

ANAIIS DO I SiPGEM

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

21 A 23 DE NOVEMBRO DE 2023
BELO HORIZONTE - MG
PPGEM | CEFET-MG



Realização:

Apoio:



S612a Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do
CEFET-MG (1. : 2023 : Belo Horizonte/MG)

Anais do I SiPGEM / CEFET-MG. [recurso eletrônico]. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte: DEM/CEFET-MG, 2023.

93 p.

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

e-ISSN: 3085-6957

Inclui referências

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

CDD 620.1

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET-MG

Departamento de Engenharia Mecânica – DEM

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM

Direção Geral

Profa. Carla Simone Chamon

Diretora-geral

Prof. Conrado de Souza Rodrigues

Vice-diretor

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação:

Profa. Dra. Laíse Ferraz Correia

Diretora de pesquisa e pós-graduação

Prof. Dr. Claudio Turani Vaz

Diretor Adjunto de Pesquisa e Pós-Graduação

Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Dr. Yukio Shigaki

Coordenador PPGEM

Prof. Dr. Artur Caron Mottin

Prof. Dr. José Leôncio Fonseca de Souza

Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri

Prof. Dr. Wagner Sade

PPGEM | CEFET-MG

BELO HORIZONTE

2023

Comissão Organizadora do I SiPGEM:

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silva de Lima

Presidente da comissão

Prof. Dr. Artur Caron Mottin

Profa. Dra. Ivanilza Felizardo

Prof. Dr. Wagner Sade

Mateus Gabriel Neves Fagundes

Eduardo Cassiano Santos David

Discente

Comissão Científica do I SiPGEM:

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

Prof. Dr. Artur Caron Mottin

Profa. Dra. Cristina Almeida Magalhães

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silva de Lima

Prof. Dr. José Henrique Martins Neto

Profa. Dra. Ivanilza Felizardo

Prof. Dr. Moacir França

Prof. Dr. Rogério Antonio Xavier Nunes

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Prof. Dr. Sandro Costa Silva

Prof. Dr. Thiago Augusto Araújo Moreira

Prof. Dr. Tiago de Freitas Paulino

Prof. Dr. Wagner Sade

Prof. Dr. Yukio Shigaki

APRESENTAÇÃO

O Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (SiPGEM), é um evento anual de abrangência regional destinado aos pesquisadores e docentes do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica do CEFET-MG - Campus Nova Gameleira. Foi organizado pela Comissão Especial designada pela coordenação do PPGEM para a organização do 1º Simpósio da Pós-graduação em Engenharia Mecânica do CEFET-MG.

O evento teve como principal objetivo divulgar as pesquisas em andamento e promover o intercâmbio entre docentes e discentes das diferentes linhas de pesquisa do programa (eficiência energética & eficiência em sistemas e processos mecânicos). Como objetivo complementar, buscou-se promover discussões construtivas entre os diferentes grupos de pesquisa, colaborando com a formação dos pesquisadores em aspectos relacionados à redação de textos científicos e apresentação oral, incluindo tempo reservado para questionamentos do público participante.

Durante o evento, foram ministradas duas palestras por pesquisadores destacados nas áreas acadêmica e tecnológica: a primeira, de abertura do evento, foi proferida pelo Prof. PhD. Alexandre Queiroz Bracarense (Diretor da MB WeldWorks e Professor aposentado do Departamento de Eng. Mecânica - UFMG) e intitulada "Formação de mestres e doutores na visão do orientador". A segunda palestra foi proferida pelo Prof. Dr. José Henrique Martins Neto, Professor Colaborador do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica do CEFET-MG e Professor Aposentado do Departamento de Eng. Mecânica da mesma instituição, intitulada "Hidrogênio: Combustível do futuro e outras aplicações".

Em nome da comissão organizadora do 1º SiPGEM, agradecemos a todos os participantes do evento, avaliadores e revisores dos trabalhos científicos, à Fundação CEFETMINAS - FCM pelo apoio financeiro para realização do evento, ao Serviço de Biblioteca, à Diretoria do campus Nova Gameleira, ao Departamento de Engenharia Mecânica e à secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Comissão Especial para a organização
do 1º Simpósio da Pós-graduação em
Engenharia Mecânica do CEFET-MG

Realização:



Apoio:



SUMÁRIO

Artigo	Página
ANÁLISE TERMODINÂMICA E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA MODIFICADO UTILIZANDO UM EJETOR BIFÁSICO PARA FLUIDOS COM BAIXO GWP <i>Augusto Veiga de Souza, Paulo E. Lopes Barbieri, Débora C. Silva Mól, Raphael N. de Oliveira, Ralney Nogueira de Faria</i>	8 - 14
O CONTROLE DE EMISSÃO DE POLUENTES E OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS NECESSÁRIOS: UMA ABORDAGEM HISTÓRICA <i>Felipe Augusto de Souza Pereira, Thiago Augusto Araújo Moreira, Fernando A. Rodrigues Filho</i>	15 - 19
MANUTENÇÃO DE MANCAIS DE ROLAMENTOS INDUSTRIAIS COM A APLICAÇÃO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA <i>Paulo Sérgio Brandão Júnior, Yukio Shigaki</i>	20 - 24
CONDIÇÕES CRÍTICAS DE OPERAÇÃO DE PLATAFORMAS ELEVATÓRIAS MÓVEIS DE TRABALHO PEMT NA CONSTRUÇÃO CIVIL E NA INDÚSTRIA <i>Eduardo Cassiano Santos David, Artur Caron Mottin</i>	25 - 30
VERIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS COM CHAPA DE EXTREMIDADE ESTENDIDA CONSIDERANDO AS NÃO LINEARIDADES DO SISTEMA <i>Guilherme Henrique Leite Viana, Cristina Almeida Magalhães</i>	31 - 35
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CHANFRO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM JUNTAS DE TOPO <i>Edson Miranda, Cristina Almeida Magalhães, Ivanilza Felizardo</i>	36 - 41
ARRANJOS DE PLANTAS FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE VIA DESSALINIZAÇÃO <i>Larissa Fernanda N. Ildefonso, José Henrique Martins Neto</i>	42 - 46
ANÁLISES DE RENDIMENTO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA COM EJETOR <i>João Victor Guimarães Bastos, Ralney Nogueira de Faria, Paulo E. Lopes Barbieri</i>	47 - 50
ANÁLISE TERMOCONÔMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA QUE UTILIZA R744, EJETOR E ENERGIA SOLAR <i>Débora Carla Silva Mól, Paulo E. Lopes Barbieri, Ralney N. de Faria, Augusto Veiga de Souza</i>	51 - 55
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA FERRAMENTA DE PCBN NO TORNEAMENTO DO AÇO ENDURECIDO AISI D2 EM CORTE CONTÍNUO E INTERROMPIDO <i>Ernane Felipe Dias, Sandro Cardoso Santos</i>	56 - 67
ESTUDO COMPARATIVO DE BRASAGEM DE TUBOS EM AÇO BAIXO CARBONO PELOS PROCESSOS DE INDUÇÃO E FORNO CONTÍNUO <i>Alexandre Aurelio Santos Diniz, Sandro Cardoso Santos, Ivanilza Felizardo</i>	68 - 72

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO GEOTÉRMICO APLICADO PARA CLIMAS TROPICAIS**73 - 77***Renato Vinicius Santos, Tiago Freitas Paulino, Paulo Eduardo Barbieri***DEFINIÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMA FOTO - VOLTAICO RESIDENCIAL NO BRASIL ATRAVÉS DO ALGORITMO ACVO COM A ENTRADA DA LEI 14.300****78 - 84***Fabrcio Pinto Coelho, Ralney Nogueira de Faria***AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA VIABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL DO FLUIDO R744 EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR****85 - 87***Flávio França Vasconcelos, Tiago de Freitas Paulino, Antônio A. Torres Maia***SUPRESSÃO DE FINOS NO CÁLCULO DA VELOCIDADE CRÍTICA DE DEPOSIÇÃO EM BOMBEAMENTO DE POLPA DE MINÉRIO DE FERRO****88 - 92***Eduardo Campêlo Fonseca, Cristina Almeida Magalhães*



Análise termodinâmica e otimização de um sistema de refrigeração em cascata modificado utilizando ejetores bifásico e fluidos com baixo GWP.

Augusto Veiga de Souza¹, Paulo Eduardo Lopes Barbieri¹, Débora Carla Silva Mól¹,
Raphael Nunes de Oliveira², Ralney Nogueira de Faria¹

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

2 Afiliação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG))

Resumo:

Este estudo propõe a utilização de sistemas de refrigeração em cascata para resfriamento de baixas temperaturas, visando melhorias na eficiência energética. Para reduzir as perdas de energia no sistema, foram investigados ejetores bifásicos com fluidos de baixo potencial de aquecimento global (GWP). Um modelo termodinâmico foi desenvolvido, avaliando quatro refrigerantes de baixo potencial de aquecimento global no ciclo de alta temperatura e CO₂ no ciclo de baixa temperatura, associados a ejetores bifásicos de área constante. Este sistema foi otimizado a fim de minimizar a destruição de exergia utilizando o método do enxame de partículas (PSO). Os resultados demonstraram que o par R1234yf-CO₂ apresentou a maior taxa de destruição exérgica, enquanto o par NH₃-CO₂ teve o maior coeficiente de desempenho (COP) entre todos os fluidos testados. À medida que a capacidade de refrigeração aumentou, uma redução nos diâmetros dos componentes internos do ejetor foi verificada. E o aumento da eficiência dos bocais do ejetor diminuem os diâmetros das seções internas. Esses resultados demonstram o potencial dos sistemas de refrigeração em cascata com ejetores bifásicos para alcançar maior eficiência e sustentabilidade em aplicações de baixas temperaturas.

Palavras-chave: Destruição Exérgica, Dimensionamento do ejetor, Otimização, Refrigerantes de baixo GWP, Refrigeração em Cascata.

Introdução:

A utilização de sistemas de refrigeração desempenha um papel fundamental em setores como a indústria de alimentos e petroquímica, onde a necessidade de atingir temperaturas extremamente baixas, entre -30°C e -100°C, é essencial. Para abordar essa demanda, os sistemas de refrigeração em cascata (SRC) surgem como uma solução eficaz, com a capacidade de minimizar perdas energéticas, reduzir custos e mitigar os impactos ambientais associados a esses processos. Adebayo et al. (2021).

Os SRCs consistem em dois circuitos de refrigeração termicamente interconectados por um trocador de calor intermediário, nos quais diferentes refrigerantes são usados, adaptados às características termodinâmicas específicas da aplicação em questão. No entanto, mesmo com os avanços na eficiência dos SRCs em temperaturas tão baixas, as perdas ainda são uma



preocupação, devido às baixas temperaturas de evaporação, resultando em uma destruição significativa de exergia do refrigerante antes do evaporador. Uma abordagem para mitigar essa destruição exérgica é a implementação de ejetores bifásicos, os quais ampliam a capacidade de refrigeração do sistema e reduzem a potência necessária para o compressor Li et al. (2018).

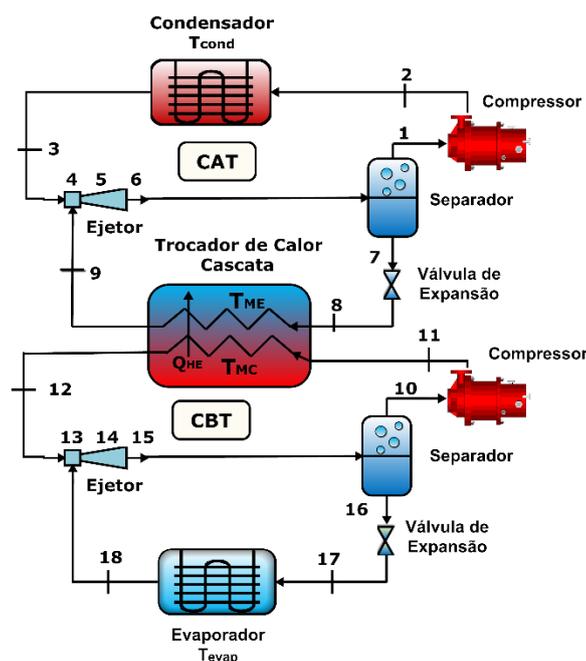


Figura 1- Sistema de refrigeração em cascata com ejetores (SRCE)

Várias pesquisas exploraram o uso de ejetores bifásicos em sistemas de refrigeração, considerando diferentes métodos de previsão de desempenho, como o ejetor de mistura de área constante (CAM) e o ejetor de mistura de pressão constante (CPM). Atmaca et al. (2017) e Keenan et al. (1950) e Seckin (2017). Algumas evidências sugerem que o modelo de análise de ejetor de área constante supera o modelo de pressão constante e apresenta uma concordância razoável com dados experimentais. Atmaca et al. (2019) e Bilir; Ersoy (2009) e Hassanain et al. (2015) e Yapıcı; Ersoy (2005).

