}_{N_2} h_{N_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} \right)_s \quad (7)$$

Colocando todas as entalpias na mesma base de referência (Borgnakke e Sonntag, 2015), aparece o conceito de entalpia de formação, h_f , de substâncias compostas e variação de entalpia a partir da temperatura de referência padronizada de 25 °C, Δh :

$$h = h_f + \Delta h \quad (8)$$

Substituindo a Eq. 8 na Eq. 7, tem-se:

$$(1 - \beta)\dot{W} = \left[\begin{array}{l} \dot{m}_{CO_2}(h_f + \Delta h)_{CO_2} + \\ (h_f + \Delta h)\dot{m}_{H_2O}(h_f + \Delta h)_{H_2O} + \\ \dot{m}_{N_2}(h_f + \Delta h)_{N_2} \\ ++\dot{m}_{O_2}(h_f + \Delta h)_{O_2} \end{array} \right]_e - \left[\begin{array}{l} \dot{m}_{C_xH_y}(h_f + \Delta h)_{C_xH_y} + \\ \dot{m}_{O_2}(h_f + \Delta h)_{O_2} + \dot{m}_{N_2}(h_f + \Delta h)_{N_2} \end{array} \right]_s \quad (9)$$

Da teoria termodinâmica de análise de misturas, tem-se que a entalpia de formação é nula para substâncias puras e considerando que o combustível e o ar atmosférico entram no volume de controle na temperatura padrão de 25 °C e na pressão atmosférica, simplifica-se a Eq. 9 na Eq. 10:

$$(1 - \beta)\dot{W} = \left[\begin{array}{l} \dot{m}_{CO_2}(h_f + \Delta h)_{CO_2} + \\ (h_f + \Delta h)\dot{m}_{H_2O}(h_f + \Delta h)_{H_2O} + \\ \dot{m}_{N_2}\Delta h_{N_2} + \dot{m}_{O_2}\Delta h_{O_2} \end{array} \right]_e - \left[\dot{m}_{C_xH_y}h_{f_{C_xH_y}} \right]_s \quad (10)$$

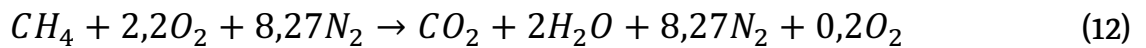
Colocando a Eq. 10 na base molar por mol de combustível temos a Eq. 11:

$$(1 - \beta)\frac{\dot{W}}{\dot{n}_{C_xH_y}} = \left[\begin{array}{l} n_{CO_2}(h_f + \Delta h)_{CO_2} + n_{H_2O}(h_f + \Delta h)_{H_2O} + n_{N_2}\Delta h_{N_2} + \\ n_{O_2}\Delta h_{O_2} \end{array} \right]_e - \left[h_{f_{C_xH_y}} \right]_s \quad (11)$$

onde os coeficientes “n’s” são exatamente os coeficientes estequiométricos da Eq. 5.

Os valores das entalpias de formação são valores constantes para cada substância e a variação de entalpia é função da temperatura padrão a 25 °C também para cada substância, todos esses valores são obtidos de Borgnakke e Sonntag (2015). Então, com a Eq. 5 e a Eq. 11 é possível estimar a potência, $\dot{W}$, produzida no motor a gás para combustíveis na forma C_xH_y .

No presente trabalho compara-se o uso de metano, que tem a composição CH_4 , com o hidrogênio, escolheu-se o metano por ser um combustível gasoso, ou seja, tem a mesma fase que o H_2 , e apresentar o mais alto poder calorífico entre os diversos combustíveis hidrocarbonetos convencionais. Então, substituindo $x=1$ e $y=4$, e considerando um excesso de ar de 10% ($\alpha = 1,1$), na Eq. 5:



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de entalpia de formação e a variação de temperatura de saída dos gases de combustão em relação à temperatura padrão, $\Delta h = 700 K$, obtidos em Borgnakke e Sonntag (2015) para cada substância são apresentados na Tab. 1:

Tabela 1: Propriedades termodinâmicas da combustão (Borgnakke e Sonntag, 2015).

Substância	h_f (kJ/kmol)	Δh_{700K} (kJ/kmol)
CH ₄	-74.873	0
CO ₂	-393.522	17.754
H ₂ O	-241.826	14.190
O ₂	0	12.499
N ₂	0	11.937
H ₂	0	0

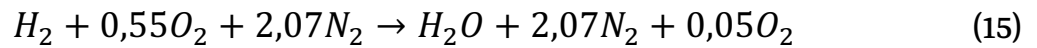
Considerando que o calor perdido ao longo do ciclo Brayton é 5% da potência produzida ($\beta = 0,05$) e substituindo os coeficientes estequiométricos obtidos na Eq. 12, os valores das respectivas entalpias de formação e Δh_{700K} da Tab. 1, na Eq. 11, obtém-se:

$$\frac{0,95\dot{W}}{\dot{n}_{CH_4}} = (-393.522 + 17.754)_{CO_2} + 2(241.826 + 14.190)_{H_2O} + 8,27(11.937)_{N_2} + 0,2(12.499)_{O_2} - (-74.873)_{CH_4} \quad (13)$$

Logo, resolvendo a Eq. 13, tem-se que a potência do motor a gás é 648,13kW/mol de CH₄, colocando na base mássica tem-se:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{CH_4}} = 40,4 \frac{kJ}{kg \text{ de } CH_4} \quad (14)$$

Refazendo o balanço estequiométrico apresentado na Eq. 5 para o H₂, ou seja, $x=0$ e $y=2$, com a mesma quantidade de excesso ($\alpha = 1,1$) de ar sugerido para o CH₄, tem-se:



Substituindo os valores das entalpias de formação e variação em relação à temperatura padrão ($\Delta h = 700 \text{ K}$) dadas na Tab. 1, na Eq. 11:

$$\frac{0,95\dot{W}}{\dot{n}_{H_2}} = (-241.826 + 14.190)_{H_2O} + 2,07(11.937)_{N_2} + 0,05(12.499)_{O_2} \quad (16)$$

Resolvendo a Eq. 16, obtém-se 1.592,8 kW/mol de H₂. E na base mássica, tem-se:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{H_2}} = 790,1 \frac{kJ}{kg \text{ de } H_2} \quad (17)$$

Comparando os resultados das Eqs. 14 e 17 observa-se que, para um motor a gás funcionando com 1,0 kg/s de H₂ produz 19,55 vezes mais energia que 1,0 kg/s de CH₄ para as mesmas considerações de excesso de ar e perdas térmicas. Além disso, no processo de combustão do CH₄ é produzido 1,0 kmol de CO₂, que na base mássica é equivalente à 44,01 kg de CO₂, ou para 1,0 kg/s de CH₄ são produzidos 22,7 g/s de CO₂ emitidos na atmosfera.

Cabe considerar que, dessa quantidade de energia a mais, parte dela deve ser usada para manter o processo de compressão ou liquefação, via refrigeração, para o armazenamento do H_2 . Sendo que a mesma observação vale para o armazenamento do CH_4 , porém neste caso, o gasto energético de compressão é inferior ao do armazenamento de H_2 .

CONCLUSÕES

No presente artigo, foi desenvolvida uma metodologia simplificada para realizar a comparação energética entre dois diferentes combustíveis, o metano (CH_4) considerado um combustível gasoso convencional e o H_2 , um dos combustíveis mais sugeridos para ampliar a transição energética. Para tanto, o balanço de energia é aplicado no processo de combustão ideal de um motor padrão ciclo Brayton.

Mostra-se que 1,0 kg de H_2 produz 19,55 vezes mais energia que o CH_4 e não produz CO_2 , no processo de combustão, enquanto no processo de combustão de 1,0 kg/s de CH_4 são produzidos 22,7 g/s de CO_2 . Entretanto, deve-se considerar os gastos energéticos de produção e armazenamento, pois o H_2 é uma molécula com pequena massa específica, e não é encontrada diretamente na natureza.

Agradecimentos. Os autores agradecem à FAPEG, à Secretaria Geral de Governo do estado de Goiás (SGG), ao Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Sustentáveis (CEHTES) e à Eletrobrás e ao Programa de P&D da ANEEL pela infraestrutura e apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIR, F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Academic Press, 2005.
- BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Academic Press. 2013.
- BORGNÄKKE, C., SONNTAG, R. Fundamentos de Termodinâmica. Blucher; ed. 8, 2015.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38.

2006.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Bases para a consolidação estratégica brasileira do hidrogênio, Nota Técnica 003/2021. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acesso em: 06 out. 2024.

FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, 238. 1972.

International Energy Agency (IEA). The Future of Hydrogen. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>. Acesso em: 06/10/ 2024.

KOTHARI, R., BUDDHI, D., SAWHNEY, R. L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 2, p. 553-563, 2008.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. *Princípios de termodinâmica para engenharia*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 820 p.

MURADOV, N. Z. Hydrogen via methane decomposition: an application for decarbonization of fossil fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26. 2001.

Projeto e Pesquisa em Engenharia Química (PROPEQ). Principais usos do Hidrogênio. 2022. Disponível em: <<https://propeq.com/usos-producao-hidrogenio/>>. Acesso em: 06 out. 2024.

ZENG, K., ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36.s. 2010.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616775>

UMA METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PROBLEMAS ESTÁTICOS UTILIZANDO TÉCNICA DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Mauro C. Silva¹, Marco A. B. C. Badan¹

¹*Departamento de áreas acadêmicas IV, Instituto Federal de Goiás- Campus Goiânia
R. 75, 46 - Centro, Goiânia - GO, 74055-110 Goiânia/ Goiás, Brasil Maurocesarmc216@gmail.com*

Resumo. A otimização de estruturas tem se mostrado como uma ferramenta fundamental para a engenharia moderna, impulsionada pela crescente demanda por estruturas mais leves, eficientes e sustentáveis. Também a busca por soluções que minimizem o consumo de materiais e reduzam o impacto ambiental tem empregado diversas técnicas de otimização baseadas em modelos computacionais. No entanto, a aplicação dessas técnicas a estruturas complexas ainda apresenta desafios. Este artigo propõe uma metodologia de análise estrutural que visa superar essas limitações, permitindo a otimização de estruturas sob esforços estáticos de forma mais precisa e eficiente. Através da combinação de técnicas de modelagem e algoritmos de otimização robustos, a metodologia desenvolvida neste estudo permite a análise de estruturas com geometrias complexas e carregamentos variados.

Palavras-chave: Elementos finitos. Otimização. Evolução diferencial. Estruturas estáticas.

INTRODUÇÃO

A otimização de estruturas tem se tornado um tema cada vez mais relevante na engenharia, impulsionada pela busca constante por soluções mais eficientes, econômicas e sustentáveis. O método dos elementos finitos, por sua vez, tem se consolidado como uma ferramenta poderosa para a análise numérica de estruturas complexas, permitindo simular o comportamento de componentes estruturais sob diversas condições de carregamento. A combinação dessas duas técnicas, otimização e elementos finitos, oferece um potencial enorme para o desenvolvimento de projetos mais inovadores e competitivos.

O objetivo deste artigo é desenvolver uma metodologia de otimização aplicada a estruturas estáticas, utilizando o método dos elementos finitos nativo do software

SOLIDWORKS como ferramenta de análise auxiliar de análise. A otimização implementada em conjunto com o software *SOLIDWORKS*, permite identificar a distribuição ideal de material dentro de um domínio de projeto, mantendo a resistência mecânica e menor peso. Ao explorar o potencial da otimização em conjunto com o método dos elementos finitos, busca-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de otimização estrutural e oferecer uma ferramenta útil para os engenheiros. A relevância deste trabalho reside na necessidade de desenvolver soluções mais eficientes e sustentáveis para os desafios da engenharia moderna e, na técnica de integração de *softwares* diferentes para a obtenção de resultados.

DESENVOLVIMENTO

Elementos Finitos

À medida que a tecnologia avança, surgem oportunidades para o desenvolvimento de novas técnicas de análise estrutural, especialmente para estruturas complexas. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta amplamente adotada para simplificar a investigação de estruturas com geometrias complexas, que desafiam abordagens analíticas clássicas. Segundo Azevedo (2003), o principal objetivo do MEF é criar uma formulação que permita automatizar a análise de sistemas complexos e/ou irregulares usando programas computacionais. Cook et al. (2007) definem o MEF como uma técnica de aproximação por partes, onde a função de aproximação é formada pela interconexão de funções simples definidas em pequenas regiões chamadas de elementos finitos. Isso permite a interpolação de funções a partir dos valores nodais, mantendo a continuidade entre os elementos no conjunto.

A análise por elementos finitos envolve várias etapas:

1. Dividir a estrutura em elementos finitos, geralmente usando programas de geração de malha.
2. Definir as propriedades de cada elemento, incluindo as cargas associadas.
3. Montar os elementos para formar o modelo de elementos finitos da estrutura.

4. Aplicar as cargas conhecidas, incluindo forças e/ou momentos.
5. Especificar as condições de contorno, definindo deslocamentos nodais conhecidos ou outras restrições.
6. Resolver as equações algébricas lineares resultantes, que descrevem o comportamento do sistema.
7. Calcular os resultados desejados, como tensões, deformações e deslocamentos.

O MEF é uma ferramenta poderosa para a análise de estruturas e sistemas complexos, permitindo uma compreensão mais aprofundada do comportamento mecânico e a otimização de projetos.

Otimização

Brasil e Silva (2019) definem otimização como o processo de determinar a melhor opção entre várias, levando em conta critérios de escolha e limitações dos recursos disponíveis. Lubke (2023) aborda a otimização como o processo de maximizar ou minimizar uma ou mais funções, que representam objetivos específicos. Essas funções dependem de vários parâmetros específicos para cada problema e estão sujeitas a diversas restrições de projeto. Em essência, a otimização envolve a escolha de uma técnica que, por meio de uma função objetivo, busca encontrar a solução ótima

Evolução Diferencial (ED)

Desenvolvida por Storn e Price em 1995, a Evolução Diferencial (ED) foi inicialmente uma solução para o problema de ajuste polinomial de Chebyshev, visando obter resultados mais precisos. Diferente de outros métodos, a ED utiliza uma população de vetores com números reais, economizando processamento e acelerando a convergência do algoritmo. A Evolução Diferencial é um método de busca direta paralela por vetores de parâmetros NP.

$$(X_i, g), i = 0, 1, 2, \dots, NP - 1 \quad (1)$$

Como uma população para cada geração NP não muda durante o processo de minimização, a população inicial é escolhida aleatoriamente, se nada for conhecido sobre o sistema. Como regra, assume-se uma uniformidade de distribuição de probabilidade para todas as decisões aleatórias, salvo indicação em contrário. Caso uma solução preliminar seja disponível, a população inicial é frequentemente gerada adicionando desvios aleatórios normalmente distribuídas, a solução nominal ($X_{nom}, 0$). A Evolução Diferencial gera novos vetores de parâmetros adicionando o vetor de diferença ponderada entre dois membros da população a um terceiro membro. Se o vetor resultante produzir um valor de função objetivo inferior ao de um membro predeterminado, ele substitui o vetor comparado. O melhor vetor de parâmetros é avaliado a cada geração para acompanhar o progresso durante a minimização. Esse esquema adaptativo usa desvios aleatórios para obter excelentes propriedades de convergência. Por exemplo, para cada vetor ($X_{i,g}$) $i = 0, 1, 2, \dots, NP-1$, é criado um vetor teste:

$$V = X_{r1,G} + F \cdot (X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (2)$$

onde $r1$, $r2$ e $r3$ são inteiros aleatórios e mutuamente diferentes, e F é um fator real constante que controla a amplificação da variação diferencial.

METODOLOGIA

Para a realização do estudo proposto neste artigo, a metodologia basicamente se dividiu em três partes: a primeira parte consistiu no desenvolvimento de uma análise da estrutura por meio de programação nos *softwares SOLIDWORKS / Visual Basic*, a segunda parte, na modelagem do problema no código de otimização, utilizando a função objetivo e por fim, a terceira parte, na análise dos resultados encontrados.

Programação no SOLIDWORKS

O objetivo primário desta parte do estudo é desenvolver um programa utilizando o ambiente *Visual Basic for Applications (VBA)* do *software SOLIDWORKS*. Quando executado, o

programa visa facilitar o estudo do projeto em questão, utilizando os dados fornecidos pelo usuário, para deixar a análise mais automatizada. O VBA é o mecanismo que grava, executa ou edita macros no *SOLIDWORKS*. Utilizando essa ferramenta de macro é possível realizar desde a confecção de geometrias até simulações das estruturas propostas. O objetivo desta aplicação é viabilizar a leitura dos dados de geometria fornecidos pelo usuário quando a macro é executada. A macro, por sua vez, realiza a construção da peça, aplica o material definido e incorpora as condições de contorno especificadas no projeto, tais como restrições de graus de liberdade e a aplicação de forças. Ao finalizar, apresenta os resultados da análise por elementos finitos, fornecendo informações cruciais para avaliar a confiabilidade da estrutura, como a análise de tensões críticas, deformações e deflexões resultantes das condições impostas à peça.

Para atingir esse propósito, inicialmente, será utilizada a ferramenta de gravação de macro. Nesse processo, as ações de desenho da peça e todas as etapas de simulação, incluindo a implementação das condições de contorno, tais como restrições e aplicação de forças, geração de malha e execução do estudo, serão gravadas. Posteriormente, após a geração do código, este será analisado e em seguida, através de um estudo mais aprofundado, será possível desenvolver uma codificação mais específica para o problema proposto.

Otimização

A otimização buscada neste estudo será encontrar as dimensões ótimas para uma geometria qualquer, quando se sabe a carga máxima que está sendo imposta na estrutura. O código de otimização utilizado neste trabalho será o originalmente desenvolvido por Storn et al. (1997) para realização de otimização baseada em evolução diferencial, em que se utilizou o software Octave para realização desta tarefa. Para isso, será analisado uma geometria não tão simples: uma viga em formato T.