A introdução de ejetores em sistemas de refrigeração em cascata tem mostrado uma abordagem eficaz para melhorar o desempenho do sistema, resultando em melhorias no coeficiente de desempenho (COP) e na redução da irreversibilidade em todos os componentes do sistema. Ejemni et al. (2012) e Udriou et al. (2023). Além disso, a combinação de ejetores com refrigerantes alternativos de baixo potencial de destruição de ozônio (ODP) e baixo potencial de aquecimento global (GWP) tem se desmostrado promissória. Os resultados mostram que o uso de ejetores pode melhorar o COP, a eficiência exérgica e o custo total do sistema, enquanto reduz a taxa de destruição de exergia. Rostamzadeh et al. (2021) e Sanaye et al. (2019).

As análises destacam que a integração de ejetores em sistemas de refrigeração em cascata contribui para a melhoria da eficiência energética, a redução das perdas termodinâmicas e dos custos operacionais. Além disso, o método de análise de área constante oferece uma



modelagem precisa e uma análise detalhada do desempenho do ejetor. Com base na pesquisa até o momento, este trabalho propõe uma análise termodinâmica e otimização de um sistema em cascata modificado com ejetores bifásicos, utilizando o método de análise de área constante e fluidos de baixo potencial de aquecimento global. Esta abordagem oferece insights adicionais sobre o funcionamento do ejetor em sistemas de refrigeração em cascata e fornece aos projetistas uma análise abrangente para aprimorar e implementar esses sistemas

Metodologia:

Para a simulação do desempenho do sistema de refrigeração em cascata com ejetor, foi desenvolvido um programa utilizando o ambiente MATLAB, em conjunto com a biblioteca termodinâmica REFPROP, versão 9.0. A fim de verificar o modelo do ejetor utilizado nesta pesquisa, os parâmetros de operação e projeto foram considerados exatamente iguais aos da literatura, dados teóricos publicados por Hassanain et al. (2015). Posteriormente, o sistema em cascata com ejetor é simulado considerando os resultados teóricos reportados por Aghazadeh Dokandari et al. (2014). O algoritmo utilizado neste trabalho para a otimização é por enxame de partículas (PSO). Os parâmetros ótimos de operação são obtidos através da minimização da função objetivo destruição de exergia total no sistema. Assim é possível encontrar o COP máximo otimizado.

Resultados e Discussão:

Os resultados demonstraram que à medida que a carga de resfriamento aumenta as irreversibilidades também aumentam significativamente no sistema. Dentre os refrigerantes utilizados o par que apresentou maior taxa de destruição exérgica no sistema foi o R1234yf-CO₂, seguido pelos pares R1234ze(E)-CO₂, NH₃-CO₂ e R290-CO₂ para todas as cargas de resfriamento como mostra a figura 3. Para os valores otimizados, o COP máximo corresponde as temperaturas de: $T_{cond} = 30^{\circ}C$, $T_{evap} = -45^{\circ}C$, $T_{MC} = -10^{\circ}C$, $\Delta T = 3^{\circ}C$ para todas as cargas de resfriamento simuladas.

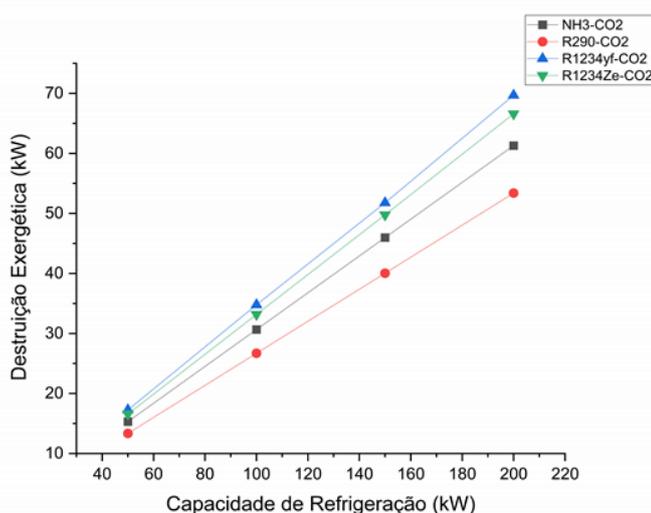


Figura 2- Efeito da capacidade de refrigeração na destruição exérgica total



Apesar do par R290-CO₂ apresentarem a menor taxa de destruição exegética total o maior COP otimizado apresentado no sistema foi encontrado utilizando o par NH₃-CO₂ (1,81) devido a maior taxa de arrasto no ejetor no CAT do qual gera um menor consumo de potência no compressor para dada capacidade de refrigeração. Em seguida temos os COP máximos dos pares R290-CO₂ (1,78), R1234ze- CO₂ (1,77) e R1234yf- CO₂ (1,74). A variação dos diâmetros da garganta do bocal motriz ($D_{mn,t}$), saída do bocal motriz ($D_{mn,e}$), diâmetro de saída do bocal de sucção ($D_{sn,e}$) e diâmetro de seção de mistura (D_{ms}) é diretamente proporcional ao aumento da capacidade de refrigeração. Quando a capacidade de refrigeração aumenta, todos os diâmetros também aumentam. Além disto, a taxa de fluxo de massa secundária e primária também tendem a aumentar. Esse comportamento está relacionado à necessidade de acomodar o maior fluxo de massa e garantir um desempenho adequado do sistema. na faixa estudada é relatado uma diferença relativa nos diâmetros de 41,4% entre 50 e 100 kW, 22,4% de 100 a 150 kW e 15,47 % de 150 a 200kW para todos os diâmetros, tanto no ciclo de alta temperatura (CAT) quanto no ciclo de baixa temperatura (CBT).

Refrigerante		Q_{evap} (Kw)	$D_{mn,t}$ (mm)	$D_{mn,e}$ (mm)	$D_{sn,e}$ (mm)	D_{ms} (mm)	W_{comp} (Kw)
NH ₃	CAT	50	2,17	5,40	24,66	25,36	14,80
		100	3,07	7,63	34,88	35,77	29,59
		150	3,76	9,34	42,72	43,75	44,39
		200	4,34	10,79	49,32	50,52	59,18
R290	CAT	50	5,24	9,18	31,91	33,24	15,22
		100	7,41	12,98	45,13	46,96	30,44
		150	9,07	15,90	55,28	57,52	45,66
		200	10,47	18,36	63,83	66,42	60,88
R1234ze	CAT	50	7,41	15,94	56,12	58,33	15,39
		100	10,48	22,55	79,37	82,49	30,78
		150	12,84	27,61	97,21	101,07	46,17
		200	14,83	31,91	112,33	116,79	61,65
R1234yf	CAT	50	7,79	14,58	47,91	50,07	15,91
		100	11,03	20,66	67,85	70,94	31,94
		150	13,50	25,25	82,99	86,73	47,74
		200	15,60	29,20	95,82	100,18	64,06
CO ₂	CBT	50	3,21	4,93	18,97	19,61	12,89
		100	4,54	6,97	26,83	27,73	25,77
		150	5,56	8,53	32,86	33,97	38,66
		200	6,42	9,86	37,94	39,22	51,55

Tabela1-Relação das condições de projeto internas do ejetor e trabalho de compressão em relação a capacidade de refrigeração.

No contexto deste estudo, também é analisado o impacto das eficiências internas no desempenho do ejetor. Os resultados ilustram que à medida que as eficiências do difusor, da saída do bocal motriz, da saída do bocal de sucção e da seção de mistura aumentam, os diâmetros dessas seções diminuem. Essa relação é atribuída ao fato de que, mantendo a



vazão mássica primária e secundária constante, os diâmetros dos ejetores são influenciados pelos fluxos mássicos em cada seção. O diâmetro da garganta do bocal motriz permanece constante, independentemente das variações nas eficiências internas do ejetor. Isso ocorre devido às pressões de operação do condensador e do evaporador, bem como à capacidade de refrigeração, serem mantidas constantes. Consequentemente, o fluxo de massa na garganta do bocal motriz permanece inalterado, sendo determinado apenas pela pressão do condensador. A relação inversa entre os diâmetros das seções e as eficiências também é explicada pelo impacto adverso do atrito nessas seções. Consequentemente, a contrapressão ótima (P_b) nas saídas dos bocais diminui resultando em um aumento das velocidades nas saídas dos bocais primário e secundário para manter a vazão mássica constante.

	<i>Eficiência dos Bocais</i>	$D_{mn,t}$ (mm)	$D_{mn,e}$ (mm)	$D_{sn,e}$ (mm)	D_{ms} (mm)	P_b (kPa)
NH₃	0,9	2,169	5,307	24,311	25,001	243,84
	0,8	2,169	5,489	25,039	25,739	245,33
	0,7	2,169	5,700	25,890	26,640	246,79
	0,6	2,169	5,949	26,909	27,670	248,28
R290	0,9	5,236	9,029	31,460	32,761	289,16
	0,8	5,236	9,342	32,402	33,760	291,78
	0,7	5,236	9,703	33,504	34,925	294,41
	0,6	5,236	10,130	34,823	36,314	297,03
R1234yf	0,9	7,793	14,340	47,231	49,353	180,66
	0,8	7,793	14,834	48,644	50,849	182,68
	0,7	7,793	15,406	50,298	52,590	184,70
	0,6	7,793	16,081	52,277	54,725	186,75
R1234ze	0,9	7,411	15,682	55,324	57,536	119,53
	0,8	7,411	16,221	56,980	59,260	120,80
	0,7	7,411	16,844	58,917	61,254	122,04
	0,6	7,411	17,785	61,889	64,376	121,20

Tabela 2- Diâmetros otimizados para diferentes eficiências internas do ejetor do CAT

As relações de área ótima foram maximizadas quando o refrigerante NH₃ foi utilizado no CAT, enquanto a menor relação de área foi encontrada para o refrigerante R1234yf. Esses resultados indicam a influência das eficiências internas do ejetor na geometria do sistema, destacando a importância de selecionar adequadamente os refrigerantes e ajustar as eficiências dos bocais para otimizar a performance do sistema de refrigeração em cascata.

Conclusão:



O presente trabalho trouxe uma análise não relatada em outros trabalhos desenvolvidos, que é a otimização de um sistema de refrigeração em cascata com ejetor bifásico utilizando o método de área constante. Teve como finalidade obter dados de projeto do ejetor empregado no sistema, ao passo que fluidos refrigerantes com baixo impacto ambiental são alternados. Tal abordagem ofereceu maiores detalhes de como o ejetor opera em sistemas de refrigeração em cascata, relatando mais uma análise para a melhoria e emprego nestes sistemas.

Dentro das limitações do modelo de equilíbrio homogêneo, o ciclo de expansão do ejetor deve ser analisado mais detalhadamente. Técnicas de controle devem ser propostas e examinadas.

- Avaliar o desempenho do ciclo com outros refrigerantes alternativos.
- Os sistemas de refrigeração por expansão com ejetor devem ser construídos e testados, tanto para demonstrar o conceito na prática quanto para descobrir deficiências na análise.

Agradecimentos:

Os agradecimentos vão para o CEFET MG e a todos servidores por proporcionar toda a base do qual foi apresentado neste trabalho, ao meu orientador Dr^o Ralney Nogueira de Faria ao meu co-orientador Dr^o Paulo Eduardo Lopes Barbieri, minha colega de trabalho Débora Silva Mól e o apoio financeiro entregue à investigação pela “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)”.

Referências:

ADEBAYO, V.; ABID, M.; ADEDEJI, M.; DAGBASI, M.; BAMISILE, O. Comparative thermodynamic performance analysis of a cascade refrigeration system with new refrigerants paired with CO₂.

Applied Thermal Engineering, v. 184, p. 116286, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431120337650>>. Acesso em: 2/6/2023

AGHAZADEH DOKANDARI, D.; SETAYESH HAGH, A.; MAHMOUDI, S. M. S. Thermodynamic investigation and optimization of novel ejector-expansion CO₂/NH₃ cascade refrigeration cycles (novel CO₂/NH₃ cycle). **International Journal of Refrigeration**, v. 46, p. 26–36, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014070071400190X>>. Acesso em: 10/1/2023.