Para uma análise que permita encontrar a melhor configuração que resulte em uma viga com menor peso sem comprometer sua integridade estrutural, implementaremos uma configuração de furos na qual seus diâmetros serão a metade do valor da altura da alma. A

quantidade de furos será analisada de duas formas: inicialmente, o otimizador escolherá a quantidade ideal de furos e na outra, a quantidade de furação será definida de acordo com a bitola da viga, conforme a configuração apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis para otimização

Perfil da Viga	Quantidade de Furos
≤ 25.4	2
> 25.4 e ≤ 38.1	4
> 38.1	8

Etapas para estudo da geometria analisada

Primeiramente, será realizada a programação para geração da estrutura em T e análise do problema. Neste caso, o objetivo será encontrar as dimensões de largura b_f da mesa, a altura d da alma, a espessura t_f das mesmas, além das dimensões de alívio de massa no meio da viga, através de furos que serão adicionados no perfil, onde seus diâmetros serão sempre a metade do valor da altura da alma, e a quantidade de furos será livremente escolhida pelo otimizador. A última variável adicionada será as distâncias inicial e final dos furos. O objetivo é encontrar o valor ótimo dessas dimensões quando a viga tiver um engaste em uma de suas pontas, sob carga vertical de 100 N na outra extremidade.

O material utilizado na viga será o aço ASTM A36 / MR 250 (NBR 7007.) As medidas mínimas e máximas estarão de acordo com o perfil T, disponibilizado pela GERDAU, de um perfil comercial, conforme as das medidas obtidas via otimização.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estudo a partir do VBA

Inicialmente, a macro do *SOLIDWORKS* gera a geometria proposta, conforme a Fig. 1. Sendo que a macro basicamente realiza a leitura de um arquivo .txt com as medidas para a viga proposta e a reconstrói a partir disso.

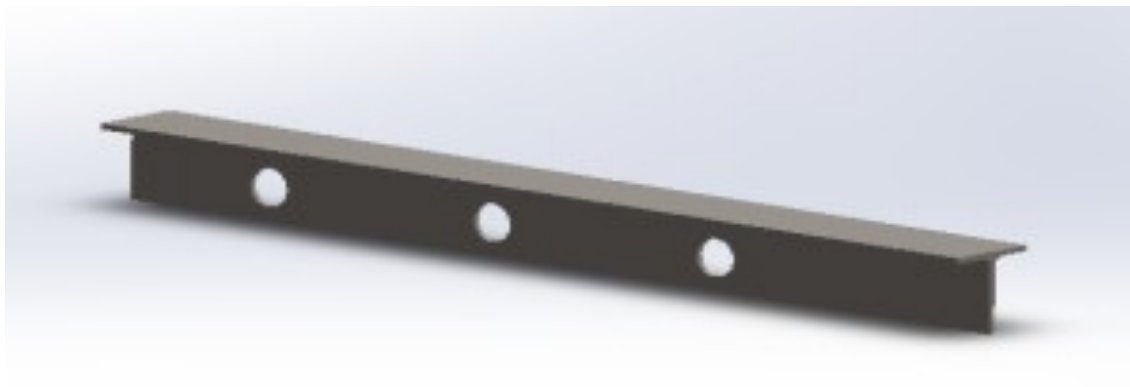


Figura 1 – Viga editada pela macro.

Simulação por Elementos Finitos

A próxima ação realizada pela macro foi a análise por elementos finitos para obter os valores das tensões de Von Mises da peça. Foi utilizado o ambiente *COSMOSWORKS* do VBA do *SOLIDWORKS*, que permite acesso ao *Simulation*, que é o pacote de elementos finitos do *software*.

Criação das Condições de Contorno

O próximo passo foi implementar as condições de contorno na geometria para simular o problema proposto para essa peça, conforme está demonstrado na Fig.2. A face inferior da viga foi engastada em que com o código criado selecionará sempre esta face, independentemente do tamanho, definindo a condição de engaste. Em seguida, foi imposta uma força vertical na outra face da viga, representando uma força de 100 kN. Após definir as condições de contorno, a malha da peça é gerada automaticamente pelo próprio *software*. Finalmente, o estudo é executado, e ao final pode-se obter as tensões máximas de Von Mises da peça para aquelas condições impostas. Para posterior análise, os resultados foram salvos automaticamente em um arquivo .txt após a execução da macro, conforme o exemplo da Fig. 3.

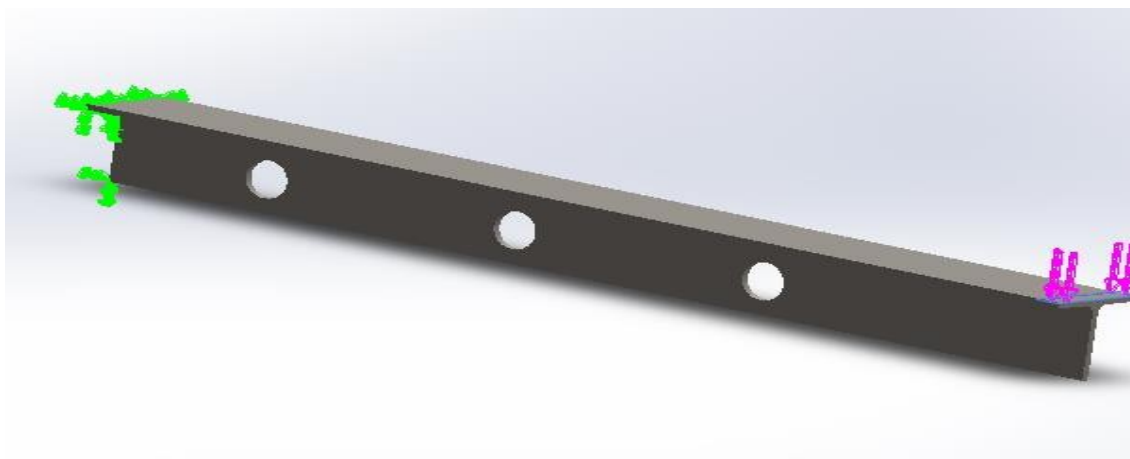


Figura 2 - Condições de contorno no cilindro.

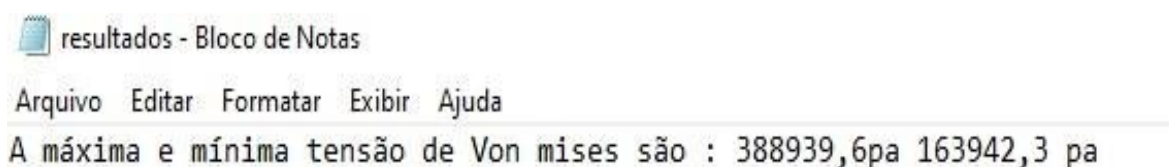


Figura 3 - Resultados após execução da macro.

Otimização da Geometria – Primeira análise

Para o processo de otimização, o intervalo utilizado em cada uma das medidas foi baseado nas dimensões do perfil T da GERDAU, os perfis estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis para otimização

Variável	Largura e Altura da viga (mm)	Números de furos	Dist. Inicial e final dos furos (mm)	Espessura da Viga (mm)
Xmin	19,05	1	80	2,50
Xmax	50,8	8	150	6,35

O primeiro valor representa a largura da mesa e a altura da alma. O segundo valor é a quantidade de furos na estrutura, cujos diâmetros sempre vão representar a metade da altura da alma da viga. Neste primeiro estudo, permitiu-se que o otimizador escolhesse a quantidade de furos a serem inseridos ao longo da viga, dentro de um intervalo definido, esse intervalo foi

estabelecido de acordo com o comprimento da viga de 500 mm. O terceiro parâmetro representa a distância do furo inicial e final das extremidades, e o último valor representa a espessura da viga T . Neste estudo, configura-se a função objetivo da Fig. 4 para o problema.

```

1 function result = fun_objective(x)
2 save med.txt -ascii;
3 open('C:\Users\Usuario\Desktop\Exemacro\Exemacro\bin\Debug\net6.0\
   Exemacro.exe')
4 fy = 250*10^6; % Em Mpa
5 n=2;
6 Tadm = fy/n;
7 Tmax = load('RESU.txt');
8 result = abs(Tadm - Tmax)
9 endfunction

```

Figura 4 - Função objetivo viga T.

Nesta primeira análise, a função objetivo salva os valores de X gerados pelo otimizador dentro do intervalo em "med.txt" e em seguida executa a macro deste problema no *SOLIDWORKS* a partir programa no *Octave*. Após a execução da macro, a função salva o valor da tensão máxima (T_{max}) em um arquivo .txt e compara os resultados obtidos com a tensão admissível (T_{adm}), baseada no limite de escoamento de 250 MPa e o fator de segurança $n=2$. A função objetivo avalia o erro em módulo entre as tensões obtidas via *SOLIDWORKS* com a tensão admissível, permitindo selecionar o perfil mais adequado à situação da viga e assim determinar a melhor configuração de furos para não comprometer a estrutura, mesmo com um alívio de massa. Devido ao custo computacional, o número máximo de iterações foi definido como 30 e o número de repetições como 3. Ao final da execução do programa, foram encontrados os resultados conforme tab. 3

Tabela 3. Variáveis para otimização

Teste	Função Obj. (Pa)	Alt./Larg. (mm)	Nº de furos	Distância Inicial(mm)	Espessura (mm)	Massa (kg)
Primeiro	41400	37.86	8	50.01	2.82	0.822
Segundo	197700	37.52	1	100	2.5	0.754
Terceiro	87500	31.02	8	63.74	4.71	1.084

Na Tabela 3, a segunda coluna mostra o erro da função objetivo, que é a diferença entre ($|T_{adm}-T_{max}|$), enquanto as colunas seguintes apresentam os valores de altura/largura, número de furos, distâncias inicial e final dos furos, espessura da viga e valor de massa para as configurações obtidas. Das três repetições feitas, o menor erro ocorreu na primeira repetição, com um valor de 41400 Pa. Esses resultados representam as melhores combinações de medidas, considerando as variáveis definidas, número de iterações e repetições utilizadas. Assim, conforme o intervalo definido e a metodologia proposta, o perfil que melhor atende às medidas encontradas possui a seguinte configuração:

Tabela 4. Variáveis para otimização

Alt./Larg.(mm)	Nº de furos	Distância Inicial (mm)	Espessura (mm)	Massa (kg)
38.1	8	50.01	3.18	0.9

Otimização - Segundo resultado

Para uma análise que permita identificar a melhor configuração para uma viga com menor peso, sem comprometer sua integridade estrutural, foi conduzido um segundo estudo. Neste estudo, a quantidade de furos foi definida de acordo com a bitola da viga, seguindo a configuração estabelecida na tab. da metodologia, ao invés de ser uma variável de projeto. Neste caso, segue a função objetivo formulada para o problema:

```

1 function result = fun_objective(x)
2 if x(1) < 0.0254
3 x(2) = 2;
4 elseif x(1) >= 0.0254 && x(1) < 0.0381
5 x(2) = 4;
6 elseif x(1) >= 0.0381
7 x(2) = 8;
8 endif
9 save med.txt -ascii;
10 open('C:\Users\Usuario\Desktop\Exemacro\Exemacro\bin\Debug\net6.0\
    Exemacro.exe')
11 fy = 250*10^6; % Em Mpa
12 n=2;
13 Tadm = fy/n;
14 Tmax = load('RESU.txt');
15 resis = abs(Tadm - Tmax);
16 result = resis;
17 endfunction

```

Figura 4 - Condições de contorno no cilindro

Neste caso, a principal diferença em relação à função objetivo anterior reside na condicional que ajusta o valor de $x(2)$ com base no tamanho da bitola da viga, representado por $x(1)$. Essa modificação permite que a quantidade de furos seja adaptada de acordo com as características da viga. O restante da análise e os parâmetros de otimização permaneceram os mesmos do estudo anterior. Após a execução do programa, os resultados obtidos foram apresentados na tab.5

Tabela 5. Resultados do segundo estudo.

Teste	Função Obj. (Pa)	Alt./Larg. (mm)	Nº de furos	Distância Inicial(mm)	Espessura (mm)	Massa (kg)
Primeiro	251200	27,87	4	40	6,35	1,28
Segundo	19400	32,39	4	100	3,78	0,946
Terceiro	29900	38,19	4	46,86	2,74	0,8424

Entre os testes realizados, o melhor resultado foi obtido na segunda repetição, com um erro de 19400 Pa para uma configuração com 4 furos. Considerando este resultado, as seguintes configurações de perfil podem ser utilizadas, de acordo com a proximidade das medidas dos perfis comerciais:

Tabela 6. Variáveis para otimização

Alt./Larg.(mm)	Nº de furos	Distância Inicial (mm)	Espessura (mm)	Massa (kg)
38.1	4	100	3.18	0.948
31,75	4	100	4,76	1.140

Pelos resultados da Tabela 6, verifica-se que ambas as configurações atendem ao requisito de tensão admissível, com valores de 111 MPa e 97,76 MPa, respectivamente. Embora o segundo caso apresente uma tensão menor, a primeira configuração é considerada a melhor opção devido à sua menor massa. Comparando este resultado com a primeira análise, observa-se que a massa é bastante similar, porém com um perfil estrutural diferente.

CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento deste trabalho, foi possível atingir os objetivos estabelecidos, que compreenderam na proposta de criar uma metodologia para a análise estrutural de projetos com carga estática. A programação implementada via *SOLIDWORKS* possibilita a realização automatizada da análise de estruturas mecânicas, permitindo a avaliação de diferentes formas de entrada de dados e a observação dos resultados que essas variações implicam no projeto. Isso proporciona uma abordagem mais eficiente e abrangente na análise estrutural, ampliando as possibilidades de compreensão e otimização do desempenho de projetos mecânicos, seja para estruturas com geometrias mais simples, seja para estruturas com geometrias mais complexas. A otimização implementada mostrou-se aceitável em seus resultados, com os resultados encontrados pela análise de otimização sendo bem aderentes aos resultados esperados via cálculo manual. Para as análises mais complexas, os resultados

encontrados em ambas as vias de análise se mostram bastante semelhantes. A partir desses resultados, pode-se concluir que a metodologia proposta neste trabalho é uma ferramenta interessante para analisar projetos mecânicos, com resultados que podem auxiliar na escolha mais adequada da configuração do projeto, dependendo do que está sendo analisado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, Á. F. Método dos elementos finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, v. 1, n. 7, 2003.
- BRASIL, R. M.; SILVA, M. A. da. Otimização de projetos de engenharia. [S.l.]: Editora Blucher, 2019
- BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- COOK, R. D. et al. Concepts and applications of finite element analysis. [S.l.]: John wiley & sons, 2007.
- LUBKE, G. P. Otimização de vigas alveolares de aço utilizando método dos elementos finitos e algoritmos genéticos. 2023.
- STORN, R. et al. Differential Evolution (DE). 1997, 2010. E-book. 220 p. DOI 10.7476/978857541352. Disponível em: <http://www.i.berkecsley.edu/storn/-code.html>. Acesso em: 8 jan. 2023.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616790>

ENERGIA RENOVÁVEL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AO SANEAMENTO BÁSICO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA DOS PRINCIPAIS MÉTODOS E TECNOLOGIAS

Lucas L. da Silva¹

¹Saneamento de Goiás S/A

Av. Fued José Sebba, 1245, Jardim Goiás, 74805-100, Goiânia-GO, Brasil

lucaslauriano@discente.ufg.br

Resumo. O saneamento básico é essencial, impactando a saúde pública, a economia e o desenvolvimento sustentável. Este artigo realiza uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de energia renovável e eficiência energética no saneamento no Brasil, com ênfase em Goiás. A metodologia de busca envolveu as principais bases científicas, utilizando termos relacionados ao saneamento e energia sustentável. A pesquisa destaca tecnologias renováveis, como a energia fototérmica para a produção de água potável e tratamento de esgoto, além da energia fotovoltaica como alternativa para gerar eletricidade em regiões isoladas. O artigo propõe alternativas como prédios sustentáveis e o banheiro solar, como formas de saneamento eficiente, promovendo a sustentabilidade e universalização dos serviços. Sugere-se, ainda, analisar a viabilidade econômica e a implementação prática dessas tecnologias em contextos regionais, ampliando a compreensão sobre as soluções sustentáveis discutidas.

Palavras-chave: Saneamento básico. Energias renováveis. Energia solar. Gestão de energia.

INTRODUÇÃO

O aumento das energias renováveis, o turismo, o aprimoramento do saneamento, o desenvolvimento financeiro, a abertura comercial e o acúmulo de reservas são essenciais para o crescimento sustentável da economia de um país. Nesse contexto, observa-se a importância do desenvolvimento de energias renováveis e de um sistema de saneamento mais avançado, o que contribui para o progresso da região. Como as empresas de saneamento têm a sustentabilidade e a preservação ambiental como vertentes fundamentais, a utilização de fontes de energia renovável por essas empresas é de extrema importância (ALI *et al.*, 2018).

Um dos fatores que pode afetar a eficiência dos ativos nas unidades de saneamento básico é o envelhecimento gradual dos sistemas de abastecimento o que reflete na evolução do

consumo de energia, tanto nos seus componentes de infraestrutura civil quanto nos seus equipamentos eletromecânicos. A escassez hídrica também gera um impacto negativo no consumo de energia. A diminuição na fonte de água bruta disponível requer a captação em fontes de água mais distantes ou a profundidades maiores, o que aumenta o consumo energético. A qualidade da água também afeta a eficiência, sendo que uma piora na qualidade requer um tratamento mais complexo o que demanda mais energia e, conseqüentemente, mais caro (SNIS, 2020).

O tema da eficiência energética e das energias alternativas está intimamente conectado ao sistema de gestão das empresas de saneamento. Um dos pilares mais importantes relacionados ao saneamento é o crescimento sustentável, que se associa ao uso de energias alternativas e à eficiência. No cenário atual, destacam-se duas vertentes que ganharam relevância na sociedade globalizada: a sustentabilidade e a gestão eficiente. A gestão eficiente contrasta com a postura voltada para o imediatismo e para a resolução de problemas de alta criticidade, o famoso “apagar incêndios”. Mesmo quando se aplicam métodos modernos, a gestão ainda é negligenciada por algumas empresas, resultando em custos elevados e na perda de rendimento e eficiência dos equipamentos, além do pessoal de manutenção e operação (MACHADO e OTANI, 2008).

Dentro do sistema de gestão energética, a gestão de ativos tem se tornado parte integrante das estratégias adotadas. Apesar de ser um tema já bem definido, apenas nos últimos anos ela tem se integrado a diversos sistemas de gestão, principalmente devido à elaboração do pacote de normas ISO 55000, que trata da gestão de ativos. Branco Filho (2020) cita a importância de agregar os variados tipos de ativos que a empresa possui a uma estratégia com missão, visão e metas bem definidas e compreendidas por todos os setores. A gestão de ativos na área energética deve ser contemplada em todas as suas esferas, considerando os ativos humanos, físicos e de informação. Para uma boa gestão de ativos, é fundamental estabelecer índices e indicadores que reflitam a situação real do que está sendo comparado e estudado.

Uma forma de avaliar a eficiência energética e de produção das unidades de uma empresa de saneamento é por meio do uso de indicadores que reflitam os parâmetros de energia elétrica e do sistema de produção. Com isso, é possível estabelecer relações entre sistemas de abastecimento envelhecidos e sistemas novos, funcionando como uma ferramenta para que a gestão da empresa tome decisões mais assertivas sobre as condições de seus ativos.

Assim, este artigo pretende realizar uma pesquisa bibliográfica sobre artigos que abordem o tema de energias renováveis e eficiência energética aplicáveis ao saneamento básico, especificamente ao tratamento de água e esgoto. Serão avaliadas as principais tendências mundiais em relação à aplicação de energia solar em sistemas de saneamento, além de práticas e tecnologias que possam conduzir a uma melhor eficiência energética. Isso será uma ferramenta para que o sistema de gestão das empresas de saneamento do Brasil, especialmente no estado de Goiás, defina novas metas e auxilio na realização de objetivos já estabelecidos.

A adoção de novas tecnologias geralmente demanda tempo e muitos recursos. A maioria das empresas de saneamento básico no Brasil são estatais, sociedades de economia mista ou privadas, mas enfrentam um desafio comum: a escassez de recursos para investimentos diversificados, incluindo fontes renováveis, eficiência energética e pesquisas em geral. Normalmente, os recursos disponíveis para investimento são direcionados ao aumento da área de atendimento e à quantidade de água potável produzida, enquanto questões de melhorias são relegadas a segundo plano. Portanto, há uma necessidade de um trabalho que reúna as principais soluções alternativas já existentes, relacionadas à eficiência energética e energias alternativas, que tenham sido bem-sucedidas em sua aplicação, facilitando assim a implementação por parte das empresas que buscam evitar altos riscos ao implantar soluções pouco estudadas.

METODOLOGIA

Neste capítulo, são abordadas as principais tendências e métodos relacionados ao saneamento básico. O foco principal recai sobre artigos que tratam de temas de energia renovável e eficiência energética aplicáveis à produção de água tratada e ao esgotamento sanitário. De maneira específica, serão discutidos artigos relevantes para o saneamento no estado de Goiás, apresentando uma empresa estatal como exemplo. Os artigos selecionados têm data de publicação a partir de 2010, e os mecanismos de busca utilizados serão os oferecidos pelo Portal de Periódicos CAPES, Scopus e Web of Science. O artigo teve início em 2020 e previsão de conclusão para 2022, e a proposta inicial eram abordar artigos dos últimos dez anos, sendo assim, a partir de 2010.

Os principais termos utilizados na busca foram: *Basic sanitation, Renewable energy, photothermal and photovoltaic sanitation, sustainability water treatment* e *sustainability sewage treatment*. Foram aplicados operadores booleanos como *and, or* e *not*, juntamente com filtros para refinar as buscas, o que resultou na quantidade de artigos compatíveis, conforme descrito na Tab. 1.

Tabela 1. Quantidade de artigos pesquisados nas bases de dados

Tema	Artigos compatíveis
Energia renovável para tratamento de água	738
Energia renovável para tratamento de esgoto	335
Sustentabilidade no saneamento	602

A pré-seleção foi realizada com o *software* RStudio, versão 2020, através de *script* para exclusão de duplicados. Os artigos restantes foram analisados individualmente, de forma manual e posteriormente com auxílio do *software* Bibliometrix, inclusive como métrica de relevância dos artigos com base nas citações e locais geográficos de aplicação. Dentre os artigos Tab. 1, trinta foram pré-selecionados com base na relevância para os temas pesquisados. Os resultados obtidos foram separados por temas e organizados em uma planilha eletrônica.

Desses, foi verificada a relevância e a possibilidade de aplicação no estado de Goiás, realizando-se a análise final dos artigos e resultados selecionados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 destaca as soluções que foram selecionadas

Tabela 2. Principais soluções abordadas.

Tema	Tipo de saneamento	Ano (autor)
Aproveitamento térmico prédios de saneamento	Produção de água potável e tratamento de esgoto sanitário	2022 (Chen et al.)
Banheiro solar	Tratamento de esgoto sanitário	2021 (Fisher et al.)
Secagem de lodo por energia solar e biogás	Tratamento de esgoto sanitário	2018 (Gontijo et al.)
Soluções gerais para Atendimento a Zona rural	Produção de água potável	2017 (Barde et al.)
Energial fotovoltaica e geradores de combustão	Produção de água potável	2017 (Saneago)
Energia solar em regiões afastadas dos grandes centros	Produção de água potável	2015 (Lillo et al.)
Análise de sustentabilidade	Produção de água potável / Sustentabilidade	2015 (Iribarnegaray et al.)
Relação da gestão ambiental	Produção de água potável / Sustentabilidade	2013 (Borghi et al.)

Alternativas para sistemas de abastecimento de água tratada

As categorias de impacto mais relevantes do ponto de vista de gestão e ambiental, relacionadas ao potencial de aquecimento global, são os recursos energéticos não renováveis e o consumo de água. Os resultados referentes aos recursos energéticos não renováveis estão estritamente ligados às emissões de gases de efeito estufa, e as perdas de água geram emissões de gás de efeito estufa devido ao aumento das quantidades de água a serem tratadas, o que geralmente é convertido em quilogramas equivalentes de CO₂ (BORGHI *et al.*, 2013).

Uma análise geral de sustentabilidade foi desenvolvida por Iribarnegaray *et al.* (2015), na qual foi criado um índice de sustentabilidade relacionado à água e ao saneamento. O cálculo

do índice de sustentabilidade proposto considera diversos outros indicadores como referência. Os descritores para o cálculo do índice são: i) disponibilidade; ii) infraestrutura; iii) equidade; iv) acesso; v) planejamento; vi) participação; vii) utilização; viii) impacto e ix) satisfação. Cada um desses tópicos possui uma série de indicadores que são utilizados para o cálculo do índice de sustentabilidade, e entre os indicadores estão aqueles relacionados à eficiência energética e ao consumo de energia, incluindo o uso de recursos renováveis. É interessante destacar que o índice pode ser representado como um círculo de dimensões por meio de um gráfico de radar para cada um dos descritores, conforme mostrado na Fig. 1.

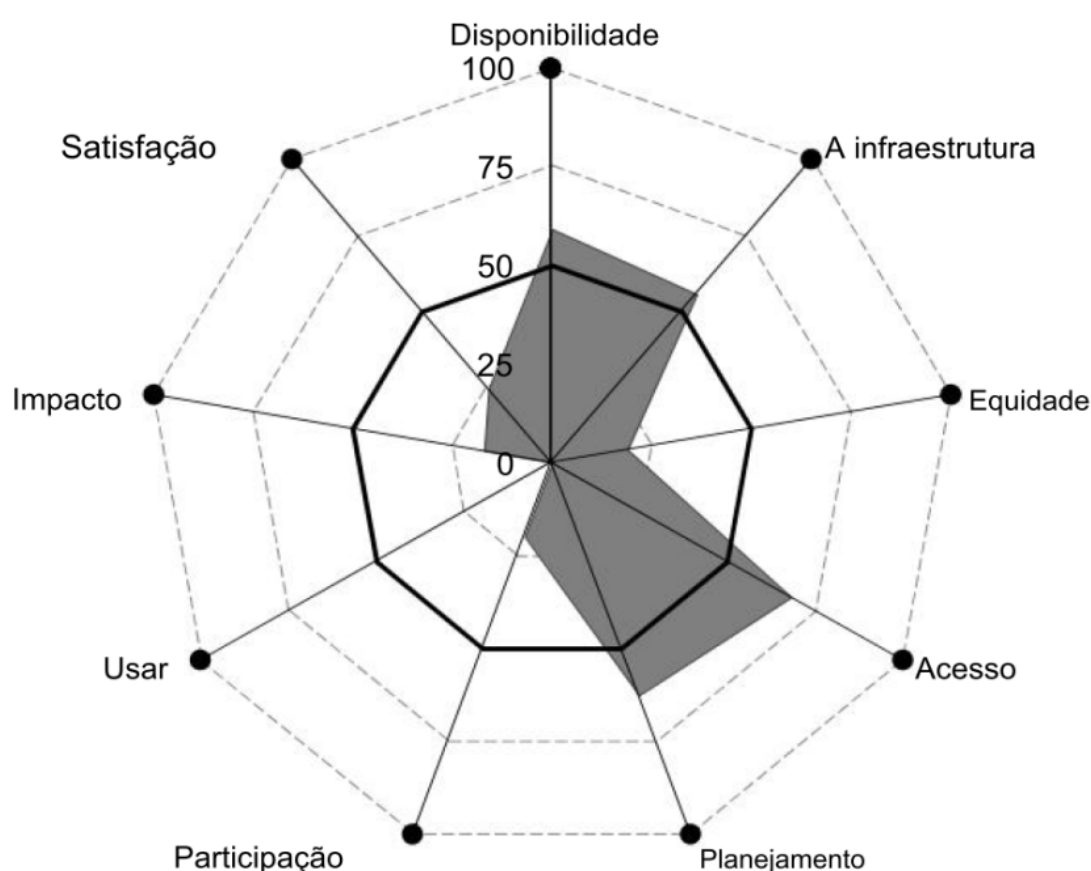


Figura 1. Gráfico de radar para cada um dos descritores do índice de sustentabilidade (Adaptado de IRIBARNEGARAY *et al.*, 2015)

Com o índice de sustentabilidade, é possível avaliar a implementação de ações sustentáveis de maneira específica, analisando o impacto em determinado descritor e/ou de forma geral, considerando a variação do índice de sustentabilidade. Para as empresas de saneamento que desejam implantar novas energias alternativas ou ainda implementar melhorias na eficiência energética, esse índice pode ser uma ferramenta auxiliar na tomada de decisões e no planejamento de metas e prioridades (IRIBARNEGARAY *et al.*, 2015).

Uma grande dificuldade no saneamento básico, principalmente no Brasil, é o atendimento às áreas rurais e locais distantes dos grandes centros. Geralmente, essas regiões não dispõem de recursos para a montagem e manutenção de uma infraestrutura de saneamento, especialmente devido às baixas tarifas de remuneração cobradas e à necessidade de construção de infraestrutura auxiliar, como energia elétrica e tecnologia da informação. Empresas privadas tendem a não assumir o saneamento nessas áreas por conta dessas dificuldades, cabendo aos municípios procurar alternativas para resolver os problemas de saneamento básico. A solução adotada é a concessão do saneamento a uma empresa estatal e a utilização de macrorregiões de atendimento ao saneamento (BARDE, 2017).

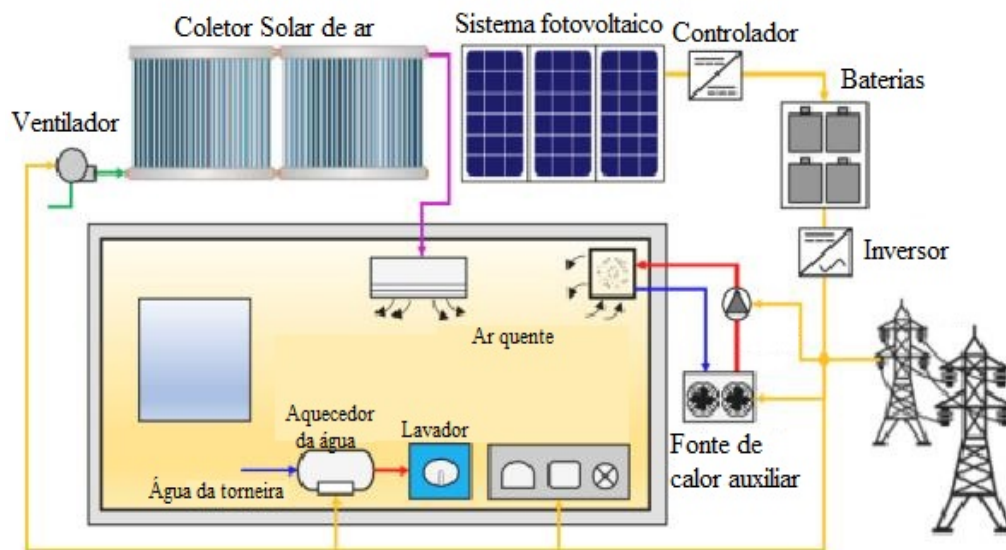
Uma solução para regiões mais distantes dos centros urbanos é a utilização de energia solar. Conforme citado por Lillo *et al.* (2015), os sistemas fotovoltaicos individuais geram eletricidade a partir da radiação solar e são adequados para fornecer serviços elétricos descentralizados para residências ou empresas individuais em áreas remotas. Em locais onde é possível captar água por meio de poços artesianos, o sistema de tratamento da água pode ser alimentado por energia fotovoltaica. Esse sistema de energia alternativa pode abastecer tanto quadros auxiliares de infraestrutura, como iluminação e tomadas, quanto possibilitar um sistema de controle e automação do sistema.

Em Goiás, a solução mais comumente adotada para esses sistemas mais afastados dos centros urbanos é a energia fotovoltaica, que pode ser complementada com geradores a combustão (SANEAGO, 2017).

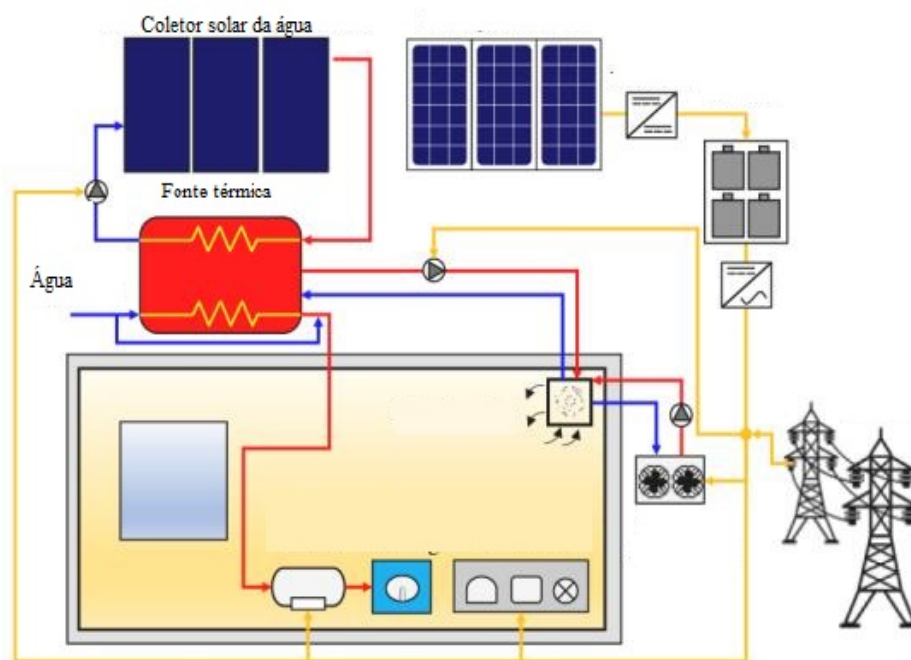
O sistema de suporte de energia dos banheiros sanitários no planalto do Tibete se concentrou em encontrar fontes de energia renováveis locais adequadas para reduzir as emissões, garantindo a confiabilidade e a economia do sistema. É amplamente conhecido que a região apresenta baixa pressão do ar e altos recursos de energia solar local. Com isso, foi possível otimizar os projetos relacionados à utilização de energia solar, tanto para aquecimento quanto para a produção de energia.

Os prédios de saneamento do Tibete foram otimizados e os projetos integrados de forma a melhorar a eficiência nas formas de geração de energia através da luz solar. Até as paredes dos edifícios foram aproveitadas para a obtenção de energia, gerando assim um prédio com grande capacidade de geração. Outro ponto de destaque é a integração da energia fototérmica e fotovoltaica, resultando em um aproveitamento ideal da energia solar. Assim, é realizado o armazenamento térmico em tanques adequados e de energia elétrica com baterias (CHEN *et al.*, 2022). A Figura 2 mostra um dos sistemas em que é feito o aproveitamento de energia fototérmica e fotovoltaica em prédios de saneamento.

Pela Figura 2-a, é possível observar que o aproveitamento da energia fototérmica é realizado com ventiladores que coletam o ar quente do ambiente, sem a necessidade de armazenamento térmico. Já a energia fotovoltaica é captada por placas solares e armazenada em baterias. Na Figura 2-b, o aquecimento é feito por meio de placas com dutos condutores de água, e existe um tanque para armazenamento térmico. Em ambos os sistemas, os prédios de saneamento estão conectados à rede da concessionária.



(a) Sistema com aproveitamento fototérmico, fotovoltaico e baterias.



(b) Sistema com aproveitamento fototérmico, fotovoltaico, baterias e armazenamento térmico.

Figura 2. Um dos sistemas com aquecimento fototérmico e fotovoltaico aplicado ao saneamento no Tibete
(Adaptado de CHEN et. al., 2022)

Alternativas para sistemas de esgotamento sanitário

Em termos de energia alternativa, principalmente na geração de energia elétrica fotovoltaica, as soluções para as estações de tratamento de esgoto são semelhantes às mencionadas nas alternativas para a obtenção de água potável destinada ao abastecimento humano. As principais soluções de energia alternativa para o esgoto estão direcionadas ao tratamento por meio do aproveitamento de energia fototérmica e à utilização dos subprodutos do tratamento para a geração de energia.

Fisher *et al.* (2021) afirmam que as modernas redes de saneamento com descarga são insustentáveis, pois exigem recursos substanciais, principalmente água e energia, para transportar os dejetos humanos para instalações de tratamento centralizadas. Avançar em direção ao saneamento sustentável requer a implementação de tecnologias inovadoras de energia renovável para estabilização e desinfecção de resíduos em escala local ou doméstica, onde são necessários insumos mínimos de água, eletricidade ou produtos químicos. O autor propõe a criação de um banheiro que utilize energia solar para desinfecção, sendo independente de energia elétrica, água ou produtos químicos.