ATMACA, A. U.; EREK, A.; EKREN, O. Investigation of new generation refrigerants under two different ejector mixing theories. **Energy Procedia**, v. 136, p. 394–401, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217352219>>. Acesso em: 21/6/2023.

ATMACA, A. U.; EREK, A.; EKREN, O. Impact of the mixing theories on the performance of ejector expansion refrigeration cycles for environmentally-friendly refrigerants. **International Journal of Refrigeration**, v. 97, p. 211–225, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700718303359>>. Acesso em: 10/11/2022.

BILIR, N.; ERSOY, H. K. Performance improvement of the vapour compression refrigeration cycle by a two-phase constant area ejector. **International Journal of Energy Research**, v. 33, n. 5, p. 469–480, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.1488>>. Acesso em: 10/11/2022.



EJEMNI, N.; NEHDI, E.; KAIROUANI, L. Use of ejectors in cascade refrigeration systems for exergetic performance improvement. **International Journal of Exergy**, v. 10, n. 2, p. 171, 2012. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/link.php?id=45864>>. Acesso em: 10/1/2023.

HASSANAIN, M.; ELGENDY, E.; FATOUH, M. Ejector expansion refrigeration system: Ejector design and performance evaluation. **International Journal of Refrigeration**, v. 58, p. 1–13, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700715001577>>. Acesso em: 10/11/2022.

KEENAN, J. H.; NEUMANN, E. P.; LUSTWERK, F. An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment. **Journal of Applied Mechanics**, v. 17, n. 3, p. 299–309, 1950. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanics/article/17/3/299/1106496/An-Investigation-of-Ejector-Design-by-Analysis-and>>. Acesso em: 10/11/2022.

LI, Y.; YU, J.; QIN, H.; SHENG, Z.; WANG, Q. An experimental investigation on a modified cascade refrigeration system with an ejector. **International Journal of Refrigeration**, v. 96, p. 63–69, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700718303372>>. Acesso em: 2/6/2023.

ROSTAMZADEH, H.; GHOLIZADEH, T.; ROSTAMZADEH, S.; VOSOUGHI, S.; FARSHAD, A. A. Role of ejector expander in optimal inherently safety design of cascade NH₃/Propane/CO₂ vapor compression refrigeration systems. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 146, p. 745–762, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582020319364>>. Acesso em: 10/11/2022.

SANAYE, S.; EMADI, M.; REFAHI, A. Thermal and economic modeling and optimization of a novel combined ejector refrigeration cycle. **International Journal of Refrigeration**, v. 98, p. 480–493, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700718304407>>. Acesso em: 10/1/2023.

SECKIN, C. Parametric Analysis and Comparison of Ejector Expansion Refrigeration Cycles With Constant Area and Constant Pressure Ejectors. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 139, n. 4, p. 042006, 2017. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/energyresources/article/doi/10.1115/1.4036383/373325/Parametric-Analysis-and-Comparison-of-Ejector>>. Acesso em: 10/11/2022.

UDROIU, C.-M.; MOTA-BABILONI, A.; GIMÉNEZ-PRADES, P.; BARRAGÁN-CERVERA, Á.; NAVARRO-ESBRÍ, J. Two-stage cascade configurations based on ejectors for ultra-low temperature refrigeration with natural refrigerants. **International Journal of Thermofluids**, v. 17, p. 100287, 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666202723000095>>. Acesso em: 17/5/2023.

YAPICI, R.; ERSOY, H. K. Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 18–19, p. 3117–3135, 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890405000312>>. Acesso em: 10/11/2022.



O controle de emissão de poluentes e os avanços tecnológicos necessários: uma abordagem histórica

Felipe Augusto de Souza Pereira¹ (0009-0003-0627-2226), Thiago Augusto de Araújo Moreira² (0009-0004-0553-5116), Fernando Antônio Rodrigues Filho³ (0000-0003-1786-4158)

1 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

2 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

3 PPGEM, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo: A ação humana provoca diversas consequências na natureza, principalmente após o período de industrialização. Protocolos e medidas foram desenvolvidos após esse processo evolutivo da sociedade para mitigar os danos e melhorar a qualidade do ar, e consequentemente, a qualidade de vida no planeta terra. Os motores a combustão são um dos responsáveis por essas consequências devido ao grande volume de poluentes produzidos. Dessa forma, a indústria automotiva busca produzir veículos mais eficientes que produzam menor volume de gases nocivos, redução que pode chegar até a 95%, se comparado a motores fabricados na década de 90. O presente artigo aborda uma análise comparativa das principais normas vigentes atualmente e os recursos tecnológicos adotados durante as diversas modificações ocorridas.

Palavras-chave: Biocombustíveis; Efeito Estufa; Eficiência Energética; Meio ambiente; Mobilidade.

Introdução: A ação antrópica está relacionada aos efeitos causados pelos seres humanos na natureza. Diversas consequências são provocadas pela emissão de poluente gerado pelo processo de industrialização e o uso de combustíveis fósseis. Os motores a combustão são um dos principais geradores de gases tóxicos na atmosfera, os principais são: Ozônio (O_3), Dióxido de Nitrogênio (NO_2), Dióxido de Enxofre (SO_2), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2) e material particulado. O excesso de gases de efeito estufa (GEE) produzidos por veículos equipados com motores a combustão interna e na indústria provoca consequências à saúde humana e a vegetal. Algumas doenças que podem ser citadas são as respiratórias e o câncer [1]. A frota de veículos do estado de São Paulo conta com pouco mais de 15 milhões de veículos que são responsáveis por produzir 150 toneladas de óxidos de nitrogênio (NO_x), dados de 2021[2].

Após o ano de 2003 iniciou-se a inclusão de veículo com motores flex no Brasil, buscando incentivar o uso de etanol hidratado (E100) e minimizar a emissão de poluentes. Este combustível é utilizado na maior parte da frota nacional atualmente e apresenta desempenho satisfatório entre os biocombustíveis. No entanto, o consumo de E100 em motores a combustão interna provoca uma maior emissão de hidrocarbonetos totais (THC), embora provoque redução dos demais poluentes [3]. As normas que regem o controle de poluentes mundialmente estão concentradas em reduzir a produção de ozônio, baseando na reatividade de cada composto químico, como a Euro 6 e PROCONVE L7.

Em busca de reduzir a produção de poluentes e, consequentemente uma recuperação da camada de Ozônio, diversos recursos tecnológicos são aplicados no desenvolvimento de novos motores. Um dos avanços significativos no setor automotivo é o conceito de downsizing, a fim de reduzir a capacidade volumétrica do motor, obtendo ganho de potência e melhores emissões. Todos esses avanços precisam estar em linha com as legislações vigentes e para isso é importante entender todo o processo evolutivo das principais normas, como a EURO e PROCONVE. Com a finalidade



de auxiliar no entendimento das diversas modificações ocorridas após a implementação dessas normas, foi feito um estudo histórico e análise dos recursos tecnológicos aplicados em cada etapa.

Metodologia: As diretrizes Europeias voltadas para o controle da emissão de poluentes tiveram início em 1976, a união Europeia adotou a política de emissões 91/441/EEC, que ficou conhecida como EURO 1, em 1991. Enquanto no Brasil foi criado o PROCONVE, norma baseada na legislação americana quando se trata de veículos leves, sendo implementada a partir do ano de 1988 com a fase 1 (L1). Essas normativas geraram a necessidade de melhores recursos para controle de emissão de escape, assim, começou a ser utilizado o conversor catalítico, conhecido também como catalisador, nos veículos produzidos na união Europeia. No Brasil, esse recurso tecnológico foi implementado somente na segunda fase do PROCONVE (L2), em 1992 [4,5]. Na primeira fase o Brasil implementou recursos para melhorar o avanço de ignição e a recirculação dos gases de escape para minimizar a emissão de NO_x , mas a principal marca dessa fase foi o início do controle de emissões evaporativas.

Na EURO 2, implementada no ano de 1997, houve uma redução significativa em relação à emissão de NO_x e THC, sofrendo uma redução de 50% e 38% respectivamente. O aumento da rigidez na legislação demandou uma melhora na conversão do catalisador. Seguindo as perspectivas mundiais, o Brasil reduziu os limites máximos de emissão de poluentes, como consequência houve a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para alcançar esses limites. Os principais avanços foram a necessidade do uso do catalisador e o uso de carburadores assistidos eletronicamente.

Em 2001 a União Europeia (UE) iniciou uma nova etapa da legislação governamental, a EURO 3, que reduziu os limites de emissões e trouxe algumas mudanças em relação à legislação anterior. As principais modificações foram que a partir dessa diretriz não seria mais controlado o volume de NO_x e THC combinado, e sim, cada poluente de forma separada. Além de uma modificação do ciclo de condução para ensaios de homologação, eliminando o período de aquecimento do motor que tinha duração de 40s [4]. Enquanto no Brasil, iniciou-se no ano de 1997 a PROCONVE L3, que teve uma significativa redução nos limites de emissões de poluentes, alcançando uma redução de aproximadamente 58% do volume máximo de NO_x . O setor automotivo respeitando a legislação manteve aquecido as pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, destacando, por exemplo, a implementação do sensor de oxigênio (sonda lambda) [6].

A EURO 4 entrou em vigor no ano de 2006, com uma redução de 50% no limite de emissões do NO_x , essa redução foi igual para os veículos equipados com motor com ignição por centelha e motores com ignição por compressão. Enquanto no Brasil iniciou-se a quarta fase do PROCONVE, no ano de 2005, essa nova resolução do CONAMA na época, apresentou limites menores em alinhamento com as metas mais firmes contra a poluição do ar. As novas restrições impostas aos fabricantes e montadoras de veículos no Brasil e Europa, mais uma vez, impulsionaram o desenvolvimento de novas tecnologias. Assim, novas geometrias da câmara de combustão foram utilizadas buscando melhor aproveitamento da frente de chama [11].

A quinta fase das diretrizes europeias, EURO 5, apresentou uma redução de 25% para as emissões de NO_x para os motores de veículos leves a gasolina em relação à normativa anterior. Esta norma foi definida em conjunto com a próxima etapa, a EURO 6, referente ao regulamento nº 715/2007, no ano de 2011 entrou em vigor a quinta etapa [7]. A resolução Nº 315 do CONAMA aborda a fase L5 do PROCONVE e foi iniciada no ano de 2009, em linha com a fase anterior, a etapa priorizou a redução do NO_x e os hidrocarbonetos. Alcançando uma redução de 48% e 31% respectivamente. As inovações tecnológicas que foram necessárias para alcançar as metas proposta são análogas a L4, voltadas para a geometria da câmara de combustão e melhorias no sistema de injeção eletrônica [8].



A última versão da legislação europeia, a EURO 6, que iniciou em 2014 conta com diversas atualizações, que foram necessárias para corrigir algumas lacunas entre as emissões reais e oficiais. Essas atualizações são denominadas com letras, de “a” até “d”. A atualização mais recente, EURO 6d, se aplica a veículos fabricados a partir do ano de 2017. Dentre as atualizações, destaca-se a modificação do ciclo de condução para o WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure*) devido a uma defasagem do NEDC (*New European Driving Cycle*), que ocorreu na etapa 6c e a obrigatoriedade do ensaio de RDE (*Real Driving Emissions*) que ocorreu na última etapa, 6d [8]. A sexta resolução do PROCONVE teve início no Brasil em 2014 para novos modelos, ocorreu uma redução significativamente dos limites máximos a serem respeitados. No entanto, a última versão da PROCONVE a entrar em vigor foi a L7, sendo adotada a partir do ano de 2022. Essa versão apresenta mudanças significativas em relação à anterior, entre as principais alterações está o controle da emissão de hidrocarbonetos. Esse ocorre por meio do conceito de NMOG (*Non Methane Organic Gases*), sendo uma forma mais abrangente de medição. Outra mudança importante é que o limite máximo de emissões de NO_x deve ser controlado em conjunto com o NMOG, ou seja, o novo limite é para $\text{NO}_x + \text{NMOG}$, tomando como parâmetro a legislação americana. O controle de emissões evaporativas também passa a ser mais rigoroso, o ensaio com duração de 2h, nessa fase irá durar 48h, e o limite máximo de emissão para esse teste passou a ser de 0,5 g/teste. Durante o teste de durabilidade é necessário garantir o atendimento dos limites por um período maior que a versão anterior, sendo de 160.000 km ou 10 anos [9]. As legislações que estão em vigor no Brasil e na União Europeia exigiram novas propostas tecnológicas do setor automotivo que respondeu com a ampla aplicação de turbinas e a redução dos tamanhos dos motores, buscando uma melhor performance com menores emissões de poluentes, processo que ficou conhecido como downsizing [10].