A proposta de um “banheiro solar” não é nova, e um novo protótipo de sistema sanitário denominado “vaso solar” foi projetado e montado por Fisher *et al.* (2021). O banheiro solar é utilizado para desinfetar dejetos humanos utilizando energia solar renovável e, sob certas condições, pode pirolisar os resíduos para formar biocarvão. A Figura 11 ilustra a proposta do banheiro.

Outro grande desafio no tratamento de esgoto é a disposição final do lodo resultante do processo. O lodo de esgoto é um resíduo sólido composto principalmente por água, rico em matéria orgânica e nutrientes, mas também concentrador de microrganismos patogênicos. Seu uso como fertilizante agrícola no Brasil é comum, mas é necessário eliminar ou reduzir significativamente os microrganismos por meio de um processo de higienização, o que pode ser obtido termicamente, exigindo uma fonte de energia para geração de calor.

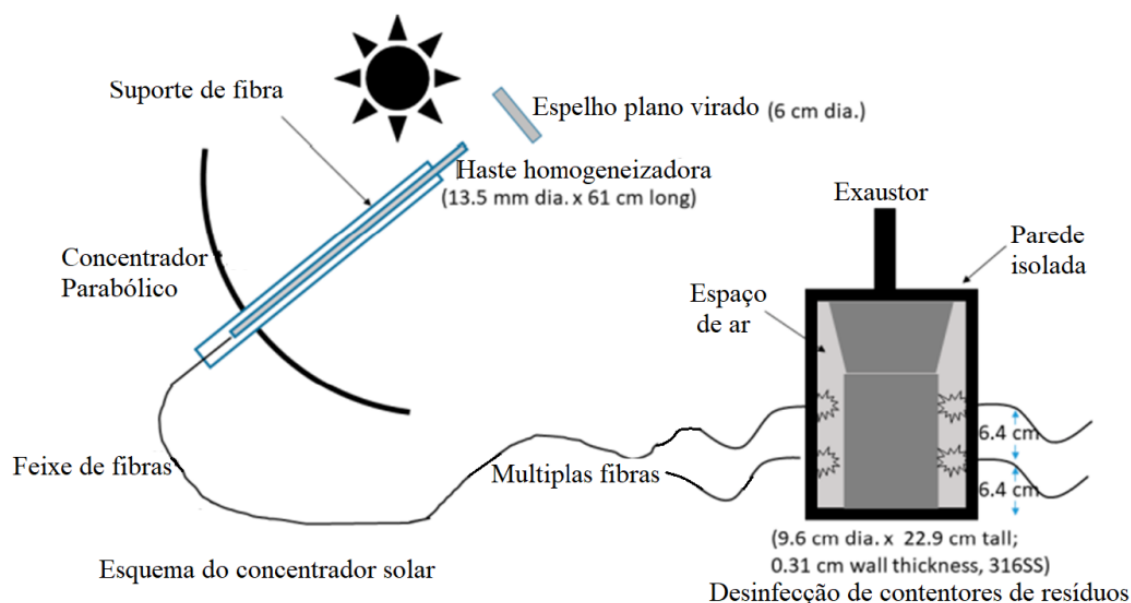


Figura 3. Esquema da desinfecção solar (adaptado de Fisher *et. al.*, 2021)

Nesse sentido, Gontijo *et al.* (2018) propuseram a construção de um sistema piloto constituído por um piso radiante de aço inox, capaz de transferir calor para o lodo de esgoto a partir de serpentinas acopladas na base, por onde circula água aquecida. A energia para esse sistema vem da radiação solar e é complementada pelo biogás proveniente do tratamento anaeróbio do esgoto. O sistema piloto de saneamento e secagem de lodo de esgoto foi construído dentro de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) com reatores anaeróbios, que tratam esgoto doméstico, localizada na cidade de Curitiba-PR.

CONCLUSÕES

Através da pesquisa bibliográfica sistemática, foi possível identificar diversas soluções que aplicam energia renovável e eficiência energética em sistemas de saneamento básico. Embora algumas aplicações dependam de características locais específicas, como radiação solar ou investimento inicial, foram estabelecidas referências de trabalhos que podem ser aplicáveis ao sistema de saneamento do Brasil, especialmente em Goiás.

As soluções apresentadas para sistemas de fornecimento de água potável são viáveis em uma ampla região, permitindo adaptações tanto em grandes centros urbanos quanto em

pequenas comunidades isoladas. O grande destaque recai sobre as soluções que utilizam energia solar, onde, com uma determinada quantidade de recursos, é possível implantar um sistema completo de fornecimento de água potável sem depender da concessionária de energia local ou de excesso de produtos químicos.

Para os sistemas de esgotamento, foram encontradas diversas alternativas que utilizam energias renováveis. As principais aplicações são direcionadas ao aproveitamento da energia fototérmica, que pode ser utilizada em processos que vão desde a desinfecção até a secagem e infraestrutura em geral.

Este artigo possibilitou estabelecer uma ampla gama de opções para a utilização de energias renováveis no saneamento básico no Brasil. As soluções apresentadas são de grande relevância para os sistemas de saneamento, dada sua inclinação favorável ao desenvolvimento sustentável, que é uma das responsabilidades das empresas de saneamento básico. Assim, é possível selecionar as soluções que mais atendem às necessidades da empresa e aplicá-las conforme as características locais.

Como trabalhos futuros, uma possibilidade é o estudo das principais energias renováveis que se mostram mais eficientes no estado de Goiás e que podem ser aplicadas no saneamento. Outra opção é investigar baterias alternativas que possam proporcionar melhor confiabilidade e durabilidade aos sistemas fotovoltaicos em períodos de ausência de luz solar para a geração de energia. Além disso, pode-se estabelecer um estudo sobre os principais gases e rejeitos formados no tratamento de esgoto e sua aplicação como combustível em outras etapas do processo, visando economizar energia de outras fontes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, Qamar; KHAN, Muhammad Tariq Iqbal; KHAN, Muhammad Noraiz Iqbal. What Dynamics between financial development, tourism, sanitation, renewable energy, trade and total reserves in 19 Asia cooperationdialogue members. Elsevier - Journal of Cleaner Production: Paquistão, n. 179, p. 114-131, 2018.

- BARDE, Julia Alexa. What Determines Access to Piped Water in Rural Areas? Evidence from Small-Scale Supply Systems in Rural Brazil. Elsevier - World Development: Alemanha, v. 95, p. 88-110, 2017.
- BORGHI, Adriana Del; STRAZZA, Carlo; GALLO, Michela; MESSINEO, Simona; NASO, Massimiliano. Water supply and sustainability: life cycle assessment of water collection, treatment and distribution service. Springer-Verlag: Berlin, n. 18, p. 1158-1168, 2013.
- CHEN, Yaowen; QUAN, Mengchen; WANG, Dengjia; DU, Hu; HU, Liang; ZHAO, Yiting; GUO, Mengmeng; LIU, Yanfeng. Optimization and comparison of multiple solar energy systems for public sanitation service buildings in Tibet. Elsevier - Energy Conversion and Management: Tibete, n. 267, p. 115847, 2022.
- FILHO, Gil Branco. Custos Em Manutenção. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2020.
- FISHER, Richard P.; et. al.. Solar Thermal Processing to Disinfect Human Waste. MDPI: EUA, n. 13, 2021.
- GONTIJO, Jéssica Cristine et. al.. Sanitation and Drying of Sewage Sludge on Radiant Floors Using Solar Energy and Biogas: Comparison between Different Thicknesses of Deposited Mass. Brazilian Archives of Biology And Technology: Paraná, v. 61, n. e18000037, 2018.
- IRIBARNEGARAY, Martín Alejandro; D'ANDREA, María Laura Gatto; ALVAREZ, María Soledad Rodriguez; HERNÁNDEZ, María Eugenia; BRANNSTROM, Christian; SEGHEZZO, Lucas. From Indicators to Policies: Open Sustainability Assessment in the Water and Sanitation Sector. Sustainability: Argentina, n. 7, p. 14537-14557, 2015.
- LILLO, Pau; MARTÍ, Laia Ferrer; BALDOR, Álvaro Fernández; RAMÍREZ, Benito. A new integral management model and evaluation method to enhance sustainability of renewable energy projects for energy and sanitation services. Elsevier - Energy for Sustainable Development: Espanha, n. 29, 2015.
- MACHADO, Walter Vieira; OTANI, Mario. A Pro-posta De Desenvolvimento De Gestão Da Manutenção Industrial Na Busca Da Excelência Ou Classe Mundial. Revista Gestão Industrial. Ponta Grossa – PR. v.V. 4, p.p. 1-16, 2008.
- SANEAGO. Apresentação Institucional: SANEAGO, 2017. Disponível em: <<http://www.saneago.com.br/2016/arquivos/ApresentacaoInstitucional.pdf>>. Acesso em 03/22.
- SNIS. 24º Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. Brasília, 2020. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em 01/22.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616802>

PERSPECTIVAS DO CENÁRIO DE IMPRESSÃO 3D NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Lucca C. G. de Mateus¹, Daniel F. da Cunha¹

*¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG)
Av. Esperança, s/n, Prédio 5B - Campus Samambaia, 74690-900, Goiânia/Goiás, Brasil
luccamateus@discente.ufg.br, danielcunha@ufg.br*

Resumo. Neste artigo é realizada uma análise bibliométrica sobre a aplicação de impressão 3D na fabricação de componentes mecânicos, com foco em propriedades mecânicas e parâmetros de impressão. Utilizando dados coletados nas bases Scopus e Web of Science, artigos dos últimos 10 anos foram analisados com a ferramenta Bibliometrix no RStudio, com foco nas principais publicações, autores, países e palavras-chave mais relevantes no tema. Os resultados revelaram um crescimento constante nas publicações desde 2016, com aumento anual acima de 50% e participação de mais de 1.000 autores. Os resultados indicam que a revista Polymers lidera em publicações e que a Índia é o país mais ativo, seguido por China e Estados Unidos. O Brasil também demonstra crescimento significativo na área desde 2020. A nuvem de palavras-chave destaca tensile strength como a propriedade mecânica mais estudada, seguida por impact. Os parâmetros de impressão infill, temperature, density, speed e height estão entre os mais abordados. Assim, o presente artigo fornece um panorama das principais tendências e contribui para a identificação de áreas promissoras para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Análise bibliométrica. Impressão 3D. Propriedades Mecânicas. Parâmetros de Impressão.

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, revolucionou a maneira de projetar e fabricar componentes, permitindo a criação de peças complexas com custos significativamente menores do que os métodos de fabricação convencionais (SHIMANO et al., 2018). Dentro desse contexto, a tecnologia de Fused Filament Fabrication (FFF), um tipo específico de impressão 3D por extrusão, se destaca por sua acessibilidade e facilidade de uso. Essa tecnologia utiliza termoplásticos como o PLA (poliácido láctico) para construir objetos a partir da deposição camada por camada, oferecendo um meio eficiente e versátil para a prototipagem rápida e produção em pequena escala (SILVA, 2022).

No processo FFF, uma série de parâmetros de impressão exerce influência direta sobre as propriedades mecânicas das peças fabricadas. Parâmetros como densidade e padrão de preenchimento, orientação da peça, espessura de camada, temperatura de extrusão e velocidade de impressão desempenham papéis críticos na definição da resistência final da peça (PRADO, 2023). A densidade e o padrão de preenchimento, por exemplo, afetam a rigidez e o peso, enquanto a orientação da impressão pode definir a distribuição das tensões mecânicas nas diferentes camadas da peça. A escolha adequada desses parâmetros é essencial para a fabricação de componentes mecânicos robustos e duráveis, tornando-os mais aptos a suportar cargas aplicadas em condições reais de uso (WICKRAMASINGHE et al., 2020).

A resistência mecânica de peças fabricadas por FFF tem sido amplamente estudada, buscando otimizar as configurações de impressão para alcançar o melhor desempenho possível. Ensaio mecânicos, por exemplo, são comumente aplicados para avaliar a integridade estrutural das peças e entender como variáveis de impressão impactam essas propriedades. Ao ajustar os parâmetros de impressão, pesquisadores e engenheiros podem desenvolver peças otimizadas para diversas aplicações, aproveitando ao máximo as capacidades da impressão 3D (GOH et al., 2020).

Para explorar as tendências e contribuições científicas no ramo da manufatura aditiva, este estudo aplica uma análise bibliométrica. A bibliometria é uma técnica quantitativa usada para avaliar e mapear a produção científica em uma área específica, identificando os principais autores, países, instituições e temas emergentes (PIMENTA et al., 2017). Utilizando a ferramenta Bibliometrix no RStudio, a análise bibliométrica possibilita visualizar redes de integração, coautoria e co-ocorrência de palavras-chave, promovendo uma compreensão abrangente do tema e revelando as principais conexões e influências entre trabalhos publicados (ARIA, CUCCURULLO, 2017).

O objetivo deste artigo é revisar e mapear o panorama dos estudos sobre impressão 3D por extrusão relacionados a parâmetros de impressão e propriedades mecânicas, destacando tendências e lacunas na literatura, além de evoluções no campo de estudo, explorando

palavras-chave, revistas mais influentes, países mais ativos e artigos mais relevantes. Os resultados contribuirão para fundamentar futuras pesquisas nesta área, orientando novas investigações, e na melhoria do entendimento do panorama atual no meio científico.

METODOLOGIA

Os dados bibliográficos foram coletados em duas bases de dados científicas amplamente utilizadas nas áreas de engenharia: *Scopus* (ELSEVIER, 2024) e *Web of Science* (CLARIVATE, 2024). As buscas foram realizadas dia 06 de novembro de 2024, utilizando uma expressão booleana que combinava os principais termos relacionados ao tema:

- “("3D printing" OR "additive manufacturing") AND ("FFF" OR "FDM" OR "fused filament fabrication" OR "fused deposition modeling") AND ("PLA" OR "polylactic acid") AND ("mechanical properties" OR "mechanical strength") AND ("printing parameters")”.

A consulta foi limitada às publicações dos últimos 10 anos, ou seja, publicadas entre 2015 e 2024, para garantir a relevância e a atualização dos artigos. O campo utilizado na busca pela base de dados Scopus foi “*Article Title, Abstract, Keywords*”. Já na *Web of Science* foi utilizado o campo “*Topic*”, que também inclui a pesquisa em títulos, resumos e palavras-chave. Além disso, foi feita a exclusão de publicação em capítulos de livro, se limitando a artigos publicados em periódicos e em conferências.

A exportação dos dados foi realizada em arquivos “.bib”, utilizando o formato BibTeX. O processamento inicial desses dados foi feito utilizando o software *RStudio* versão 2024.09.0 (POSIT, 2024), onde um código de comandos permitiu a organização dos arquivos. O RStudio é uma ferramenta de desenvolvimento integrada para R. Nesta etapa de tratamento de dados, foram removidos os artigos duplicados, resultando na quantidade de artigos expressa na Tab. 1. A etapa seguinte envolveu a análise bibliométrica, executada através da interface web interativa “biblioshiny”, uma ferramenta desenvolvida pela comunidade “*Bibliometrix*” usando a linguagem R.

Tabela 1. Quantidade de artigos obtidos em cada banco de dados. (autoria própria)

Banco de dados	Número de artigos
Scopus	186
Web of Science	205
Total sem duplicatas	268

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A plataforma *Biblioshiny* presente na ferramenta *Bibliometrix* permite a visualização gráfica do comportamento de diversas informações a respeito dos artigos coletados. Na Fig. 1 é apresentada uma visão geral dos principais dados obtidos, sendo possível observar que o artigo mais antigo coletado é de 2016, com um total de 136 revistas diferentes e 268 documentos. É possível observar também que a área pesquisada está em constante crescimento anual, crescendo acima de 50% ao ano o número de publicações, com a participação de mais de 1000 autores neste período.

Na Tab. 2 são listadas as revistas mais relevantes em termos de quantidade de publicações nesta base de dados. Com 22 artigos publicados, a revista *Polymers* lidera o ranking, seguido pela revista *Progress in Additive Manufacturing*, ambas revistas de qualis A2 de acordo com a classificação de periódicos quadriênio 2017-2020 mais recente feita pela CAPES na Plataforma Sucupira (CAPES, 2024). Conhecer as revistas mais relevantes é importante para o autor se orientar a respeito das melhores opções de submissão de artigos, que darão maior visibilidade e reconhecimento ao seu trabalho.



Figura 1. Visão geral dos principais dados obtidos (adaptada pelos autores, 2024).

Tabela 2. Revistas mais relevantes em número de publicações (adaptada pelos autores, 2024).

Revista	Publicações
Polymers	22
Progress in Additive Manufacturing	16
Rapid Prototyping Journal	12
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	11
AIP Conference Proceedings	6
Materials Today: Proceedings	6
Annals of DAAAM and Proceedings of The International DAAAM Symposium	5
Journal of Materials Engineering and Performance	5
Journal of Physics: Conference Series	5
Materials	5

Conhecer os documentos mais cientificamente relevantes de determinada área é fundamental para a escolha de citações em uma revisão bibliográfica de qualidade, para que se tenha uma base robusta de referências. Na Tab. 3 são listados os artigos mais citados dentre os coletados. Com 506 citações, Wickramasinghe (2020) com o artigo *FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments* lidera o ranking. Trata-se de um artigo de revisão, ou seja, um artigo essencial como referência para trabalhos futuros na área, além dos demais artigos da lista.

Tabela 3. Lista de artigos mais citados (adaptada pelos autores, 2024).

Artigo	Número de citações
Wickramasinghe et al. (2020)	506
Le Duigou et al. (2016)	344
Abeykoon et al. (2020)	308
Goh et al. (2020)	266
Wang et al. (2021)	193
Hsueh et al. (2021)	136
Gordelier et al. (2019)	108
Balani et al. (2019)	106
Dou et al. (2020)	105
El Magri et al. (2020)	96

Já a respeito da distribuição mundial de publicações entre os países expressa na Tab. 4, a Índia lidera com um total de 94 publicações, seguida pela China e Estados Unidos. Cabe destacar a posição do Brasil nesta lista, sendo o 7º país que mais publicou artigos sobre o tema no mundo neste período. Conhecer os países mais ativos em determinada área de pesquisa é importante para buscar as melhores opções de colaboração com autores estrangeiros, o que adiciona relevância ao trabalho do pesquisador brasileiro na óptica internacional.

Tabela 4. Lista de países com maior produção científica (adaptada pelos autores, 2024).

País	Número de artigos
Índia	97
China	94
Estados Unidos	38
Malásia	37
França	28
Espanha	28
Brasil	24
Paquistão	23
Reino Unido	22
Austrália	20

A partir da Fig. 2, observa-se que a Índia apresenta as principais conexões internacionais de publicação, estando conectada com a grande maioria dos países, ao centro da rede de conexões. Por outro lado, o Brasil apresenta colaboração apenas com a Argentina e a Alemanha, praticamente isolado na rede. Com isso, evidencia-se que buscar conexões com os países citados anteriormente, principalmente Índia e China, se mostra uma opção interessante para trabalhos futuros na área, a fim de aumentar a participação do país no cenário internacional.

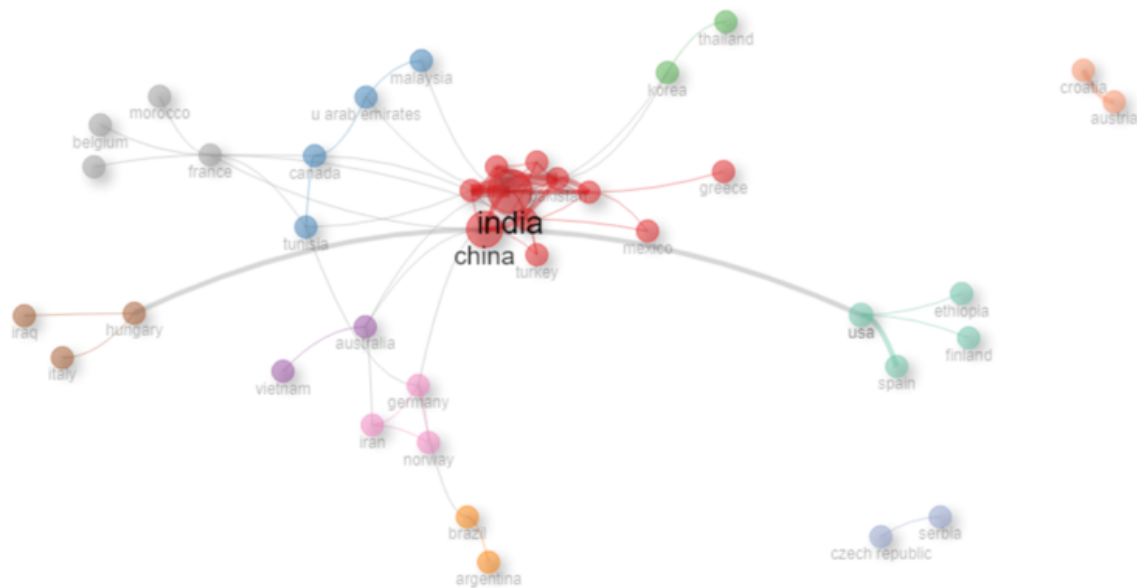


Figura 2. Rede de colaboração entre países (adaptada pelos autores, 2024).

Pela Fig. 3, é possível observar que o Brasil começou a publicar artigos presentes nesta análise apenas no ano de 2020, porém de forma crescente até o ano de 2024, onde já conseguiu se situar entre os países que mais publicam no mundo, na sétima colocação. Esse é um cenário extremamente animador para pesquisadores deste tema, já que se trata de uma área recente que tem se tornado destaque no meio científico do país nos últimos 5 anos e ainda está em crescimento, com diversas oportunidades a serem ainda exploradas.

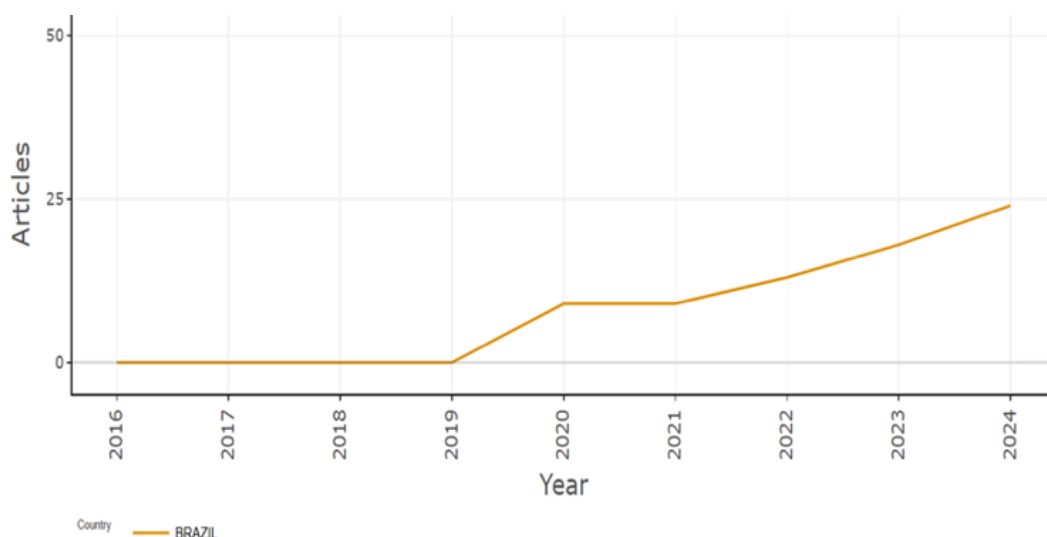
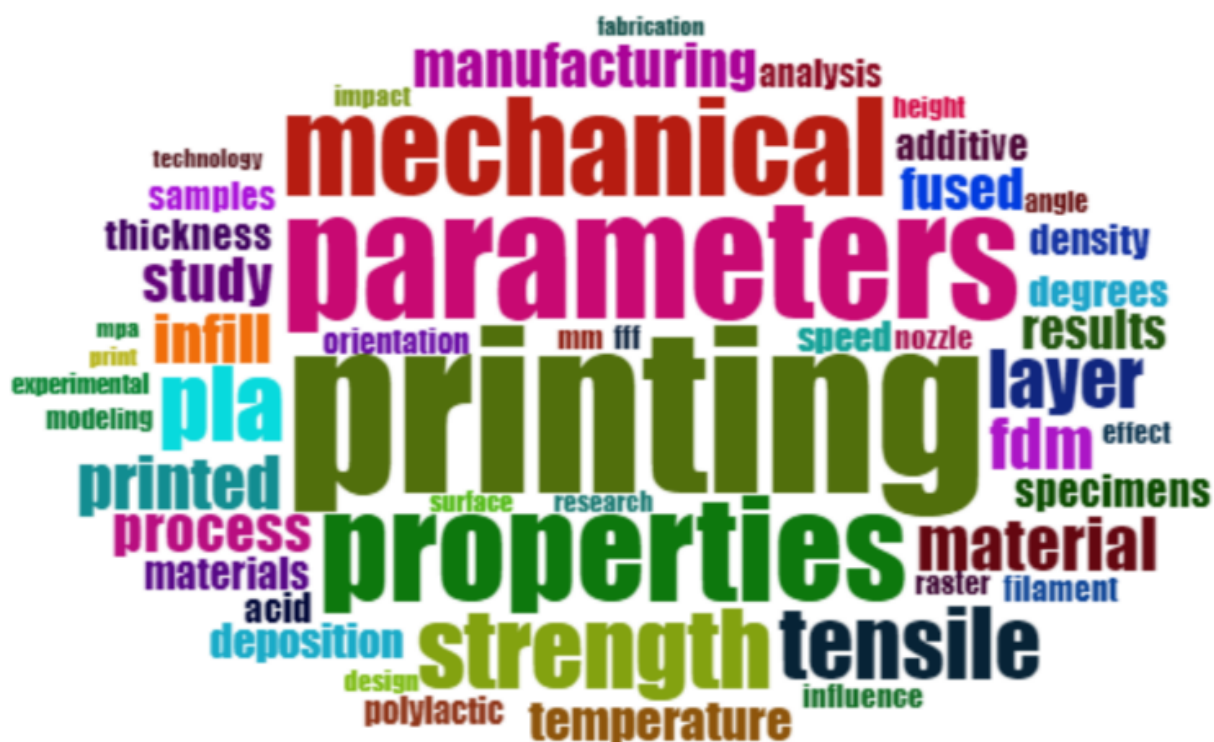


Figura 3. Produção científica anual do Brasil (adaptada pelos autores, 2024).



Além das palavras-chave principais ao centro, é possível observar a presença de termos como “*tensile*”, o que sugere a grande presença de estudos explorando a resistência à tração de peças como caracterização do comportamento mecânico, mostrando que provavelmente é o principal parâmetro de resistência estudado pelos artigos. Além disso, em menor tamanho, aparece a palavra “*impact*”, sugerindo outro parâmetro de estudo de resistência das peças, a partir de ensaios de impacto, porém em menor quantidade se comparado aos estudos explorando a resistência à tração. Nesse sentido, é possível inferir que essas duas propriedades mecânicas são essenciais a serem caracterizadas em trabalhos futuros que explorem a resistência mecânica de peças fabricadas por impressão 3D.

Observa-se também as palavras “*layer*”, “*material*” “*infill*”, “*temperature*”, “*thickness*”, “*density*”, “*speed*”, “*orientation*”, e “*height*”, termos que estão relacionados a parâmetros de fabricação por impressão 3D. A presença destes termos indica que estes são os parâmetros mais estudados pelos autores neste banco de dados, nesta ordem. Com esta informação, é possível encontrar lacunas de pesquisa, ou seja, que utilizem por exemplo outros parâmetros de impressão não presentes na nuvem de palavras, ou mesmo o uso de materiais mais sofisticados além do tradicional PLA. Além disso, esse resultado mostra a grande quantidade de parâmetros já explorados nos últimos 10 anos, o que denota uma base de dados robusta como bibliografia, o que é essencial como ponto de partida para futuros trabalhos.

CONCLUSÕES

A análise bibliométrica realizada revelou um aumento expressivo nas publicações sobre impressão 3D com ênfase em propriedades mecânicas e parâmetros de impressão, demonstrando o crescente interesse nessa área desde 2016. Com um crescimento anual superior a 50%, a área tem atraído colaborações internacionais, com destaque para a Índia, que lidera tanto em número de publicações quanto em redes de colaboração global, seguida por países como China, Estados Unidos e Brasil, este último mostrando uma participação crescente desde 2020, consolidando-se entre os principais países em produção científica sobre o tema.

As revistas *Polymers* e *Progress in Additive Manufacturing* lideram em número de publicações, fornecendo uma base sólida para futuras submissões e consultas, sendo veículos importantes para busca de trabalhos. A resistência à tração foi identificada como a propriedade mecânica mais citada, seguido pela resistência ao impacto, sendo assim dois parâmetros essenciais para testes de desempenho em trabalhos futuros. Entre os parâmetros de impressão, *infill*, *temperature*, *density*, *speed* e *height* mostraram-se predominantes na literatura, revelando uma concentração de estudos nesses fatores. Estudos com novos materiais também representam um potencial oportunidade significativa para expandir as aplicações da impressão 3D.

Dessa forma, este estudo contribui para a compreensão das tendências e lacunas na pesquisa sobre impressão 3D de peças mecânicas, indicando áreas promissoras para futuras investigações, especialmente em parâmetros menos abordados, além de possíveis redes de colaboração internacionais.

Agradecimentos. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, por proporcionar um espaço de desenvolvimento pessoal e profissional. Além disso, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento dos estudos pela bolsa 132665/2024-7.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEYKOON, C. et al. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, v. 3, n. 3, p. 284–297, 2020.
- ARIA, M., CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis, *Journal of Informetrics*, 11(4), pp 959-975, Elsevier, 2017.
- BALANI, S. et al. Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid. *Additive Manufacturing*, v. 25, p. 112–121, 2019.
- CAPES. Qualis Periódicos. Disponível em: <sucupira.capes.gov.br/qualis-periodico>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- CLARIVATE. Web of Science. Disponível em: <<https://www.webofscience.com>>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- DOU, H. et al. Effect of process parameters on tensile mechanical properties of 3D printing continuous carbon fiber-reinforced PLA composites. *Materials*, v. 13, n. 17, p. 3850, 2020.
- EL MAGRI, A. et al. Optimization of printing parameters for improvement of mechanical and thermal performances of 3D printed poly(ether ether ketone) parts. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 137, e49087, 2020.
- ELSEVIER. Scopus. Disponível em: <<https://www.scopus.com/>>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- GOH, G. D. et al. Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, v. 45, n. 2, p. 113–133, 2020.
- GORDELIER, T. et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: A state-of-the-art review. *Rapid Prototyping Journal*, v. 25, n. 6, p. 1060–1070, 2019.
- HSUEH, M. H. et al. Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling. *Polymers*, v. 13, n. 11, p. 1758, 2021.

- LE DUGOU, A. et al. 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. *Materials & Design*, v. 96, p. 106–114, 2016.
- PIMENTA, A. et al. A bibliometria nas pesquisas acadêmicas. *SCIENTIA: Revista de ensino, pesquisa e extensão*, Faculdade Luciano Feijão, v. 4, n. 7, 2017.
- POSIT. RStudio IDE. Disponível em: <<https://posit.co/products/open-source/rstudio/>>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- PRADO, T. M. Avaliação de resistência mecânica e análise de forma geométrica de elementos de fixação por rosca fabricados através de manufatura aditiva. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.
- SHIMANO, M. M., et al. Influência do percentual de preenchimento no comportamento mecânico de peças em PLA e ABS obtidas por Impressão 3D por extrusão. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, v. 3, n. 2, p. 178-190, 2018.
- SILVA, F. Desenvolvimento de uma impressora 3D do tipo FFF com sistema multimaterial e multiferramenta. 53f. Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) - Instituto de Ciências e Tecnologias Exatas, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2022.
- WANG, P. et al. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 34, n. 9, p. 236–246, 2021.
- WICKRAMASINGHE, S. et al. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, v. 12, n. 7, p. 1529, 2020.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616809>

ANÁLISE MODAL DE MODELOS EM ESCALA DE TURBINAS EÓLICAS

Pedro H. D. Morais¹, Marlipe G. Fagundes Neto¹, Sigeo Kitatani Junior¹

*¹Laboratório de Mecânica Aplicada (LabMEC) – Universidade Federal de Goiás
Campus Samambaia, 74045-155, Goiânia/Goiás, Brasil
debs@discente.ufg.br, marlipe@ufg.br, sigojr@ufg.br*

Resumo. Este trabalho investiga a análise modal em modelos em escala de turbinas eólicas, utilizando simulação por elementos finitos para replicar comportamentos dinâmicos típicos dessas estruturas. A metodologia foca na modelagem de uma torre de turbina NREL 5 MW no software ANSYS APDL, aplicando elementos de viga e massas concentradas para adquirir frequências naturais e modos de vibração. Realizaram-se testes com materiais como aço e alumínio de uso comercial, ajustando condições de contorno e incrementando massa conforme necessário para ajustar os parâmetros dinâmicos. Os resultados mostraram que a substituição de materiais pode reduzir significativamente as cargas, viabilizando testes experimentais em túneis de vento, por conta das limitações seções de teste no modelo de túnel AA-TVSH1c. Esses dados oferecem uma base para avaliações práticas e estratégias de controle de vibrações em turbinas eólicas.

Palavras-chave: Análise modal. Modelos em escala. Turbinas eólicas. Elementos finitos. ANSYS APDL.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de modelos em escala para a análise modal de turbinas eólicas destaca-se como um campo de estudo essencial no âmbito da engenharia estrutural dinâmica, especialmente devido à crescente demanda por simulações que reproduzam as condições operacionais das turbinas em cenários controlados. Esse estudo é motivado pela necessidade de obter modelos que possam capturar os comportamentos dinâmicos complexos de turbinas eólicas, onde são submetidas a cargas de vento extremas e condições ambientais adversas (McCann et al., 2022; Garcia et al., 2023). As pesquisas anteriores enfatizavam a importância dos métodos de controle de vibração e de modelagem estrutural das turbinas em operação (Li et al., 2020; Zhao et al., 2021). No entanto, a limitação de conhecimento na replicação precisa

desses comportamentos modais, particularmente em simulações em escala, impulsionou a investigação ao demonstrar a necessidade de métodos experimentais que transitem de maneira eficaz para testes práticos, como os realizados em túneis de vento.

O objetivo é utilizar o ANSYS em conjunto com MEF para estudar a configuração e as dimensões do modelo em escala da turbina, que posteriormente será simulado e experimentado no túnel de vento. O modelo do túnel de vento AA-TVSH1c, com seção de ensaio de 462 x 462 mm, serve de base para essas simulações. Comparando essa dimensão com a altura de uma turbina de 5 MW, é evidente a diferença significativa de escala, o que realça a complexidade em replicar fielmente os efeitos aerodinâmicos e as respostas estruturais.

Esses modelos de simulação, usualmente construídos com materiais de fácil acesso, como aço e alumínio, e utilizando técnicas de análise por elementos finitos, têm como objetivo avaliar preliminarmente as respostas dinâmicas em ambientes menos robustos. Tal abordagem facilita a replicação precisa de frequências naturais e modos de vibração das turbinas eólicas, permitindo um entendimento aprofundado dos comportamentos estruturais e aumentando a confiabilidade dos projetos em escala industrial. A adoção de parâmetros ajustáveis e condições de contorno simplificadas permite que esses modelos proporcionem um suporte essencial no desenvolvimento de soluções mais robustas e escaláveis para o setor eólico (Fischer et al., 2021; Huang & Wang, 2022).

METODOLOGIA

Para a execução das simulações, utilizou-se o software ANSYS APDL Student com o objetivo de modelar e analisar o comportamento dinâmico de vigas, de forma a aproximar as características de um modelo em escala de uma turbina eólica. O estudo tem como referência a turbina eólica NREL 5 MW, cujas propriedades estruturais são utilizadas como parâmetros base para a modelagem e análise. A escolha da NREL 5 MW se justifica pela ampla aceitação de suas especificações e comportamento estrutural em pesquisas de turbinas offshore, como destacado em trabalhos que exploram a aplicação de amortecedores de massa sintonizados

para controle de vibrações em estruturas esbeltas e de grande porte (COLHERINHAS et al., 2021; CAO et al., 2020).