Resultados e Discussão: Foram necessários diversos avanços tecnológicos para alcançar os limites estabelecidos pelas normas europeia e brasileira. A legislação da União Europeia embora tenha iniciado o controle de poluente antes de ser adotado a PROCONVE no Brasil, pois existiram algumas normativas pré EURO que foram adotadas durante a década de 80, nota-se que os limites máximos vigentes em cada local são similares. Os volumes atuais são bastante inferiores às primeiras versões da norma Europeia e Brasileira, alcançando uma redução dos limites máximos de emissão de monóxido de carbono de 96% e 63%, respectivamente.

Essa drástica redução no volume máximo permitido de emissão de poluente foi necessária para conter a contaminação atmosférica e melhorar a qualidade do ar. Em linha com essa necessidade, o setor automotivo desenvolveu diversas formas de controlar os gases presentes no escapamento dos veículos. Um dos recursos de maior destaque é o conversor catalítico, que através de uma reação termoquímica converte os gases tóxicos em gases inofensivos para o ser humano e o meio ambiente. Esse fenômeno ocorre através da adsorção que diminui a energia de ativação de uma reação química. O catalisador, como é conhecido, conta com metais nobres no seu interior que são responsáveis por esse processo.

Os avanços tecnológicos que foram implementados desde a década de 90, não param no catalisador. Foi desenvolvido a ignição mapeada eletronicamente, a injeção eletrônica, a utilização da sonda lambda, diversas modificações na geométrica da câmara de combustão, além de calibrações de motores cada vez mais robustas como mostrado na Figura 1. Os resultados desses avanços foram a obtenção de motores mais eficientes e com níveis de emissões baixos.

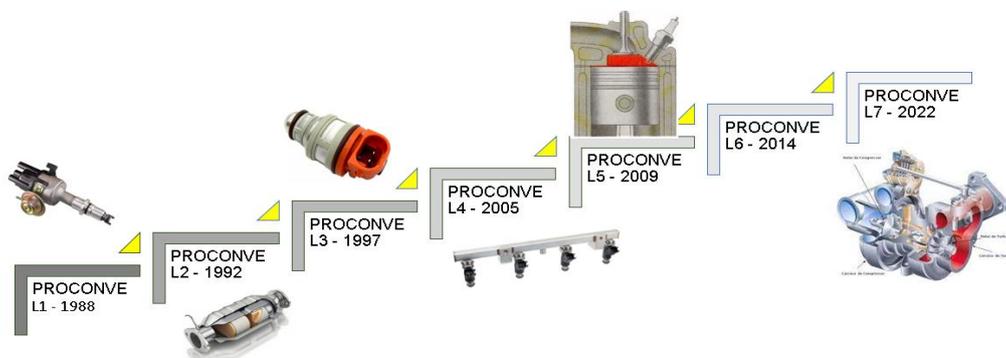


Figura 1- Evolução tecnológica – PROCONVE

Nota-se que as primeiras versões da PROCONVE apresentavam uma disparidade grande em relação à norma EURO. Isso se justifica devido a União Europeia adotar algumas medidas anteriores, chamadas de pré Euro. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, a diferença entre as normas estreitou-se, por exemplo, o limite máximo de emissões de CO da PROCONVE L1 era aproximadamente 8,5 vezes maior que a EURO 1 Como apresentado na Figura 2.

A última versão apresentou mudanças significativas, principalmente no controle de emissões do NO_x, que a partir do ano de 2022 é controlado considerando a soma com o volume de NMOG. Dentre as mudanças, destacou-se também os testes de durabilidade, em que os automóveis necessitam de atender os limites máximos de emissões após 160.000 km percorridos. Somado a isso, o ensaio de controle de emissões evaporativas passou a ter duração de 48h, além da inclusão da medição de emissões evaporativas durante o reabastecimento, chamado de ORVR (*On Board Refueling Vapor Recovery*).

Outro recurso que está sendo bastante utilizado pelos fabricantes para fornecer boa potência aos veículos com baixos níveis de emissões são os motores com injeção direta de combustível, ou seja, a injeção de combustível é feita diretamente dentro do cilindro, com isso a L7 exige que seja medido o valor de material particulado para esses motores. Essas diversas mudanças que ocorreram na norma são necessárias para alcançar as metas assumidas pelos países em busca da recuperação da camada de ozônio e a contenção do aquecimento global.

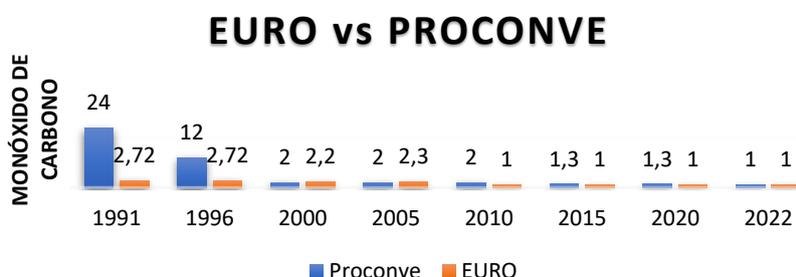


Figura 2 – Gráfico comparativo entre os limites de emissões de monóxido de carbono da norma EURO e PROCONVE.

Conclusão: As ações governamentais da União Europeia e Brasil apresentaram impactos significativos para o setor automotivo, que respondeu de forma positiva e foi capaz de gerar motores com bons níveis de desempenho e volumes de emissões baixos. No entanto, as consequências geradas pela ação antrópica durante os anos, necessitam de mais avanços tecnológicos e



diminuição ainda maior do volume de emissão. Contudo, os menores limites de emissões que são adotados em todo o mundo, representam um avanço significativo em busca da melhoria da qualidade do ar, a recuperação da camada de ozônio e a desaceleração do aquecimento global.

O Brasil implementou a PROCONVE de forma tardia se comparado à União Europeia, mas a postura adotada durante as diversas modificações colocou o país alinhado com os resultados alcançados pela Europa. O país também tem metas bem definidas para a próxima fase da norma, L8, que tem previsão de ser implementada no ano de 2025, o que mostra seu empenho com meio ambiente.

Referências:

[1] Wang, Yiyi, Lei Huang, Conghong Huang, Jianlin Hu, and Meng Wang. "High-resolution Modeling for Criteria Air Pollutants and the Associated Air Quality Index in a Metropolitan City." *Environment International* 172 (2023): 107752. Web.

[2] CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Plano de Controle de Poluição Veicular 2023 – 2025. Cetesb, 2022.

[3] Melo, Tadeu Cavalcante C. de; Loureiro, Luciana N.; Vicentini, Pedro C.; Santos, Ednardo Moreira; Almeida, José C. Souza; "Fator De Reatividade Dos Gases De Escapamento Para Formação De Ozônio -Metodologia E Resultados De Veículos Nacionais Com Gasolina e GNV", p. 569-574. In: Anais do XXI Simpósio Internacional de Eng. Automotiva. São Paulo: Blucher, 2014.

[4] Selleri, Tommaso, Anastasios D. Melas, Ameya Joshi, Dario Manara, Adolfo Perujo, and Ricardo Suarez-Bertoa. "An Overview of Lean Exhaust DeNOx Aftertreatment Technologies and NOx Emission Regulations in the European Union." *Catalysts* 11.3 (2021): 404. Web.

[5] Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis Avaliação dos impactos econômicos e dos benefícios socioambientais do Proconve/João Batista Drummond Câmara. Brasília: Edições Ibama, 2016. 106 p.

[6] IBAMA. Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – Proconve/Promot. 3. ed. Brasília: Ibama, 2011. 584 p. (Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes - Gestão Ambiental).

[7] União Europeia. Regulamento (ce) n.o 715/2007 do parlamento europeu e do conselho de 20 de junho de 2007. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELLAR:03e19ce5-448d-43dd-b49a-1c68d75c78f4>. Acesso em: 19 de outubro de 2023.

[8] de Meij, A.; Astorga, C.; Thunis, P.; Crippa, M.; Guizzardi, D.; Pisoni, E.; Valverde, V.; Suarez-Bertoa, R.; Oreggioni, G.D.; Mahiques, O.; et al. Modelling the Impact of the Introduction of the EURO 6d-TEMP/6d Regulation for Light-Duty Vehicles on EU Air Quality. *Appl. Sci.* 2022, 12, 4257.

[9] Companhia Ambiental do estado de São Paulo – CETESB. Informativo técnico N° 11/18/ETH/ET de 03 de dezembro de 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/12/17.pdf>. Acesso em 15 de outubro de 2023.

[10] Sonu Ram, SONU RAM, Raj Kumar Yadav, and Indraj Singh. "Combustion and Exhaust Emission Improvement in a 3-Cylinder Mphi Engine Through Downsizing." *U.Porto Journal of Engineering* 9.3 (2023): 194-208. Web.

[11] União Europeia. Directiva 2002/80/ce da comissão de 3 de outubro de 2002. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0080>. Acesso em: 18 de outubro de 2023.



Manutenção de mancais de rolamentos industriais com a aplicação de aprendizado de máquina

Paulo Brandão Júnior¹, Yukio Shigaki²

1 Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG

2 Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG

Resumo Expandido

Resumo:

Os rolamentos são elementos de máquina de suma importância ao meio produtivo, visto que, facilitam os processos rotativos através da diminuição dos coeficientes de atrito. Porém, esses elementos apresentam um grande impacto em relação as suas manutenções, pois não demonstram indícios gradativos de falhas, sendo necessário a elaboração de sistemas de análise. Dessa forma, este trabalho possui como objetivo a execução de aprendizado por classificação multiclasse, utilizando redes neurais. Os classificadores são provenientes da execução do algoritmo kmeans. Foram executados os modelos de aprendizado por clusterização (Kmeans) e com os rótulos dos dados será elaborado vários modelos de classificação por RNA. Nesses modelos serão testados a influência das funções de ativação, do número de neurônios nas camadas, das métricas de perda e dos otimizadores que são utilizados no processo. Através do modelo de classificação e análise da quantidade de classificações por classe será possível construir um sistema de supervisão para análise de falha dos rolamentos em estudo. Os próximos passos se baseiam na obtenção de novos dados e verificação da quantidade de classes para observar a tendência dos dados.

Palavras-chave: Machine Learning; Digital Twin; Rolamentos.

Introdução

Sistema de Rolamentos

Rolamentos são equipamentos que permitem, operando com baixo atrito, o movimento rotacional relativo entre elementos unidos. Em relação aos seus tipos, são classificados, principalmente, quanto aos seus elementos rolantes, podendo ser esféricos, de rolos cilíndricos, de rolos cônicos e de agulhas (MARGHITU; DUPAC, 2019).

Segundo Wallin (1967), após um certo período de tempo suportando cargas, os rolamentos podem falhar por fadiga sendo necessário sua troca. Um dos meios para manutenção preventiva é a aplicação de graxas lubrificantes, com o intuito de diminuir o atrito, entretanto, quanto maior a carga em que o elemento de máquina estiver exposto mais rapidamente a graxa lubrificante se oxidará, devido as altas temperaturas, diminuindo assim sua vida útil. Quatro aspectos são



importantes a serem observados para realização de manutenção, que são: variações de temperatura, vibração, ruído e mudanças no lubrificante.

Os rolamentos são elementos de máquina amplamente estudados para se obter um meio eficaz de prever falhas, visto que esses componentes são um dos principais causadores de falhas em máquinas rotacionais (CERRADA et al., 2018). Monavar, Ahmadi e Mohtasebi (2008), realizaram um estudo de aplicação de manutenção preditiva através da análise vibracional do sistema. Os estudos mostraram que o rolamento danificado apresenta um forte impacto no espectro vibracional do sistema, indicando uma possível falha do componente.

Porém, a análise de frequências dos rolamentos pode não ser completamente precisa na predição da sua condição devido a algumas limitações, como a dificuldade na detecção de ruídos iniciais que indicam falhas, devido à presença de ruídos de fundo provenientes do processo e do equipamento (ZHONG et al., 2018). Por isso, é necessário o uso de técnicas computacionais avançadas, como o aprendizado de máquina, para a detecção e seleção dos dados apropriados para a análise de falhas em rolamentos. Essas técnicas permitem a identificação e interpretação precisa dos sinais de vibração dos rolamentos, contribuindo para a manutenção preditiva mais eficiente e confiável.

Controle de elementos de máquina utilizando inteligência computacional

O avanço tecnológico e o crescimento dos conceitos da indústria 4.0 estão aprimorando alguns processos industriais já consolidados, otimizando o controle e a qualidade. Tal avanço tecnológico proporciona um crescimento na geração de dados processuais que podem ser utilizados para observar o histórico de comportamento e prever o comportamento futuro. Com a facilidade e o crescimento do monitoramento produtivo, as tecnologias da indústria 4.0 contribuem para as manutenções no tempo correto, reduzindo as ocorrências de paradas produtivas inesperadas, através da predição de falhas proporcionadas pela análise e processamento dos dados coletados. Naqvi et al. (2022), utilizaram da tecnologia de digital twin (DT) em códigos de ordens de manutenção de escavadeiras de mineração e observaram a influência que essa tecnologia proporciona para a fabricação, uso do produto e manutenção, através do suporte para tomada de decisões. Além disso, o DT contribuiu para o controle inteligente, centrado na predição de falhas.

Digital twin (gêmeo digital) é uma tecnologia que possui a funcionalidade de executar de forma virtual um processo real, com o objetivo de analisar, controlar e melhorar o desempenho dos processos reais. Seu princípio de funcionamento se baseia na obtenção de dados de uma fonte física, manipulação desses dados através do processo virtual criado, geração de informações e devolução dessas para o meio físico (GRIEVES; VICKERS, 2017).

Uma das principais vantagens do DT é a capacidade de coletar e analisar dados em tempo real, permitindo tomada de decisão de forma mais dinâmica, realização de previsões e otimizações que aprimorem o desempenho e a eficiência do processo representado. Nesse sentido, o machine learning (Aprendizado de Máquina) desempenha um papel fundamental, pois é uma técnica computacional que permite que os sistemas analisem grandes conjuntos de dados, identifiquem padrões e aprendam com eles. Assim, o machine learning pode ser aplicado aos dados coletados pelo DT, possibilitando a criação de modelos preditivos cada vez mais precisos e sofisticados, capazes de fornecer informações valiosas para a tomada de decisões e aprimoramento contínuo do objeto ou processo representado (RITTO; ROCHINHA, 2021).

O machine learning (ML) é um ramo de evolução dos algoritmos computacionais, projetados para reproduzir as funções de inteligência e tomadas de decisões humanas. Tratam-se de técnicas que podem utilizar procedimentos estatísticos para predição de algum evento, além de influências de outras áreas do conhecimento como Inteligência artificial, probabilidade e estatística, ciência da computação, psicologia e filosofia (EL NAQA; MURPHY, 2015; BISHOP, 2006; SHRESTHA; KRISHNA; KROGH, 2021). O ML representa a capacidade dos sistemas de aprenderem o



comportamento dos dados como um todo, através de dados de treinamento, sem a necessidade de codificações ou programações, retornando aos usuários a probabilidade do acontecimento de determinado evento (BISHOP, 2006; JANIESCH; ZSCHECH; HEINRICH, 2021; MAHESH, 2020).

O presente trabalho propõe-se a desenvolver um *digital twin* do sistema de rolamentos de um redutor de um laminador acabador de barras através da utilização de *machine learning* para predição de falhas do modelo físico.

A hipótese que será estudada é que o aumento de resistência à rotação devido a falha dos rolamentos exigirá um aumento de torque por parte do motor, consumindo maior corrente do sistema. Portanto, a corrente do motor pode ser um indicador de falha nos rolamentos dos mancais.

Metodologia

Este trabalho está em desenvolvimento junto a siderúrgica Gerdau - Barão de Cocais com o objetivo de sanar um problema referente a falha prematura dos mancais de rolamento de um redutor acoplado em um laminador acabador de perfis.

Para o desenvolvimento do modelo de aprendizagem será utilizado o software R e bibliotecas padrões, assim como as bibliotecas cluster, fpc, factorextra, keras e tensorflow. A corrente será considerada como variável resposta para a realização da modelagem preditiva.

A seguir será apresentado todos os passos que serão realizados para obtenção dos resultados:

Primeiramente foi utilizado aprendizado por clusterização para identificar os grupos pertinentes aos dados, para isso o algoritmo k-means foi executado. A ideia da utilização desse modelo é identificar grupos de dados, que se tornarão supervisores em relação aos novos dados que serão testados no sistema e que possam identificar possíveis anormalidades atreladas a falha dos rolamentos dos mancais.

Com os dados rotulados, foi executado um modelo de aprendizado do tipo supervisionado para classificação. O método utilizado foi por redes neurais artificiais (RNA), ao qual vários parâmetros foram testados, assim como suas combinações, com o intuito de otimização.

Em relação ao modelo Kmeans, os interparâmetros utilizados foram quantidade de centros dos clusters igual a quatro, número de interações igual a dez, número inicial de clusters igual a quatro e o método Hartigan-Wong (seleciona os centros de forma aleatória e refina de forma iterativa, de modo que minimize a soma dos quadrados das distâncias entre os centros e os pontos).

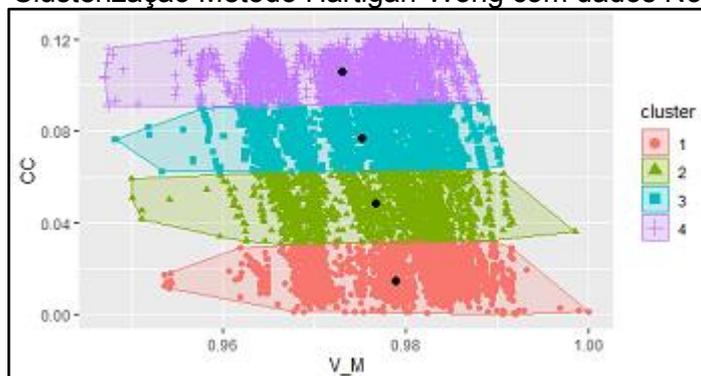
Para os modelos por RNA os interparâmetros utilizados foram quantidade de camadas e de neurônios por camada, tipo de funções de ativação, função de erro aos quais os pesos serão calculados, função de otimização, quantidade de épocas de treinamento e quantidade de épocas para atualização dos pesos.

Resultados preliminares

Em relação ao agrupamento dos dados utilizando k-means e o método Hartigan Wong se manteve bem definido. É interessante observar na figura 1 os patamares em que os grupos se mantiveram em relação a variável corrente, visto que, o grupo superior pode ser utilizado como indicador de falha, pois, a hipótese levantada indica que a falha nos rolamentos implica em maior consumo de corrente por parte do motor.



Figura 1 - Clusterização Método Hartigan-Wong com dados Normalizados



Conclusões

Foram executados os modelos de aprendizado por clusterização (Kmeans) e com os rótulos dos dados será elaborado vários modelos de classificação por RNA. Nesses modelos serão testados a influência das funções de ativação, do número de neurônios nas camadas, das métricas de perda e dos otimizadores que são utilizados no processo.

Através do modelo de classificação e análise da quantidade de classificações por classe será possível construir um sistema de supervisão para análise de falha dos rolamentos em estudo.

Os próximos passos se baseiam na obtenção de novos dados e verificação da quantidade de classes para observar a tendência dos dados.



Referências Bibliográficas

- BISHOP, C. M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 2006.
- CERRADA, M.; SÁNCHEZ, R. V.; LI, C.; PACHECO, F.; CABRERA, D.; VALENTE DE OLIVEIRA, J.; VÁSQUEZ, R. E. A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. [S.l.], v. 99, p. 169-196, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.012>. Acesso em: 30 jun. 2022.
- EL NAQA, I.; MURPHY, M. J. What Is Machine Learning?. *Machine Learning in Radiation Oncology*. P. 3-11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18305-3/textundertextscore1>. Acesso em: 23 Fev. 2023.
- GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: KAHLLEN, J.; FLUMERFELT, S.; ALVES, A. (eds) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. p. 85-113. Cham: Springer, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7/textundertextscore4>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- JANIESCH, C.; ZSCHECH, P.; HEINRICH, K. Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*. V. 31, p. 685-695, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>. Acesso em: 23 Fev. 2023.
- MAHESH, B. Machine Learning Algorithms - A Review. *International Journal of Science and Research*. V. 9, p. 381-386, 2020. Disponível em: <https://www.ijsr.net/gettextundertextscoreabstract.php?paper/textundertextscoreid=ART20203995>. Acesso em: 23 Fev. 2023.
- MARGHITU, D. B.; DUPAC, M. Chapter Four - Rolling bearings. *Machine Component Analysis with MATLAB*. Oxônia: Butterworth-Heinemann, p. 141-166, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804229-8.00009-8>. Acesso em 27 jun. 2022.
- MONAVAR, H. M.; AHMADI, H.; MOHTASEBI, S. S. Prediction of Defects in Roller Bearings Using Vibration Signal Analysis. *World Applied Sciences Journal*. [S.l.], v. 4, ed. 1, p. 150-154, 2008. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Prediction-of-Defects-in-Roller-Bearings-Using-Monavar-Ahmadi/9aac8b5698be78259e278388f3c08493781aa779>. Acesso em: 30 jun. 2022.
- NAQVI, S. M. R. GHUFRAN, M.; MERAGHNI, S.; VARNIER, C.; NICOD, J. M.; ZERHOUNI, N. Human knowledge centered maintenance decision support in digital twin environment. *Journal of Manufacturing Systems*. V. 65, p. 528-537, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.10.003>. Acesso em: 15 fev. 2023.
- RITTO, T. G.; ROCHINHA, F. A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. V. 155, p. 1-16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107614>. Acesso em: 28 Fev. 2023.
- SHRESTHA, Y. R.; KRISHNA, V.; KROGH, G. V. Augmenting organizational decision-making with deep learning algorithms: Principles, promises, and challenges. *Journal of Business Research*. V. 123, p. 588-603, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.068>. Acesso em: 23 Fev. 2023.
- WALLIN, E. Preventive Maintenance of Rolling Bearings. *Industrial Lubrication and Tribology*. V. 19, p.110-116, 1967. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/eb052823>. Acesso em: 01 Março 2023.
- ZHONG D.; Yi, C.; XIAO, H.; ZHANG, H.; WU, A. A Novel Fault Diagnosis Method for Rolling Bearing Based on Improved Sparse Regularization via Convex Optimization. *Complexity*. V. 2018, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/2169364>. Acesso em: 08 Março 2023.



Condições Críticas de Operação de Plataformas Elevatórias Móveis de Trabalho (PEMT) na Construção Civil e na Indústria

(0009-0005-3947-6633) DAVID, EDUARDO CASSIANO SANTOS^a,
(0000-0001-6793-9926) MOTTIN, ARTUR CARON^a

^aCentro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Mecânica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Palavras-chave: construção enxuta; mecanização construção civil; plantas industriais; plataformas elevatórias; trabalho em altura.

Resumo Expandido

As condições de trabalho em canteiros de obra nem sempre são as mais favoráveis para os trabalhadores. Nestas condições, as instalações estão sendo criadas e não há, por exemplo, definição clara das vias de movimentação de equipamentos, materiais ou trabalhadores, dentre outras definições de infraestrutura e sistemas de proteção coletiva. A viabilidade financeira de grandes empreendimentos, que se tornarão grandes canteiros de obras, normalmente se dá próximo a centros urbanos onde os terrenos são escassos e conseqüentemente caros. Faz-se necessário o adensamento do projeto com a verticalização das estruturas para reduzir a demanda de terrenos. Estruturas verticalizadas requerem medidas de proteção e segurança para elevação de cargas e de pessoas. Tais medidas são vitais para o sucesso da conclusão dos empreendimentos de maneira eficiente, rápida e segura. No Brasil predomina a baixa mecanização nos canteiros de obra, mesmo caso de países pobres e em desenvolvimento, devido ao elevado custo das máquinas e equipamentos e baixo valor da mão de obra não qualificada.

A construção civil movimentou anualmente em 2019 44,84 bilhões de toneladas de minerais não metálicos, representando 46,62% de todos os materiais primários movimentados pelo mundo [1]. Esse dado mostra o quão significativa é a atividade econômica deste setor. Qualquer variação deste setor implica em significativo impacto para a economia mundial, haja vista as atuais preocupações e volatilidade das bolsas mundo a fora com as notícias de gigantes do segmento como a *Evergrande Real Estate Group*. Esta é a segunda maior empresa de incorporação imobiliária da China em vendas, tornando-a o 122º maior do mundo em receita, de acordo com a lista Fortune Global 500 de 2021, e divulgou dívidas de R\$1,7 trilhão neste mesmo ano. O setor imobiliário é responsável por aproximadamente 1/3 do PIB Chinês [2], atualmente a 2ª economia da terra [3]. O impacto que a *Evergrande* pode gerar mundialmente é um fenômeno comparável com o dos títulos imobiliários *sub prime* que ocorreu nos Estados Unidos desencadeando a crise de 2007 com a súbita queda das bolsas americanas e que culminou com a quebra de vários bancos como *Lemam Brothers*. Por outra perspectiva, a manutenção ou aumentos, mesmo que tímidos, do segmento da construção civil é benéfica para a economia, especialmente de países emergentes como o Brasil.