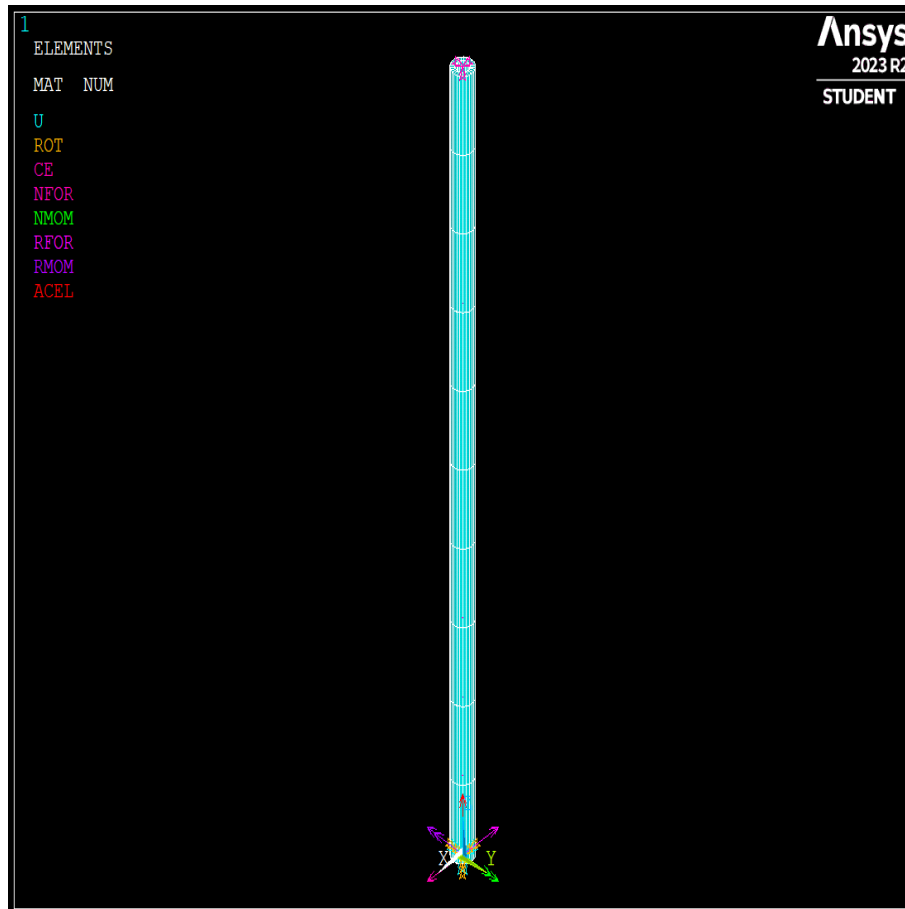
A construção do modelo de simulação foi fundamentada na validação por meio de referências publicadas, o que permitiu obter resultados próximos aos da literatura (CAO et al., 2019; GHASSEMPOUR; FAILLA; ARENA, 2019; COLHERINHAS et al., 2021), além de desenvolver um código em *ANSYS APDL* parametrizado aos ajustes nos parâmetros de entrada conforme a especificidade do modelo.

Tabela 1. Propriedades da turbina eólica analisada

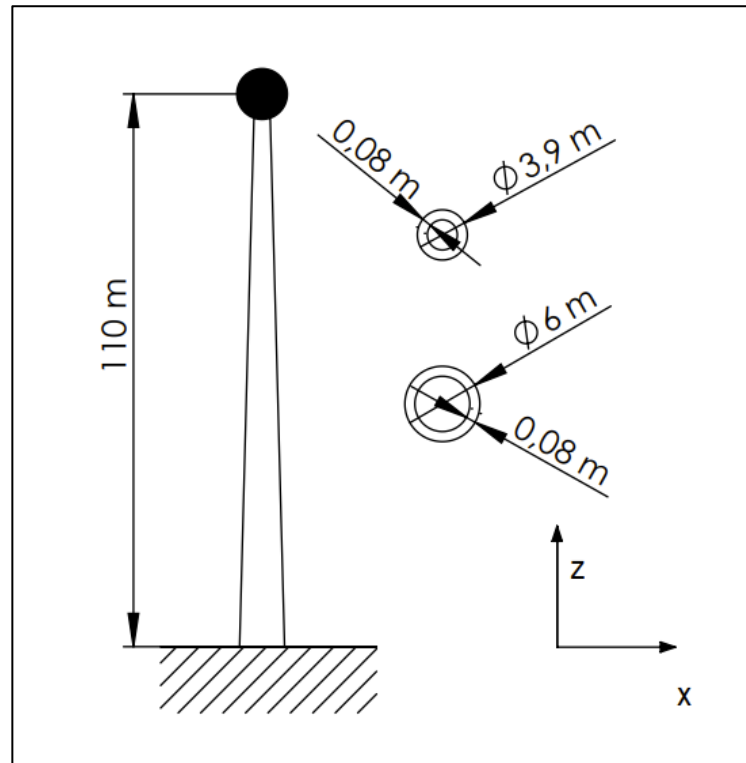
NREL 5 MW	
Classificação	5 MW
Rotor, Diâmetro do cubo	126,0 m, 3,0 m
Altura da Torre	110,0 m
Diâmetro do Topo	3,9 m
Diâmetro da Base	6,0 m
Espessura da Torre	0,08 m
Módulo de Elasticidade	$2,1 \times 10^{11}$ Pa
Poisson	0,3
Densidade do Aço	8500 kg/m ³
Massa do Rotor	110.000 kg
Massa da Nacelle	240.000 kg
Massa da Torre	347.460 kg

O código *ANSYS APDL* foi projetado para configurar a modelagem de uma torre de turbina eólica como uma viga cônica, conforme a Figura 1, com variação do diâmetro ao longo de seu comprimento, replicando as propriedades estruturais da turbina de referência NREL 5 MW. Inicialmente, são definidos os parâmetros geométricos e materiais, incluindo o módulo de elasticidade, densidade e coeficiente de Poisson. A estrutura é modelada utilizando elementos do tipo BEAM188, que representam a viga, e elementos MASS21, para a massa concentrada no topo, correspondente à nacelle. A geração da malha ocorre com 10 divisões ao longo da torre, garantindo o refinamento adequado para a análise. As condições de contorno

são aplicadas com uma fixação na base para simular uma estrutura engastada, além da aplicação da gravidade no conjunto. A análise estática permite a determinação da distribuição de tensões e deformações sob a ação da gravidade, enquanto a análise modal calcula as frequências naturais e os primeiros modos de vibração, empregando um solucionador de equações esparsas. Finalmente, no pós-processamento, são listados os modos de vibração e as frequências naturais, fornecendo uma compreensão detalhada da resposta estrutural da torre.



(a)



(b)

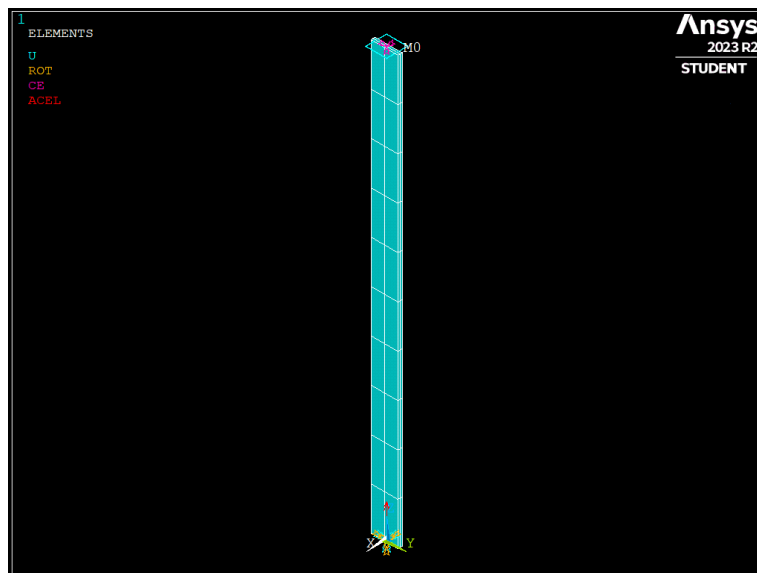
Figura 4. Modelo de réplica de resultados conforme referências utilizadas.

Após a construção do modelo de validação, foram desenvolvidos novos modelos de análise modal em escala, utilizando materiais convencionais e viáveis para futuras validações experimentais em ambientes de teste menos robustos. Esses modelos consistem em vigas fabricadas em aço e alumínio, conforme Tabela 2, ambos materiais de uso comercial, facilitando a replicabilidade e a aplicação dos resultados em condições controladas.

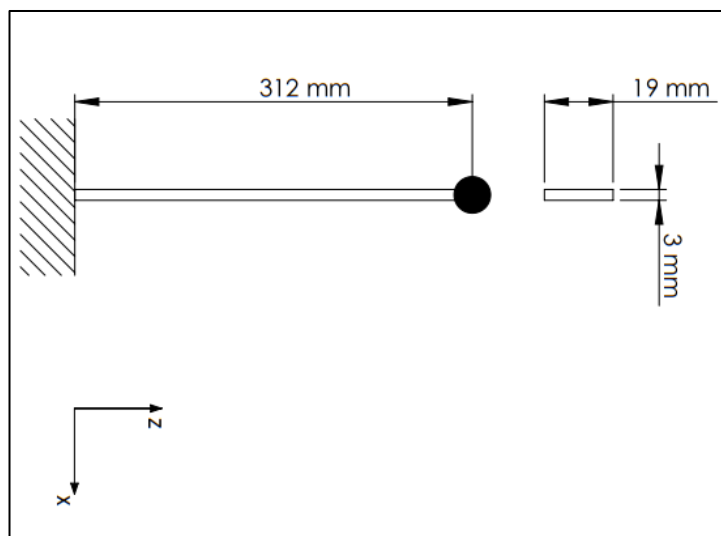
Tabela 2. Propriedades dos materiais vigas comerciais.

	Aço	Alumínio
Módulo de Elasticidade	$2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$	$6,9 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$
Poisson	0,30	0,33
Comprimento	312 mm	312 mm
Seção Transversal	3/4"x1/8 "	3/4"x1/8 "
Densidade	8500 kg/m ³	2700 kg/m ³

A Figura 2, apresentada a seguir, ilustra os modelos de viga desenvolvidos para simulações em escala reduzida, com o objetivo de avaliar a resposta modal sob diferentes condições materiais.



(a)



(b)

Figura 5. Modelo de viga utilizado para simulação de escala reduzida.

DESENVOLVIMENTO

Após a construção do modelo e obtenção dos resultados da simulação por elementos finitos, apresentados na Figura 1 como réplica dos modelos referenciais, procede-se à comparação dos resultados dos dois primeiros modos de vibração com os trabalhos de Colherinhas et al. (2021), Cao et al. (2019) e Ghassempour (2019), Figura 3. Essa comparação visa verificar a sensibilidade do modelo em relação aos valores de referência, permitindo a análise das variações modais. Com base nessa validação, realiza-se a redução de escala e ajuste dos parâmetros geométricos do modelo, conforme ilustrado na Figura 2, assegurando que as características essenciais do comportamento dinâmico sejam mantidas mesmo em configurações reduzidas.

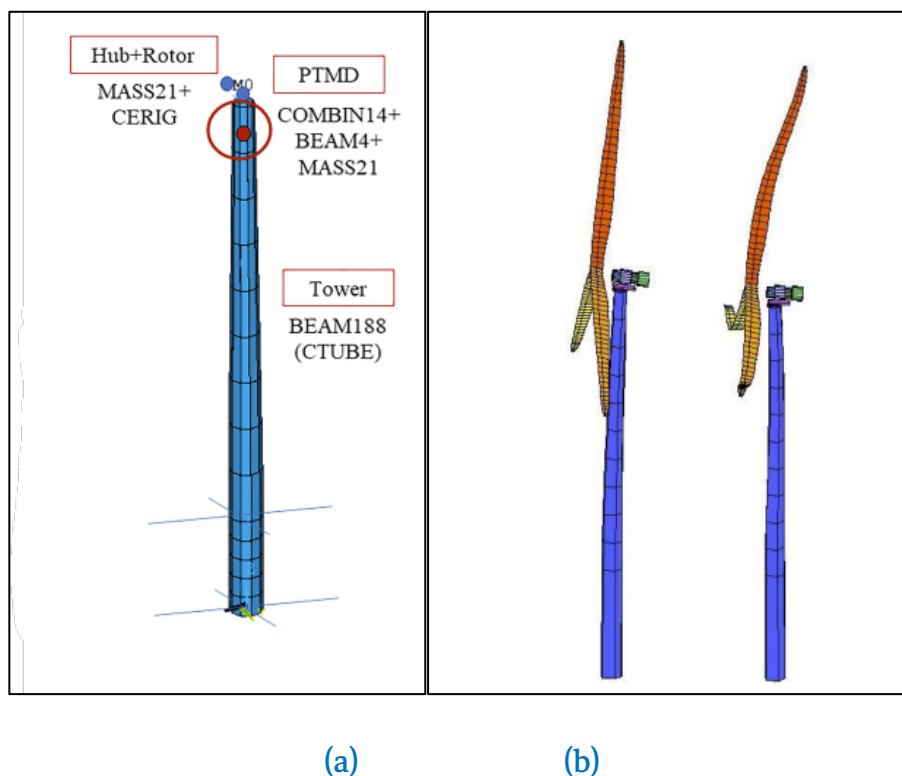




Figura 6. Modelos de referência de análise sobre a turbina eólica NREL 5 MW, (a) COLHERINHAS et al. (b) GHASSEMPOUR e (c) FAILLA; ARENA. Adaptado (CAO et al., 2019; GHASSEMPOUR; FAILLA; ARENA, 2019; COLHERINHAS et al., 2021)

A análise da Tabela 3 revela uma variação nos resultados que pode ser atribuída a certas hipóteses simplificadoras adotadas neste estudo. Por exemplo, nos trabalhos de Colherinhas et al. (2021) e Ghassempour (2019), que enfocam turbinas offshore, os efeitos dinâmicos são influenciados na condição rigidez equivalente que representam o solo e o mar, o que impacta diretamente a resposta estrutural. A fixação, entretanto, que está presente no modelo examinado, é da forma de engastamento, que possui rigidez infinita, justificando, portanto, as discrepâncias observadas entre os resultados.

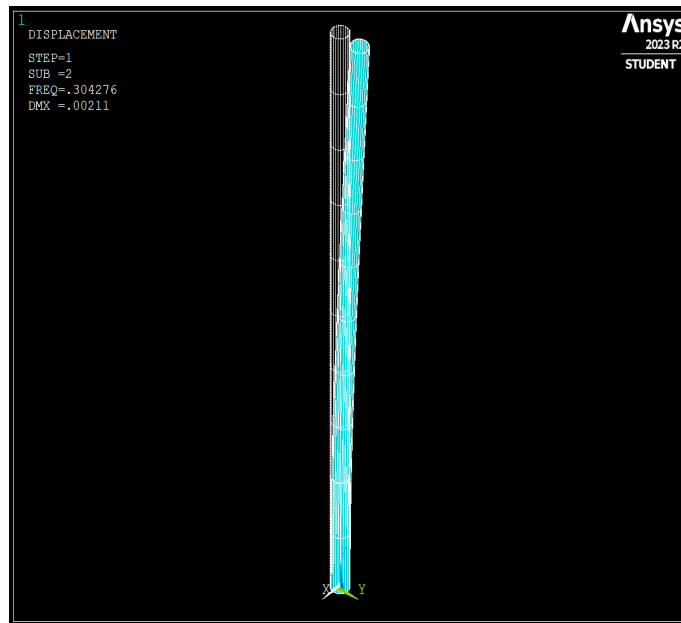
Tabela 3. Comparação de frequências naturais.

	Modelo Colherinhas et al	Modelo Ghassempour's	Presente Modelo	Modelo Cao et al
Primeiro Modo [Hz]	0,2741	0,2752	0,3042	0,3200
Segundo Modo [Hz]	2,2783	2,2651	1,9504	-

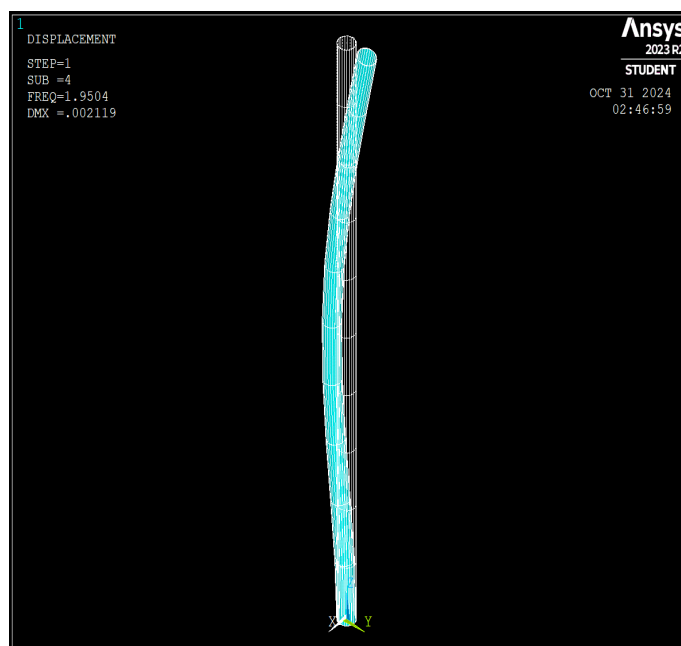
Dessa forma, após a análise de turbinas eólicas, identificou-se a necessidade de aplicar o fator de escala, uma alternativa viável para avaliar a resposta estrutural e o comportamento dinâmico dessas estruturas em ambientes controlados, como em testes realizados em túnel de vento (Bhattacharya et al., 2013; Jonkman et al., 2009). Os modelos em escala reduzida replicam as características essenciais das turbinas de forma mais acessível, porém demandam simplificações para que os experimentos sejam realizáveis. Entre as hipóteses simplificadoras frequentemente adotadas, inclui-se a eliminação de interações fluido-estruturais complexas e dos efeitos de cargas de ondas e ventos irregulares, comuns em cenários offshore reais (Jonkman, 2007; Zwick et al., 2015). Essas simplificações reduzem a complexidade do modelo e ainda fornecem respostas compatíveis com o comportamento em escala real. Para este estudo, foram empregadas barras chatas de aço e alumínio para simplificar a estrutura, variando-se o material a fim de testar o conjunto e identificar, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), as massas necessárias para avaliar os padrões de frequências naturais, conforme as referências mencionadas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta os deslocamentos correspondentes ao primeiro e segundo modos de vibração, obtidos por meio da aplicação do MEF, conforme o modelo da Figura 1. Esses resultados ilustram a distribuição espacial dos deslocamentos modais, evidenciando as configurações de deformação associadas a cada frequência natural analisada.