Toda a atividade econômica de construção e operação, seja da construção civil ou industrial, executada acima de 2 metros em desnível é considerada trabalho em altura segundo diretrizes da Norma Regulamentadora 35 [4]. Grandes empreendimentos necessariamente implicam em verticalização, que é uma tendência para otimização de espaços, principalmente em grandes



centros urbanos onde há escassez de terrenos e demandam regulamentações trabalhistas como as Normas Reguladoras do Ministério do Trabalho. Em se tratando de construção civil, onde o pé direito padronizado mínimo é de 2,5 metros de altura [5] e de 3,0 m mínimo segundo requisitos da Lei 6.514/1977 em seu artigo 171 da CLT, não há como fugir dos procedimentos e ao risco de trabalho em altura. Assume-se então que, o risco do trabalho em altura é inerente à atividade de construção, operação e manutenção sendo, portanto, um aspecto mandatório desde o início da concepção de empreendimentos e deve ser tratada com seriedade e o respeito ao indivíduo que dela fará parte.

Para se garantir que as atividades de construção em altura sejam executadas de maneira segura, diversos dispositivos e equipamentos devem ser utilizados para minimizar os riscos e as possibilidades de acidentes. Podem-se citar técnicas de escalada com uso de cordas, escadas, andaimes, equipamentos especializados como Plataformas Elevatórias Móveis de Trabalho – PEMT e veículos adaptados tipo carros e helicópteros. Neste universo de possibilidades de trabalho estão as PEMT, assim definidas pela Norma Reguladora 18 [6] e normatizadas pela NBR 16776 [7]. As PEMT são máquinas destinadas ao posicionamento de pessoas, suas ferramentas e materiais necessários no local de trabalho consistindo de um cesto com comandos, estrutura extensível e um chassi. As PEMT são constituídas de elementos rodantes como rodas ou esteiras, um chassi que abrida o sistema motriz, o motor, o banco de baterias, sistema de potência que atua na elevação e na translação, podendo ser elétrico, hidráulico ou mecânico, do sistema de levantamento, que pode ser pantógrafo em forma de tesouras, telescópico ou articulado, e o cesto aéreo de carga. Em algumas configurações há ainda sistemas de estabilização com patolas, devido sua pequena área de base, tornando a razão de aspecto altura x base, desproporcional. As PEMT podem ser operadas de dentro do cesto, por fora ou remotamente o que define seu tipo dentro da norma [7]. Seu emprego é muito diverso e aplicado sempre que há necessidade de atuação rápida ou em substituição a estruturas provisórias de acesso como andaimes. As PEMT do tipo pantográfica atuam linear e verticalmente não alterando, ou muito pouco no caso dos cestos expansíveis, sua projeção no solo. Possuem alcance vertical de até 17 metros. As plataformas articuladas e telescópicas tem a capacidade de alcançar estruturas posicionadas sobre pisos muito altos através de superfícies fora da projeção desta cobertura, seja por baixo ou cima. Estes tipos de plataformas são muito instáveis, pois projetam a carga e operador para distâncias altas em relação sua base. Podem alcançar alturas de elevação de até 58,6 m de altura ou de avanço.

Com diversos modelos e capacidades de carga, as PEMT's tem fundamental importância nos canteiros de obras de qualquer tamanho e são fundamentais para garantir segurança dos operadores e dos trabalhadores no entorno das atividades em altura e a eficiência no processo de construção. Segundo Mark Keily [8], presidente do comitê internacional de segurança da *International Power Access Federation* (IPAF), as plataformas aéreas são uma das formas mais seguras de trabalhar em altura. Segundo Guisoli [9], as PEMT perdem apenas para os elevadores prediais em termos de segurança de operação, mesmo que sejam elevadores temporários. Os elevadores são considerados os meios de transporte mais seguro do mundo, superando a aviação, porém com limitações comprobatórias devido ao acesso às estatísticas relacionadas a esse meio de transporte.

Apesar de uma previsão de redução da atividade econômica do mercado nacional de 12% para 2023 para a venda de máquinas e equipamentos, segundo Revista M&T [10], há uma previsão secundária em *short run* da retomada para 2025. Em 2022, comparado a 2021, houve um crescimento de 21% nas vendas. Pode-se associar esse alto crescimento a uma demanda retraída pela pandemia do COVID-19. Em 2022 ainda havia uma projeção na redução do crescimento para 4%, o que foi frustrado pela última pesquisa quando comparada com a penúltima pesquisa do primeiro semestre de 2019. Estas incertezas estão ligadas ao cenário político e faz parte de um ciclo de incertezas devido a mudanças significativas do cenário político que afetam a economia localmente. Os estudos de mercado mostram ainda que alguns



segmentos possuem tendência de alta, como é o caso da locação, mineração, agricultura e obras de pequeno porte. Todos esses segmentos com alta relação com trabalho em altura. Especificamente para PEMT há uma previsão de aumento de 33% (5.980 unidades) nas vendas ainda em 2023. Para 2024, o crescimento das vendas previsto é de 9% (6.500 unidades). Com esta previsão de aceleração no segmento de PEMT's, fica enfatizada a demanda de esforços para se ampliar as políticas de aplicação, métodos de segurança em operação, eficiência nos canteiros de obras e novas aplicações de PEMT's. O objetivo geral deste trabalho é extensão de aplicação de PEMT pantográficas em condições externas não previstas nas configurações disponibilizadas pelo mercado. Uma vez definida a demanda de mercado, foram comparados os cenários, brasileiro e internacional em termos de características de acidentes com o uso de PEMT's através do relatório da IPAF com os dados fornecidos pelo Ministério do Trabalho através do Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho em parceria com a SmartLab [11]. Estes dados comportamentais de operação e de danos causados, seja nos equipamentos ou aos usuários, poderão ser utilizados como parâmetros de controle em diversas etapas do ciclo de vida e operação das PEMT's. Exemplifica-se, DFMEA, aspectos gerais de projeto, procedimentos de operação, treinamento, lista de verificação do equipamento, diálogo de segurança diário, precificação, marketing, entre outros. O objetivo específico deste trabalho é caracterizar as condições críticas de operação de PEMT do tipo pantográfica e que permita a este tipo de plataforma maior abrangência de aplicações, mantendo os requisitos de segurança.

As plataformas pantográficas tem característica de boa manobrabilidade e de bom trabalho em espaços reduzidos. Não requer tempo de montagem como andaimes, permitindo uma intervenção rápida nas atividades. Apresentam uma gama diversa de opções que variam de acesso individual ou de múltiplos trabalhadores com alcance variando de 7 a 17 metros de altura, dependendo do modelo. É recomendada principalmente para uso interno e tem uma característica de acesso totalmente vertical durante a elevação, sem aumento de sua área projetada, assim como nos elevadores prediais. É um equipamento simples que conta com poucos elementos móveis, podendo-se citar giro e esterçamento das rodas e as articulações do pantógrafo. Majoritariamente são movidas por motores elétricos a bateria, podendo ser conectado à rede, e com modelos dotados de motor a combustão para canteiros de obra sem infraestrutura. As recomendações normativas de [4, 6, 7, 12, 13, 14 e 15] sugerem limitações de operação para inclinação máxima de 5 graus ou 0,88% gradabilidade, termo usado por fabricantes para caracterizar a rampa máxima de operação e com origem do inglês *gradability*. Para ampliar as condições de operação, fabricantes adotam sistemas de nivelamento através de patolas hidráulicas que permitem as plataformas pantográficas alcançarem 21 graus ou 40% de gradabilidade. Essa condição de rampa não será encontrada em ambientes internos, o que lava os fabricantes a adotar mais sistemas auxiliares como tração em todas as rodas, entre outros para operação ao ar livre e em ambiente não pavimento. Mesmo com recursos que permitam a ampliação de seu uso, as plataformas pantográficas disponíveis no mercado ainda possuem limites críticos de operação. O maior exemplo é a mobilidade enquanto o cesto estiver elevado, principalmente em rampas que demandem o uso das sapatas hidráulicas de nivelamento que removem o contato das rodas com o solo. As variáveis críticas a serem observadas para a operação, projeto e aplicação das plataformas pantográficas em condições externas e não pavimentadas são apresentadas a seguir.

- Gradabilidade – Capacidade de superação de rampas mantendo o nível do cesto nesta condição;
- Altura de trabalho – altura na qual os trabalhadores e cargas podem alcançar;
- Tração – Capacidade tratativa, normalmente localizada em 1 dos eixos e podendo ser ampliada para o segundo eixo;
- Propulsão – Para ambientes internos é feita por motores elétricos alimentados por baterias que não apresentam emissão de gases tóxicos. Nas condições externas podem ser elétricos com banco de baterias maior para permitir maior autonomia, mas em sua maioria com motor a combustão eu independe de infraestrutura elétrica;



- Aceleração – A aceleração provida pelo sistema de tração deve ser de tal ordem que permita o CG da plataforma, em qualquer ponto de elevação, entrar em movimento em conjunto com a base sem gerar momento inercial que provoque o levantamento das rodas do solo;
- Manobrabilidade – Característica que permita a plataforma de girar e transladar em espaços limitados e com o mínimo de manobras possível;
- Nivelamento – garantir que o cesto esteja sempre dentro do limite de 5 graus de inclinação;
- Altura do solo – menor dimensão entre pavimento plano e a estrutura da plataforma;
- Ângulo de ataque – Capacidade de superar obstáculos à frente sem que haja contato da estrutura da plataforma;
- Ângulo de fuga – Capacidade de sair do obstáculo superado sem que haja contato da estrutura da plataforma na parte de trás;
- Ângulo de dorso – Vão entre os eixos que permita a livre passagem do obstáculo sem contato com a estrutura da plataforma;
- Inclinação longitudinal – ângulo formado pelo pavimento e o plano do cesto no sentido de movimento longitudinal, maior dimensão do plano;
- Inclinação lateral ou transversal – ângulo formado pelo pavimento e o plano do cesto no sentido transversal, menor dimensão do plano;
- Diâmetro do pneu – o diâmetro do pneu deve possuir diâmetro que permita o rolamento sobre obstáculo equivalente ao agregado graúdo para concreto intermediário de 25 mm. O pneu deve ainda ser maciço e ter desenho de banda para maximizar tração. Alternativamente, em caso de alta demanda de força trativa, os pneus poderão ser substituídos por esteiras;
- Capacidade de carga – adota-se como padrão o peso de trabalhador de 80 kg e conjunto de ferramentas e material de 40 kg. Para os cálculos de estabilidade, fatores de majoração e homologação da ordem de 1,33 e 1,5 vezes deverão ser utilizados;
- Sistema de nivelamento – recurso capaz de alterar o ângulo do plano do cesto mantendo-o na horizontal. Haverá sempre um ângulo limite em função da altura do cesto e da posição dos pontos de apoio no solo, pneus ou patolas ou esteira;
- Sistemas de segurança auxiliares – são dispositivos ativos ou passivos que contribuam para a estabilidade da plataforma, como lastros e extensões de patolas;
- Estabilidade estática – manutenção do centro de gravidade dentro dos limites de capotamento com a plataforma parada;
- Estabilidade dinâmica – manutenção do centro de gravidade dentro dos limites de capotamento com a plataforma acelerada ou em movimento uniforme;
- Variáveis do solo – a variável solo deverá sempre ser avaliada, pois pode alterar de maneira lenta ou súbita a estabilidade da plataforma. Não havendo conhecimento do solo, o mesmo deverá ser tratado como areia e cálculo de área de sapata em função da carga total da plataforma deverá ser efetuado;
- Condições de contorno para estabilidade – para o cálculo de estabilidade das plataformas, fatores externos podem ter significativa influência e, portanto, devem ser levadas em consideração os quais se podem citar forças de vento a uma pressão de 100 N/m² (0,0145 psi), com base em uma velocidade do vento de 12,5 m/s, forças manuais como fator de majoração de 110 kg, altura e posição do CG da plataforma carregada, limite para tombamento dos apoios onde as linhas podem ser tomadas em um ponto no contato do pneu com o solo a uma distância de 25 % a partir da borda externa da largura de contato com o solo, as deformações mecânicas estáticas e condição de aclave em deslocamento.