(a)



(b)

Figura 7. (a) Primeiro modo de vibração, ($f_n = 0,3042 \text{ Hz}$), (b) Segundo modo de vibração, ($f_n = 1,9504 \text{ Hz}$).

Inicialmente, foi analisada a viabilidade de um fator de escala de 1:220 para o modelo representado na Figura 1. Observou-se que a configuração com massa concentrada e seção transversal original apresenta limitações para análises experimentais futuras em ambientes controlados, como em túnel de vento, uma vez que a estrutura não suportaria adequadamente a carga da massa concentrada e que a manufatura da seção transversal proposta para a turbina apresenta dificuldades práticas. Como hipóteses simplificadoras, foram selecionadas barras chatas como objeto de estudo, com variação de material entre aço e alumínio. Essa escolha permite, por meio de simulações, explorar alternativas viáveis para testes experimentais que possam ser realizados no túnel de vento do laboratório da UFG, garantindo a viabilidade física do modelo simplificado e a robustez dos dados para análises comparativas.

Para a simulação das barras chatas, foram determinadas etapas de aplicação incremental de carga com o objetivo de identificar o valor de peso necessário para alcançar a frequência natural apresentada na Tabela 3. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o material em aço, destacando a correspondência entre a carga aplicada e os valores de frequência natural, o que valida o modelo simulado em relação ao comportamento esperado.

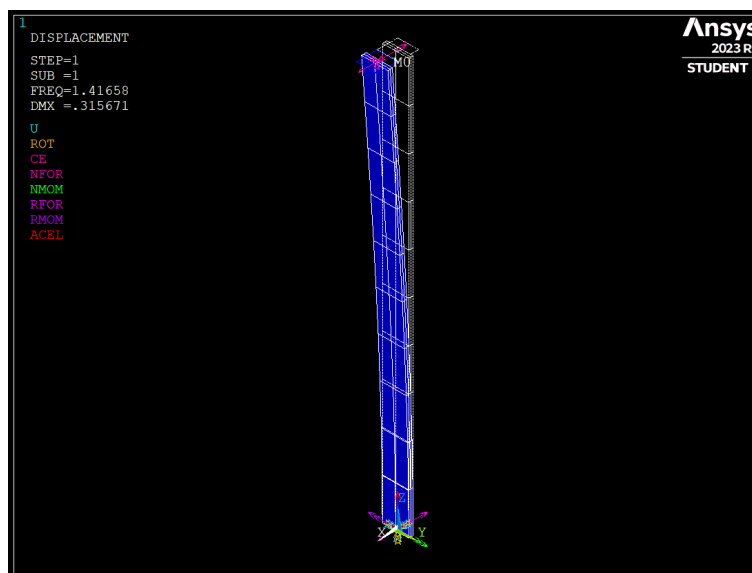


Figura 8. Resultado viga de aço, carga de 10kg.

Observa-se que, ao utilizar uma massa concentrada de 10 kg na barra chata de aço, foi obtida uma frequência natural de 1,4166 Hz, resultando em uma variação significativa em relação à frequência de referência adotada. No entanto, as simulações indicam que o aumento gradual da massa concentrada permite alcançar resultados mais consistentes e próximos ao comportamento esperado. Esse ajuste progressivo demonstrou uma melhora na precisão dos valores obtidos, como ilustrado na Figura 6.

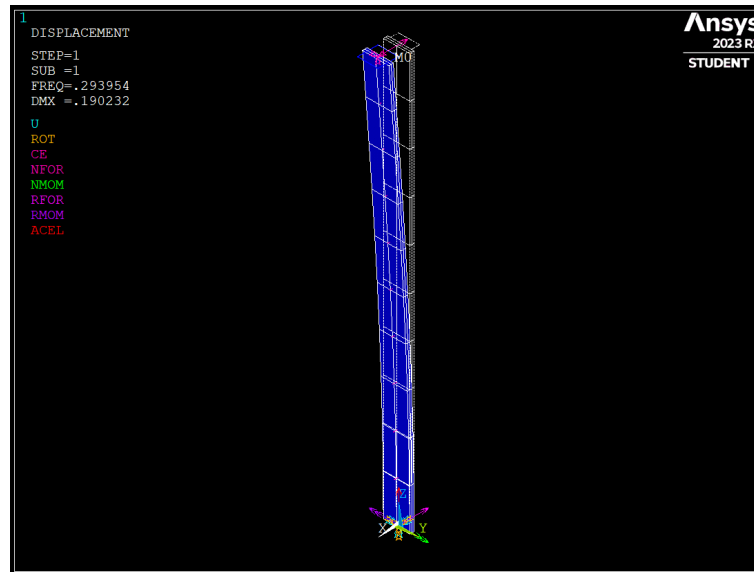


Figura 9. Resultado viga de aço, carga de 27,6 kg.

Para alcançar um parâmetro próximo ao valor de referência, identificou-se que é necessário utilizar uma massa concentrada de 27,6 kg na viga de aço, o que resulta em uma frequência natural de 0,2940 Hz, conforme apresentado na Figura 6. No entanto, uma massa dessa magnitude inviabiliza a execução de testes experimentais em túnel de vento, limitando sua aplicabilidade prática. Essa restrição direciona a análise para testes com vigas de alumínio, onde as propriedades do material são ajustadas para tornar viáveis os experimentos, conforme ilustrado na Figura 7.

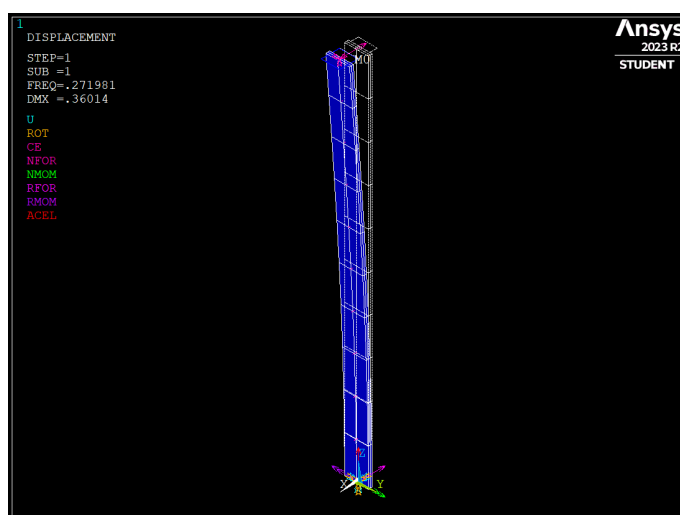


Figura 10. Resultado viga de alumínio, carga de 7,7 kg.

Ao empregar a viga de alumínio, observa-se uma redução substancial na carga necessária em comparação à viga de aço, como mostrado na Figura 7, para se alcançar uma frequência natural de 0,2720 Hz. Esse ajuste representa uma diminuição de mais de três vezes e meia na massa em relação à configuração com a viga de aço, favorecendo significativamente a realização de testes experimentais. Essa redução possibilita a adaptação do modelo para experimentos práticos em ambientes controlados, especialmente em contextos de túnel de vento, onde a menor carga torna o ensaio mais viável e representativo.

CONCLUSÕES

O estudo realizado demonstrou o sucesso do uso de modelos em escala reduzida para a análise modal de turbinas eólicas, empregando vigas de aço e alumínio para simulações dinâmicas em ambientes controlados. A validação dos resultados, obtidos através de métodos de elementos finitos, mostrou que a adoção de materiais comerciais, como o alumínio, possibilita uma redução substancial na massa concentrada necessária, viabilizando a execução de experimentos em túneis de vento sem comprometer a integridade do modelo. A análise comparativa com referências indicou que os valores de frequência natural do modelo em

alumínio se aproximam adequadamente dos parâmetros de referência, apresentando-se como uma alternativa experimental prática para estudos futuros.

Agradecimentos. O presente trabalho foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Universidade Federal de Goiás (UFG), Eletrobras “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D)” e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) através de concessão de bolsa de estudo de Mestrado e aquisição de materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BHATTACHARYA, S.; et al. Foundations for offshore wind turbines. *Wind Energy*, v. 16, p. 123–139, 2013.
- CAO, Qian-Ying; et al. Vibration Analysis of Monopiled Offshore Wind Turbines with Uncertain Modal Damping. In: ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2019. p. ISOPE-I-19-149.
- COLHERINHAS, G. B.; PETRINI, F.; MORAIS, M. V. G.; BONTEMPI, F. Optimal design of passive-adaptive pendulum tuned mass damper for the global vibration control of offshore wind turbines. *Wind Energy*, v. 24, p. 573–595, 2021.
- FISCHER, A.; et al. Numerical and experimental modal analysis of a wind turbine tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 203, 2021.
- GARCIA, J.; et al. Offshore wind turbines: Dynamic stability and design considerations. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 149, p. 1234–1245, 2023.
- GHASSEMPOUR, M.; FAILLA, G.; ARENA, F. Vibration mitigation in offshore wind turbines via tuned mass damper. *Engineering Structures*, v. 183, p. 610–636, mar. 2019.
- HUANG, Y.; WANG, J. Advances in structural analysis and control for offshore wind turbine towers. *Ocean Engineering*, v. 245, 2022.
- JONKMAN, J. M.; et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- JONKMAN, J. M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine. *Wind Energy*, v. 10, p. 517–541, 2007.

- LI, X.; et al. Enhanced structural damping for wind turbines with soil-structure interaction. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1299–1310, 2020.
- McCANN, R.; et al. Scaling effects in wind turbine design. *Wind Energy Science*, v. 7, p. 443–462, 2022.
- NGUYEN, T.; CHEN, Z. Modal analysis of scaled wind turbine models: A review. *Structural Dynamics Review*, v. 6, p. 98–105, 2021.
- RAMOS, D.; et al. Comparative analysis of vibration control methods for offshore wind turbines. *Applied Ocean Research*, v. 122, p. 101889, 2022.
- ZHAO, Y.; et al. Experimental analysis of offshore wind turbine dynamics under combined loading conditions. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, v. 21, n. 11, 2021.
- ZWICK, D.; et al. Modeling of wind-induced dynamic behavior of offshore wind turbines. *Wind Energy*, v. 18, p. 1261–1275, 2015.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616817>

ANÁLISE DINÂMICA DE RODA GIGANTE PROJETADA COM OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO

Eduardo C. Santos¹, Zenón J. G. N. del Prado¹, Gino B. Colherinhas¹

*¹Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás
Alameda Ingá, Prédio B5, Campus Samambaia, Goiânia, 74045-155, Goiás, Brazil
eduardocoelho@discente.ufg.br, zenon@ufg.br, gino@ufg.br*

Resumo. A modelagem e a análise dinâmica de rodas-gigantes acessíveis constituem um grande desafio, em razão da falta de literatura técnica disponível sobre essas estruturas. Este artigo apresenta uma análise dinâmica de uma roda-gigante acessível, cujas dimensões são determinadas de maneira inovadora por meio de um processo de otimização utilizando algoritmo genético. O estudo desenvolve-se em Python com a aplicação da extensão PyMAPDL, integrando o programa de método dos elementos finitos à linguagem de programação. O estudo adota rigorosamente normas técnicas para assegurar a integridade do brinquedo de diversão. O objetivo principal do artigo é realizar a análise dinâmica da estrutura, com ênfase na análise modal e harmônica. A partir dessas análises, obtêm-se os doze primeiros modos de vibração, as respectivas frequências naturais, bem como os deslocamentos para frequências determinadas, permitindo a identificação da amplitude da resposta da estrutura. Os resultados revelaram-se satisfatórios ao identificar condições que representam risco à integridade estrutural da roda-gigante, portanto, deve-se evitar a operação nessas condições específicas.

Palavras-chave: Método dos elementos finitos. Projeto de roda gigante acessível. Acessibilidade. Análise dinâmica. Análise harmônica.

INTRODUÇÃO

O projeto e modelagem de rodas gigantes acessíveis apresenta-se como um desafio. Nota-se uma lacuna na literatura técnica sobre a modelagem por elemento finitos, análises estática e dinâmica desse brinquedo de diversão, em especial no Brasil. Dessa forma, os parques de diversão brasileiro dependem da importação dessa atração, que resulta em elevados custos e adversidades na adaptação às normas locais.

A análise estrutural abrange diversas técnicas essenciais na engenharia para avaliar e prever o comportamento de estruturas e componentes em diversas condições de

carregamento, sejam elas estáticas ou dinâmicas. A análise modal investiga o comportamento dinâmico com a finalidade de identificar as frequências naturais e os modos de vibrar, sendo essencial para prever problemas de ressonância e compreender como a estrutura responde a diferentes tipos de excitação. Enquanto a análise harmônica concentra-se em respostas a carregamentos cíclicos, permitindo identificar as amplitudes e fases de resposta para cada frequência, o que é crucial para evitar amplificação de resposta em frequências ressonantes. Essas técnicas são amplamente aplicadas nos setores automotivo, aeroespacial e de máquinas rotativas, nos quais o controle das respostas vibracionais é vital para garantir a integridade estrutural, o conforto do usuário e a eficiência estrutural.

A metodologia detalha a aplicação do algoritmo genético no desenvolvimento do projeto de uma roda-gigante acessível, explica cada etapa do processo e sua contribuição para a otimização estrutural e funcional da estrutura. A modelagem por elementos finitos, juntamente com as análises estática e dinâmica, é realizada com a adoção de critérios rigorosos para assegurar a segurança e otimizar a eficiência do design. Dessa forma, este artigo não apenas avança o conhecimento técnico, mas também promove a inclusão social ao fomentar a acessibilidade em parques de diversão.

DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do projeto realiza-se com a linguagem de programação Python, utiliza-se a biblioteca PyMAPDL, resultando em maior flexibilidade ao usuário nas simulações e otimizações. Aplica-se as normas técnicas NBR 15926-2 (2023) e ISO/DIS 17842-1 (2014) na verificação da integridade estrutural ao longo de todo o projeto, o fator de segurança requisitado contra capotamento para a roda gigante é 1,35.

A força do vento é uma consideração importante para a análise, principalmente devido à altura dessa estrutura, utiliza-se a eq. (1) para o cálculo dessa força conforme a norma técnica NBR 15926-2 (2023), na qual F_w é a força do vento em N, q_{eq} é a pressão do vento em kN/m^2 , o valor da pressão do vento está relacionada à altura da estrutura, a roda gigante estudada

apresenta uma altura de aproximadamente 20 metros para velocidade do vento inferior a 15 m/s, o valor de q_{eq} é igual a 0,35 kN/m². O coeficiente de força C_f conforme a NBR 6123 (2023) na condição da direção do vento perpendicular é igual a 1,1. Enquanto A representa a área em que a força do vento atua.

$$F_w = q_{eq} C_f A \quad (1)$$

As primeiras aplicações com algoritmos genéticos em otimizações surgiram com a simulação de sistemas genéticos (GOLDBERG, 1989). A otimização por algoritmos genéticos é um método que utiliza como base a teoria evolutiva de Charles Darwin, reproduzindo a evolução natural, é especialmente útil quando o estudo abrange uma ampla gama de parâmetros e valores para esses parâmetros. (HOLLAND, 1975). O processo inicia-se com a geração de uma população inicial de possíveis soluções. Onde os indivíduos são pontuados, aplica-se o elitismo, onde preservam-se os melhores indivíduos, realiza-se o cruzamento para formar uma nova geração e a mutação altera aleatoriamente os genes. Por fim, a dizimação substitui os indivíduos de pior desempenho, renovando o ciclo de seleção e evolução.

Os projetos atuais demandam que as estruturas sejam mais leves, flexíveis e resistentes, o que frequentemente as torna mais vulneráveis a vibrações indesejadas, dessa forma ao longo das últimas décadas, a análise modal consolidou-se como uma ferramenta fundamental no apoio aos engenheiros na identificação e otimização das propriedades dinâmicas de estruturas (HE e FU, 2001). O método de Lanczos mostra-se adequado, pois permite a obtenção dos modos de vibração e frequências naturais da estrutura com precisão (BATHE, 1996).

A análise harmônica constitui uma ferramenta fundamental na dinâmica estrutural, pois investiga como as estruturas reagem a forças periódicas e vibrações induzidas. Essa análise é essencial para compreender fenômenos como a ressonância, que ocorre quando a frequência natural de uma estrutura se iguala à frequência de excitação, resultando em amplificações significativas nas respostas vibracionais. Ademais, a análise harmônica nas

fases iniciais do projeto é importante, a fim de mitigar os efeitos adversos das vibrações e assegurar a integridade estrutural e a segurança dos sistemas (THORBY, 2017).

Entre os trabalhos nesta área de destacam-se as contribuições, como os estudos de Krolicki, Sullivan e Willford (2013) sobre a roda gigante Vegas High Roller, além disso há a pesquisa de Almufti et al. (2013) sobre a ação do vento nessa estrutura que possui cerca de 167 metros de altura. Recentemente Petrovska (2021) conduz uma análise comparativa entre rodas-gigantes fixas e transportáveis, ressaltando a Ain Dubai, que, com cerca de 250 metros de altura, é atualmente a maior do mundo.

METODOLOGIA

Este estudo emprega uma ferramenta de Algoritmo Genético (AG) desenvolvida internamente por Colherinhas et al. [8] e adaptada para o software Python (Fig. 1). Essa adaptação permite a interação simultânea entre o Python e o programa de método dos elementos finitos (MEF), otimizando o processo de seleção das seções transversais da roda-gigante de acordo com os objetivos do estudo. Durante a adaptação, desenvolve-se uma interface gráfica de usuário (GUI) (Fig. 2) que facilita o estudo de casos, permitindo a inserção dos parâmetros manualmente e salvar configurações de roda gigante específicas.