O mapeamento destas grandezas e sua influencia na estabilidade das plataformas pantográficas é alvo de estudo que segue em desenvolvimento.

Ao final deste estudo será possível aprimorar nos novos projetos de plataformas pantográficas sistemas que lhe permitam operar em condições atualmente não disponíveis no mercado, mantendo suas características únicas e principais de manobrabilidade e ascensão puramente vertical.

Referências bibliográficas:

[1] Material Flows. **Raw Material Profile for non-metallic minerals**. Disponível em: <https://www.materialflows.net/visualisation-centre/raw-material-profiles/> Acesso em: 23 de outubro de 2023.

[2] Santander. **Economia na China: Indicadores econômicos**. Disponível em: <https://santandertrade.com/pt/portal/analise-os-mercados/china/economia#:~:text=Principais%20setores%20econ%C3%B4micos,e%20consumidores%20de%20produtos%20agr%C3%ADcolas> Acessado em 23 de outubro de 2023.

[3] Banco Mundial. **Economy: Overview**. Disponível em: <https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/themes/economy.html> Acessado em 23 de outubro de 2023.

[4] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 35 – Trabalho em Altura**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-35-nr-35>. Acesso em: 23 out. 2023.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, p. 98. 2021.

[6] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 18 – Segurança e Saúde no Trabalho na Indústria da Construção**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-18-nr-18>. Acesso em: 23 out. 2023.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16776: Plataformas elevatórias móveis de trabalho (PEMT) — Projeto, fabricação, manutenção, requisitos de segurança e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 91. 2020.

[8] IPAF. **Relatório Global de Segurança 2023**. Disponível em: <https://www.ipaf.org/sites/default/files/2023-09/Relat%C3%B3rio%20Global%20de%20Seguran%C3%A7a%20da%20IPAF%20de%202023%20%28PU-1163-0623-1-pt%29.pdf> Acesso em 23 de outubro de 2023.



[9] GUI SOLI, Cláudio H. **Elevador Descomplicado**. 1a Edição. Belo Horizonte: Promove Artes Gráficas e Editora, Outubro 2021.

[10] Revista M&T. **Setor projeta desaceleração das vendas no ano**. Disponível em: <<https://revistamt.com.br/Materias/Exibir/setor-projeta-desaceleracao-das-vendas-no-ano>> Acesso em: 23 de outubro de 2023.

[11] Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho. **Áreas prioritárias e análise comparativa**. Disponível em: <https://smartlabbr.org/sst/localidade/0?dimensao=prioritarias> Acesso em: 23 de outubro de 2023.

[12] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 11 – Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-11-nr-11>>. Acesso em: 23 out. 2023.

[13] BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-12-nr-12>>. Acesso em: 23 out. 2023.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16092: Cestas aéreas - Especificações e ensaios**. Rio de Janeiro, p. 56. 2018.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14768: Guindastes - Guindastes articulados hidráulicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 112. 2021.



Verificação de ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida considerando as não linearidades do sistema

Guilherme Viana¹ (<https://orcid.org/0009-0007-9529-9162>) e Cristina Magalhães² (<https://orcid.org/0000-0001-6427-5941>)

1 (Laboratório de Simulações Numéricas, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG)

2 (Laboratório de Simulações Numéricas, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG)

Resumo: Estruturas em aço são utilizadas em máquinas de grande porte existentes no setor de bens primários. Para a construção de tais estruturas é necessário a conexão entre os perfis estruturais e, um dos principais modos de conexão é através da ligação parafusada entre os componentes. Este trabalho apresenta um estudo do comportamento estrutural das ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida. O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de um modelo numérico considerando as não linearidades do sistema, validado através de testes experimentais, para comparação com as metodologias analíticas sugeridas por normas a fim de avaliar as principais divergências entre o dimensionamento pelo método dos elementos finitos e pelos métodos normativos sugeridos pelo EUROCODE 3 (2005) e pela NBR 8800 (2008). Através dos diferentes modelos avaliados, com variação das dimensões de chapa e dos parafusos, pode-se levantar as principais divergências e pontos de atenção dos métodos normativos, além de se avaliar os modos de falha das ligações, os momentos máximos resistentes e a presença do efeito alavanca em alguns tipos de ligações estudados.

Palavras-chave: Efeito alavanca; EUROCODE 3; Ligações parafusadas, Método dos elementos finitos, NBR 8800.

Introdução: As estruturas de aço são comumente utilizadas em construções civis, máquinas de grande porte e galpões industriais. Para a construção de estruturas em aço é necessário que perfis metálicos sejam conectados e, para isso, são utilizadas soldas, rebites e parafusos.

Durante o projeto estrutural, as análises convencionais pressupõem um conjunto de barras unidimensionais (representando os perfis metálicos) interligadas por elementos nodais, sendo essas ligações representadas como pontos completamente rígidos ou flexíveis.

As ligações completamente rígidas indicam que os conectores (soldas, rebites, parafusos, chapas de ligação, etc.) transmitem todos os esforços entre os elementos e que existe continuidade rotacional entre os perfis conectados, ou seja, o ângulo entre dos perfis se mantém o mesmo independente da força aplicada. Por outro lado, as



ligações flexíveis aceitam a variação angular entre dois perfis durante a aplicação de forças externas, caracterizando uma região sem continuidade rotacional.

A principal maneira de descrever e classificar o comportamento da ligação é através da relação momento-rotação, analisando a rotação relativa entre os elementos e o momento fletor atuante no sistema. Quanto menor o deslocamento angular de uma ligação, para um dado momento aplicado, maior sua rigidez e, a partir dessa observação surge o conceito de rigidez rotacional.

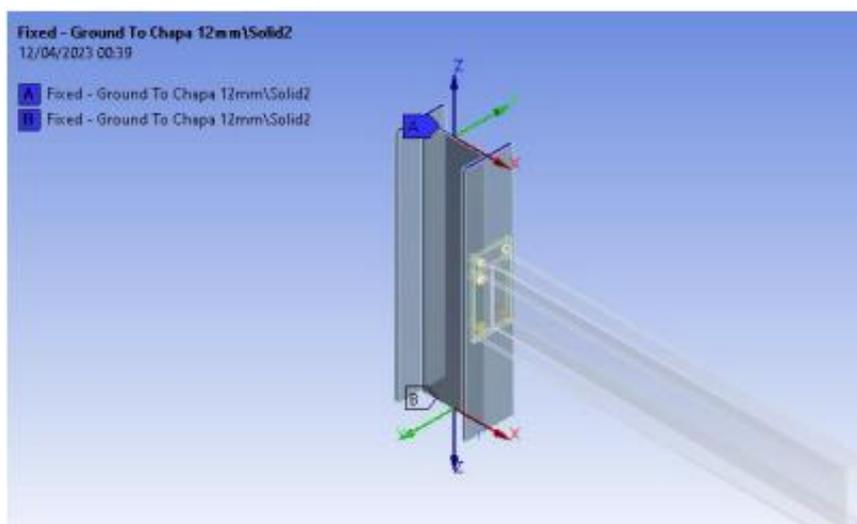
Levando em conta o conceito de rigidez rotacional a norma EN 1993-1 (EUROCODE 3) propõe uma classificação determinando limites para se considerar uma ligação rígida ou flexível.

Metodologia: A metodologia de cálculo apresentada no EUROCODE (2005), foi proposta em 1993 e posteriormente sofreu alterações até chegar no conceito atual. O modelo mecânico de cálculo considera o comportamento de cada componente individualmente, para então explicar o comportamento global da ligação. Esta metodologia também é conhecida como método dos componentes e, segundo MENDES (2017) neste método os componentes são representados por molas translacionais, podendo ser linear ou não linear, formando sistemas capazes de simular o comportamento momento x rotação das ligações.

Para a verificação através do método dos elementos finitos, os modelos foram desenvolvidos em *software* CAD3 (elementos sólidos), para que sejam obtidos resultados mais fiéis ao comportamento real das ligações avaliadas.

Durante a aplicação das condições de contorno, considerou-se as não linearidades devido ao contato entre os diferentes corpos e devido ao comportamento dos materiais considerados para chapas, parafusos e perfis estruturais. Além disso, as restrições do modelo foram aplicadas nas extremidades da coluna (Figura 1), impedindo o movimento da estrutura e evitando interação entre as restrições e a região de interesse do estudo. Por fim, foram aplicadas cargas de protensão nos parafusos, conforme recomendado na NBR 8800 (2008), e cargas para o deslocamento vertical da extremidade livre da viga ligada a coluna.

Figura 1: Restrições de movimento aplicadas na coluna



Fonte: Do próprio autor

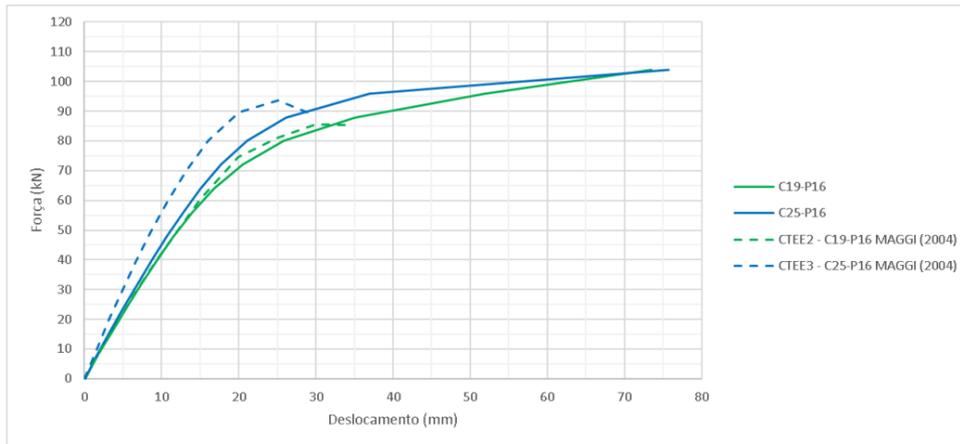


Após o desenvolvimento do modelo, aplicação das condições de contorno e das cargas, o modelo foi validado através da comparação com ensaios experimentais desenvolvidos em outras pesquisas (MAGGI 2004 e BERGAMASCO 2012).

Resultados e Discussão: O estudo realizou a verificação de ligações com diversas configurações diferentes, variando a espessura das chapas e diâmetro dos parafusos. Os modelos com parafusos de 16 mm foram de extrema importância, visto que alguns deles podem ser comparados e validados a partir dos resultados experimentais obtidos por MAGGI (2004).

A Figura 2 apresenta a comparação entre o comportamento de Força x deslocamento para os modelos desenvolvidos neste estudo e os modelos experimentais de MAGGI (2004).

Figura 2: Comparação entre os resultados experimentais e os numéricos



Fonte: Do próprio autor

Após a validação dos modelos, pode-se avaliar o modo de falha das diferentes geometrias, verificar a ocorrência do efeito alavanca e comparar os resultados obtidos através dos métodos normativos e dos cálculos numéricos.

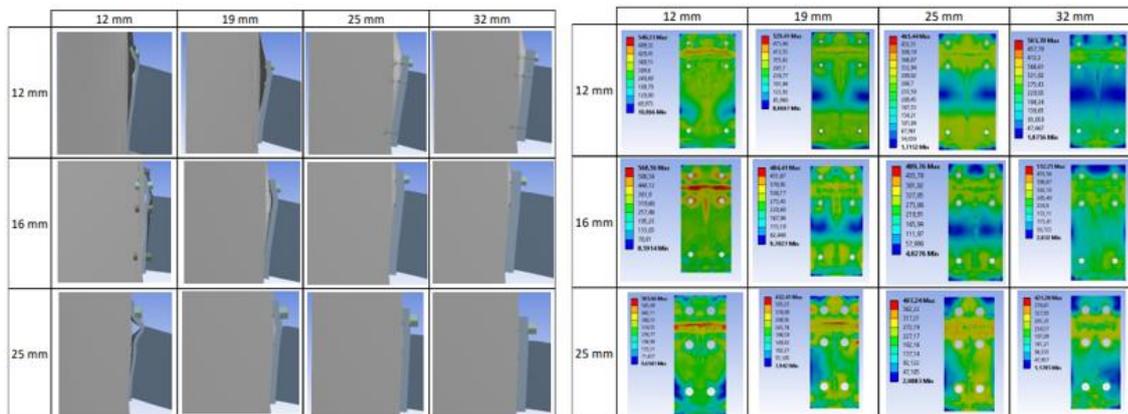
Tabela 1: Avaliação das ligações segundo as normas brasileira e europeia

Código	Modo de falha	$F_{t,Rd,ch}$ (kN)	$M_{J,Rd}$ (kN.m)
C12-P12	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	70,07	39,62
C19-P12	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	100,34	54,21
C25-P12	Modo 3 – EUROCODE 3 (2008)	134,36	63,28
C12-P16	Modo 1 – EUROCODE 3 (2008)	79,58	45,77
C19-P16	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	153,58	84,42
C25-P16	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	192,60	100,27
C12-P25	Modo 1 – EUROCODE 3 (2008)	124,63	78,65
C19-P25	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	287,51	136,69
C25-P25	Modo 2 – EUROCODE 3 (2008)	363,56	200,27

Fonte: Do próprio autor



Figura 3: Avaliação das chapas de extremidade



Fonte: Do próprio autor

Conclusão: A validade dos modelos computacionais desenvolvidos no presente estudo foi comprovada através da comparação entre os resultados obtidos através das análises numéricas e os obtidos através de ensaios experimentais realizados por MAGGI (2004).