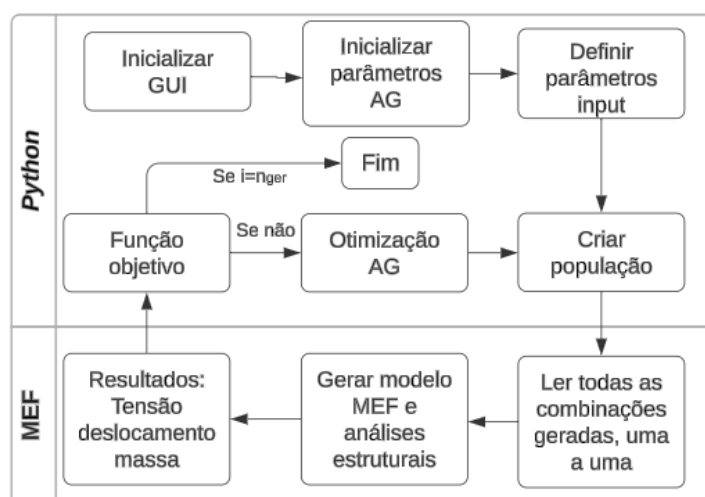


Figura 1. Fluxograma de implementação do AG.

Figura 2. Interface gráfica do usuário.

Após a geração da população inicial, os indivíduos são transferidos para o programa de MEF, onde suas dimensões são lidas e a roda-gigante é modelada. A análise estática subsequente fornece valores de massa total, tensões e deformações dos elementos, que são enviados de volta ao Python. A otimização visa reduzir a massa total da roda-gigante, mantendo um fator de segurança adequado. Caso o fator de segurança seja maior que três, limita-o a esse valor para evitar altos valores de massa total da estrutura. O código, então, aplica o método de seleção pela roleta, realiza elitismo para preservar os melhores indivíduos e utiliza o cruzamento BLX-alfa para maior variabilidade genética, gerando novos indivíduos que passam pela mutação. O ciclo se repete com a exclusão de indivíduos de baixa aptidão e substituição por novos, em intervalos regulares, até a última geração, conforme a Figura 1.

DEFINIÇÃO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Neste estudo, a modelagem da roda-gigante incorpora três tipos distintos de elementos: BEAM188, MASS21 e BEAM4, selecionados com base em suas propriedades mecânicas específicas que satisfazem os critérios de análise estrutural ($E = 210 \text{ GPa}$, $G = 80 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$ e $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$).

A geometria das hastes é fundamentada no modelo apresentado na Fig. 3, onde os elementos destacados em verde representam aqueles que utilizam a seção transversal externa, enquanto os elementos em vermelho correspondem à seção transversal interna.

Após a criação da primeira haste, aplica-se uma rotação no sistema de coordenadas para automatizar a modelagem da roda-gigante. Esse processo é repetido de acordo com o número de hastes definido no projeto, garantindo a simetria e uniformidade estrutural da roda. A modelagem completa da roda gigante é apresentada na Fig. 4, observa-se que os arcos que conectam as hastes são elementos lineares, com a finalidade de simplificar a simulação, no nó mais externo da haste e no nó intermediário da haste. Além disso, nota-se a gôndola representada pelo elemento de massa, MASS21, e a aplicação da força do vento neste elemento de massa.

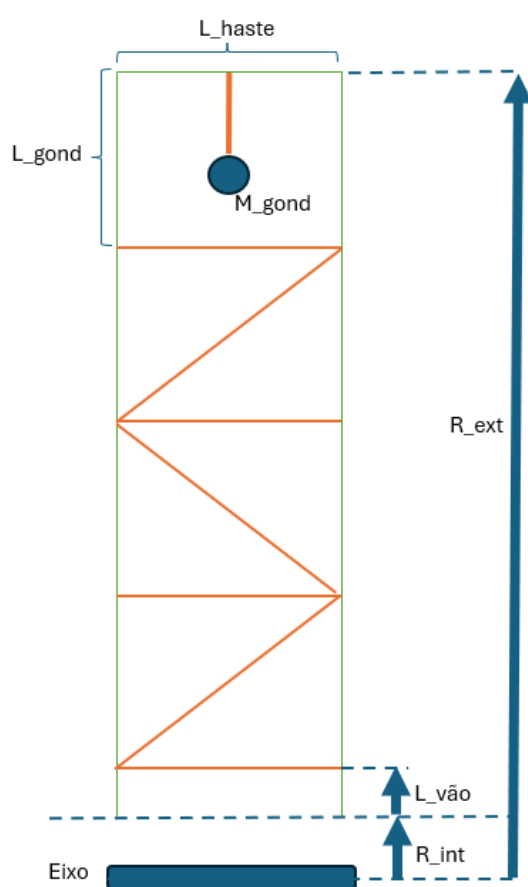


Figura 3. Haste.

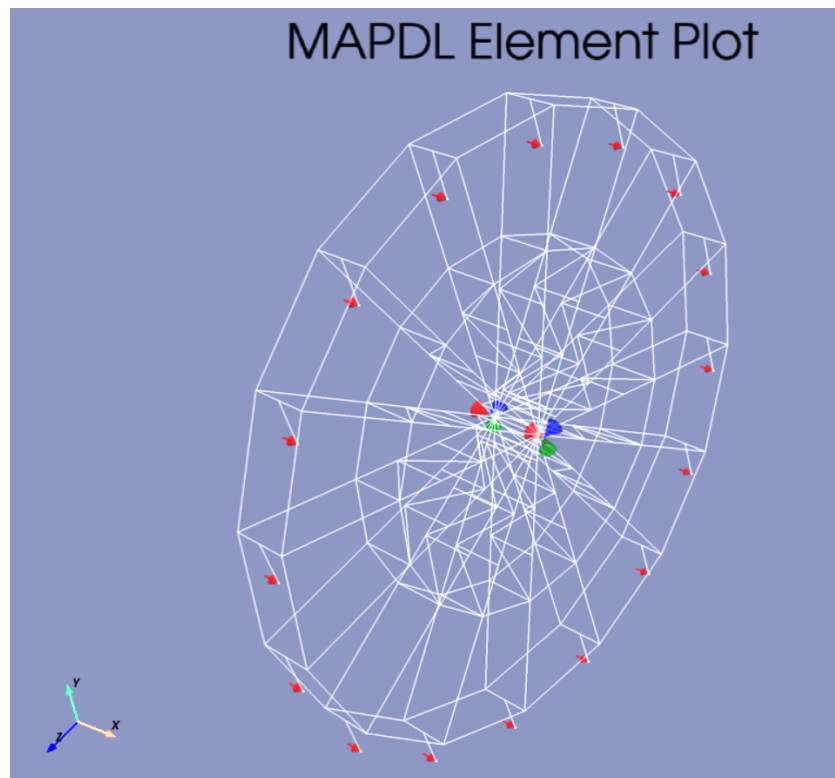


Figura 4. Modelagem da roda gigante.

ANÁLISE DINÂMICA

Realiza-se a análise modal para determinar as frequências naturais da roda-gigante, evitando a ocorrência de ressonância e possíveis problemas estruturais. O estudo inclui os doze primeiros modos de vibração, utilizando o método de Lanczos para a extração de modos, devido à sua eficácia em sistemas de grande porte. A análise leva em consideração as tensões pré-existentes na estrutura antes do cálculo modal, além da aceleração gravitacional no eixo Y, garantindo uma modelagem precisa e consistente da roda-gigante. Essa abordagem contribui para a integridade estrutural da roda gigante.

Efetua-se a análise harmônica com a finalidade de determinar a resposta da estrutura sujeita a excitações harmônicas, estuda-se a faixa de frequência de 0,01 até 2,00 Hz, aumentando 0,01 Hz a cada passo. Na modelagem completa da roda gigante aplica-se uma excitação harmônica no eixo X na haste gerada com a angulação de zero graus, observa-se a

resposta harmônica no nó central do elemento mais externo da haste, para as hastes com angulação igual a 0° , 90° e 180° , quando observada a roda gigante no plano yz.

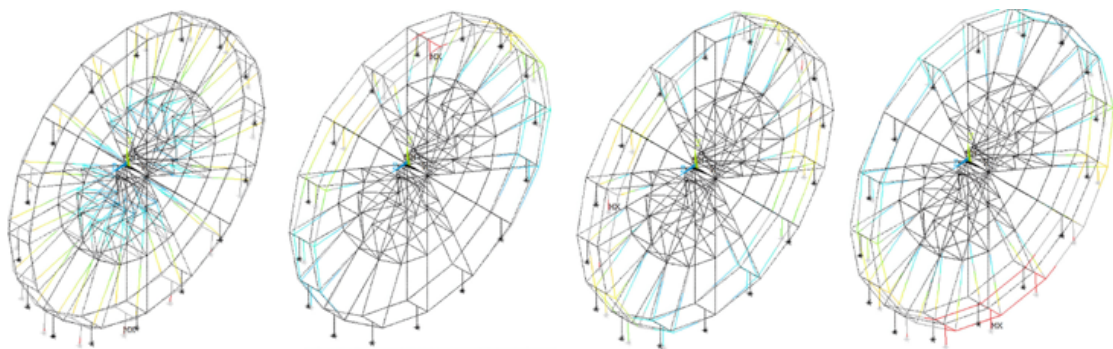
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Obtém-se pela otimização pelo AG a seguinte combinação de seções transversais, apresentadas na Tab. 1, a qual atende ao fator de segurança razoável e massa da estrutura reduzida, para essa combinação tem-se um valor de massa total da roda gigante igual a 36,328 toneladas, enquanto o fator de segurança obtido é igual a 1,35. Nota-se que as dimensões das seções transversais

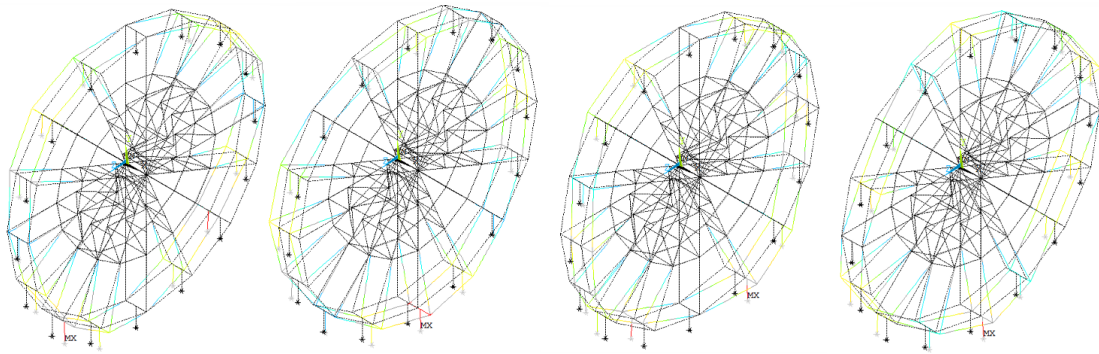
Tabela 1. Configuração obtida pela otimização com AG.

Externa			Interna			Arco		
W_1	W_2	t_h	W_1	W_2	t_h	W_1	W_2	t_h
60,00	30,00	3,00	30,00	30,00	2,00	60,00	30,00	3,00

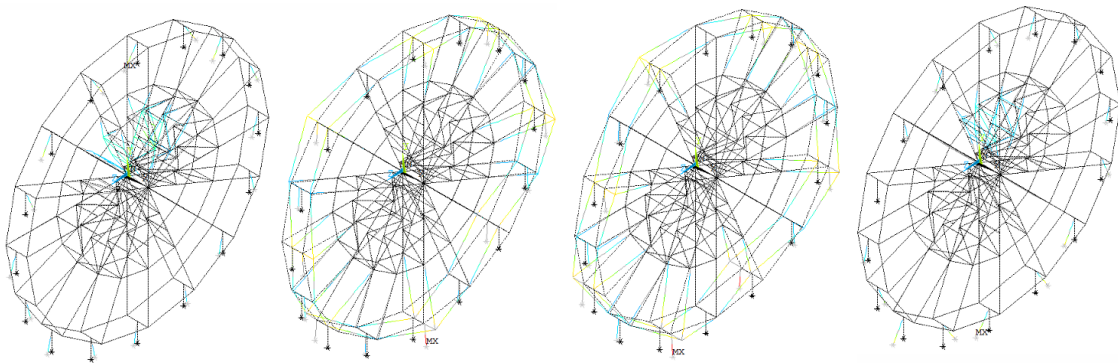
Ao realizar a análise modal, Fig. 5, nota-se alguns modos de vibrar pertinentes, como o primeiro modo de vibrar sendo um modo radial, enquanto os modos 2, 3 e 4 modos laterais, condizente com os resultados encontrados por Almufti et al. (2013). Além disso, nota-se modos pendulares, sendo eles os modos 9 e 12.



Modo: 1 (0,05Hz), 2 (0,62Hz), 3 (0,69Hz), 4 (0,75Hz)



Modo: 5 (0,88 Hz), 6 (0,88 Hz), 7 (1,09 Hz), 8 (1,09 Hz)



Modo: 9 (1,28 Hz), 10 (1,31 Hz), 11 (1,31 Hz), 12 (1,32 Hz)

Figura 5. Modos de vibrar e frequências naturais.

A Fig. 6 apresenta a resposta harmônica dos nós de três hastes distintas, posicionadas em diferentes angulações no plano yz. Observa-se que as respostas das hastes são similares entre as frequências aproximadas de 0,875 Hz e 1,75 Hz, com variações mínimas na magnitude da resposta. Fora dessa faixa de frequências, verifica-se algumas diferenças no comportamento das respostas. Na haste posicionada a 180°, o primeiro modo vibratório exibe uma magnitude relativamente baixa, enquanto a maior magnitude de resposta para as três hastes ocorre próxima à frequência de 1,31 Hz, correspondente ao décimo e décimo primeiros modos de vibração.

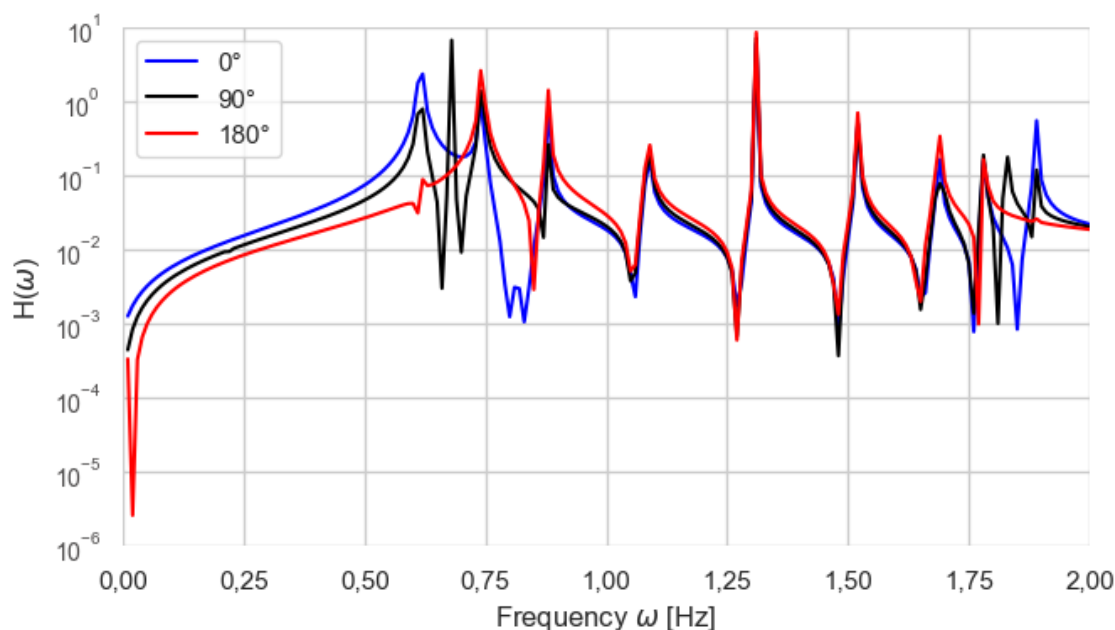


Figura 6. Resposta harmônica em hastes diferentes.

CONCLUSÕES

O presente estudo alcançou os objetivos propostos satisfatoriamente, contribuindo para a redução da lacuna técnica, principalmente no Brasil, quanto a modelagem, simulações e análises estática e dinâmica em rodas gigantes. A otimização com AG integrado ao Python mostrou-se eficiente ao obter uma configuração de seções transversais que proporcionam a roda gigante uma redução na massa total e um fator de segurança razoável, calculado pela análise estática, que atende a NBR 15926-2 (2023).

A modelagem por elementos finitos revelou-se apropriada para abordar o problema, com a seleção dos tipos de elementos, propriedades dos materiais e o processo iterativo aplicado na criação das hastes, o que possibilitou maior facilidade na criação repetitiva do modelo de análise ao longo do processamento do AG.

A análise dinâmica foi fundamental para avaliar a integridade da estrutura, indicando a necessidade de evitar a operação da roda-gigante quando exposta às frequências naturais

resultantes, especialmente no décimo e décimo primeiros modos, nos quais observou-se a maiores magnitudes de resposta na análise harmônica.

Na continuação desta pesquisa propõe-se o aprimoramento da GUI e o estudo de novas otimizações e análises estruturais para diferentes dimensões de rodas gigantes.

Agradecimentos. Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do acordo PD&I entre a VICOM e a UFG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15926: Equipamentos de parques de diversão - Parte 2: Requisitos de segurança de projeto e de instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ALMUFTI I, WILLFORD M, FERGUSON M, ALLSOP A AND KROLICKI J. Wind Comfort Studies for the Vegas High Roller Observation Wheel Structures. Anais do Structures Congress, 2013. <https://doi.org/10.1061/9780784412848.116>
- BATHE, K. J. Finite Element Procedures. 1st. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- COLHERINHAS, G. B. Ferramenta de otimização via algoritmos genéticos com aplicações em engenharia. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- FU, ZHI-FANG; HE, JIMIN. Modal analysis. 1. ed. ed. Woburn, MA: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2001.
- GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. 1st. ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. 1st. ed. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- ISO/DIS – Draft International Standard. ISO 17842: Safety of amusement rides and amusement devices - Part 1: Design and manufacture: ISSO/DIS, 2023.
- KROLICKI J, SULLIVAN B AND WILLFORD M. Vegas High Roller: Giant Observation Wheel Design. Anais do

Structures Congress: American Society of Civil Engineers, 2013.
<https://doi.org/10.1061/9780784412848.118>

THORBY, DOUGLAS. Structural dynamics and vibration in practice: an engineering handbook. 1. ed.
Woburn, MA: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008.

YU PETROVSKA. Special aspects of exterior design of elements of stationary and mobile observation
constructions. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1164 012060, 2021.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1164/1/012060>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15616825>