Através da avaliação global das ligações, com as curvas de momento x rotação e força x deslocamento, é possível verificar que o principal mecanismo de colapso das ligações é a ruptura dos parafusos, uma vez que mesmo com deformações localizadas da chapa de topo as ligações ainda apresentam resistência aos esforços aplicados nos modelos. Além disso, modelos com chapas mais espessas e parafusos mais robustos apresentam colapso nos perfis estruturais ao invés do colapso nas ligações, o que representa ligações superdimensionadas para a conexão de tais perfis.

Ao se comparar os momentos resistentes calculados através dos métodos normativos e dos métodos numéricos, pode-se observar divergência entre os resultados para ligações com chapas mais finas e parafusos de menor diâmetro, com os modelos computacionais apresentando ligações até 2,75 vezes mais resistente que o indicado em normas. Contudo, com o aumento da espessura das chapas, do diâmetro dos parafusos e redução do efeito alavanca, os resultados obtidos tendem a serem similares em ambos os métodos de cálculo.

Referências:

AISCAMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-10: Specification for structural steel buildings**. Illinois, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

BERGAMASCO, P. D. A. **Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida: análise numérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.



BUONICONTRO, L. M. S. **Desenvolvimento de um sistema de classificação baseado nos parâmetros de rigidez e resistência de ligações viga-pilar de estruturas de aço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

DIAZ, CONCEPCIÓN; VICTORIA, MARIANO; QUERIN, OSVALDO M.; MARTÍ, PASCUAL. **Optimum design of semi-rigid connection using metamodels.** Journal of Constructional Steel Research, v.78, p.97-106, July, 2012.

EN 1993-1-8: 2005 Eurocode 3: **Design of steel structures - Part 1-8: design of joints.** European Committee for Standardization. 2005.

FAKURI, RICARDO H.; CASTRO E SILVA, ANA LYDIA R.; CALDAS, RODRIGO B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto.** São Paulo, 2016.

KONGI, ZHENGYI; HONG, SHAOZHENG; VU, QUANG-VIET; CAO, XIANLEI; KIM, SEUNG-EOCK; YU, BO. **New equations for predicting initial stiffness and ultimate moment of flush end-plate connections.** Journal of Constructional Steel Research, v.175, September, 2020.

MAGGI, Y. I. **Análise numérica, via M.E.F, do comportamento de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MAGGI, Y. I. **Análise do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo estendida.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MENDES, F. T. C. **Determinação das propriedades mecânicas das ligações viga-pilar com chapas de extremidade estendida visando à análise pelo método dos componentes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, 2017.

NETHERCOT, D. A.; LI, T. Q.; AHMED, B. (1998). **Unified classification system for beam-to-column connections.** Journal of Constructional Steel Research. v. 45, n.1, p.39-65.

ÖZKILIÇ, YASIN ONURALP; TOPKAYA, CEM. **The plastic and the ultimate resistance of four-bolt extended end-plate connections.** Journal of Constructional Steel Research, v.181, March, 2021.

PRIMOZ, AKBAR; AHADI, PARVIZ; FARAJKHAH, VAHID. **Finite element analysis of extended stiffened end plate link-to-column connections.** Journal of Steel Construction, v.9, 2016.

RIBEIRO, L. F. L. **Estudo do comportamento estrutural de ligações parafusadas viga-pilar com chapa de topo: análise teórico-experimental.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.



Avaliação da Influência do Chanfro na Resistência Mecânica em Juntas de Topo

Edson Miranda¹, Cristina Almeida Magalhães¹, Ivanilza Felizardo¹

¹CEFET-MG, Belo Horizonte (PPGEM, Departamento de Engenharia Mecânica)

Resumo: A soldagem é o principal processo de união de metais utilizado no setor industrial, tanto no mercado nacional quanto no internacional. Um importante objetivo de uma união soldada é garantir a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas dos materiais envolvidos nessa união. Dentre as diversas variáveis definidas ao elaborar um procedimento de soldagem (EPS) está a geometria do chanfro. Não está bem definido na literatura atual, a real influência dessa variável na resistência de juntas de topo, sendo esse o principal objetivo do presente trabalho: avaliar a influência de chanfros meio V, V, duplo V, J, U e duplo U na resistência mecânica de juntas de topo soldadas com processo a arco elétrico.

Palavras-chave: chanfro em soldagem; resistência mecânica; soldagem a arco elétrico; junta de topo; ensaio de tração.

Introdução

É comum na prática da soldagem realizar o passe de raiz (1ª camada, Figura 1) com o processo GTAW (TIG) e os demais passes de enchimento (2ª a 5ª camada, por exemplo) e de acabamento (6ª camada) com processos de maior produtividade como o GMAW (MIG/MAG). Além das variáveis corrente, tensão, polaridade e velocidade de soldagem, é fundamental a definição de variáveis geométricas, como ângulo e raio do chanfro, abertura e altura da raiz e o tipo de chanfro (I, duplo U, duplo V, J, duplo J, V, U, K e meio V).

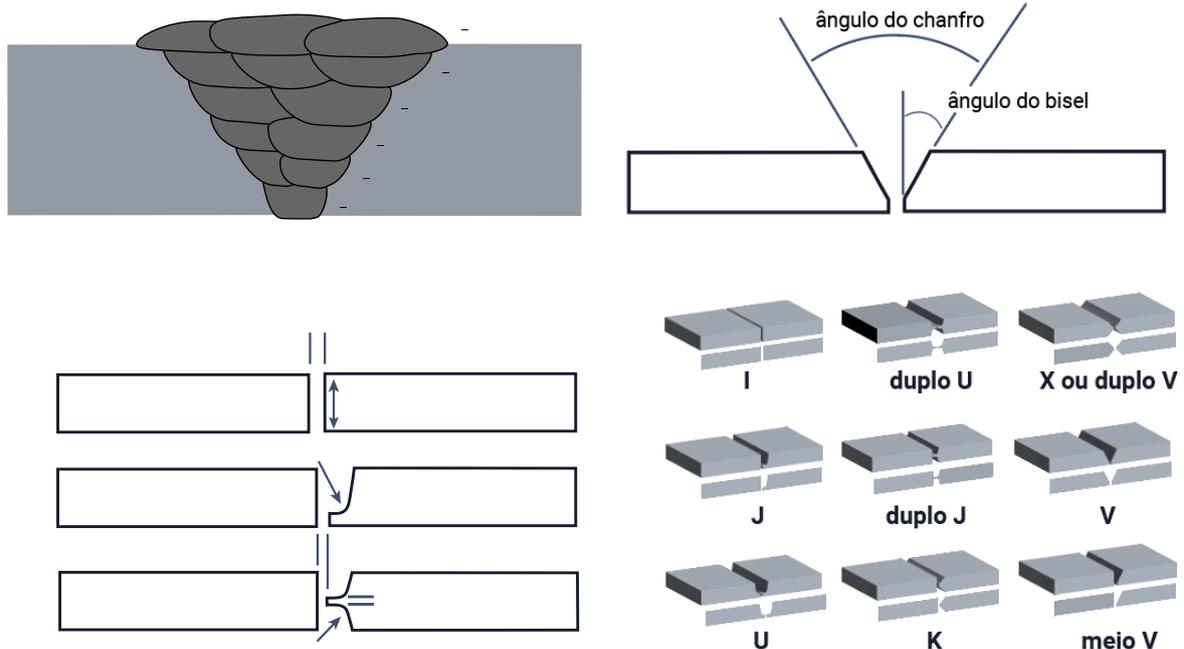


Figura 1 – Exemplificação de algumas das variáveis geométricas de soldagem [1].



Metodologia

O objetivo do presente trabalho é analisar a influência da geometria do chanfro na resistência mecânica em juntas de topo soldadas com penetração total para aços ASTM A36, com passe de raiz executada com o processo TIG e os demais com o processo GMAW.

Chapas laminadas de 3/8" de espessuras nas dimensões 130 mm x 280 mm foram utilizadas para a confecção dos conjuntos chanfrados como apresentado na Figura 2.

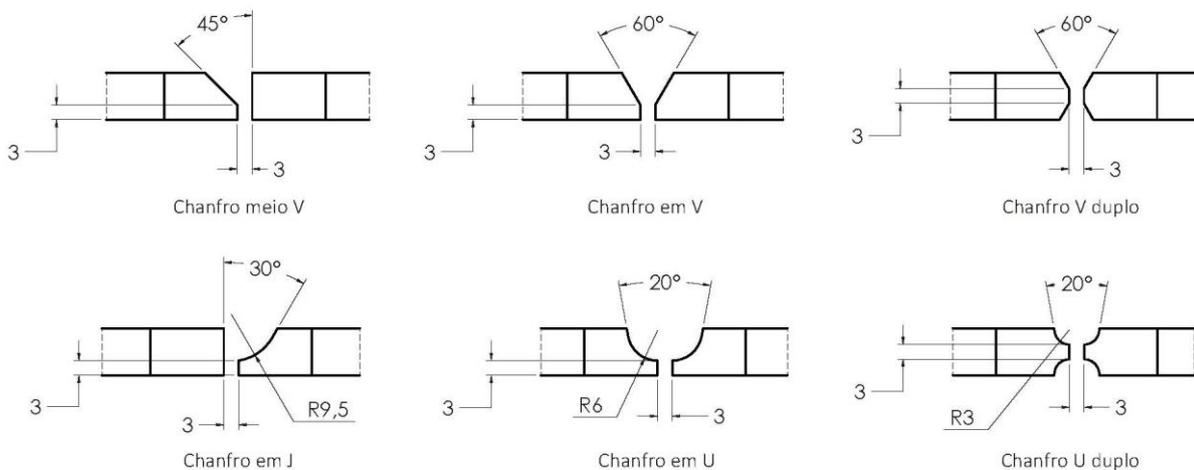


Figura 1 - Geometria dos chanfros

As chapas foram fixadas em suportes para evitar possíveis movimentos das peças por contração e tração, observando, conforme projeto, a abertura da raiz e paralelismo entre as peças. A Figura 3 exemplifica um conjunto fixado em suporte preparado para a etapa de soldagem.



Figura 2 - Chapas fixadas em suporte



A soldagem foi executada em cabine fechada, seguindo os critérios de segurança e fabricação das normas, ANSI Z49.1:2012 e AWS 1.1/D1.1M:2020. As juntas receberam pré-aquecimento por oxiacetileno, retirando possíveis umidades, buscando homogeneizar a região de solda.

O passe de raiz, processo GTAW, foi realizado utilizando máquina de solda modelo LTG 410 ESAB. O eletrodo de tungstênio utilizado foi ER70S-3 com diâmetro de 2,4 mm fabricante Heavy Duty, utilizando argônio como gás de proteção.

Para os passes de enchimento e acabamento, processo GMAW, utilizou-se a máquina SMASHWELD 316 ESAB. O arame utilizado foi o ER70S-6 com espessura de 1,2 mm, mistura de proteção composta por 85% Ar + 15% CO₂, fornecedor Golden Bridge. Todos os passes foram executados por soldador qualificado.

Para a verificação da quantidade de consumível depositado nos chanfros, foi utilizado uma balança digital com capacidade de 10 kg, modelo SF-400, fabricante TOMATE, registrando o peso inicial e final do rolo de arame utilizado para a execução dos passes de enchimento e acabamento.

A inspeção por ultrassom nas juntas soldadas foi realizada pela empresa Newtec Inspeções Ltda, verificando os critérios da ASME Sec. V Art.4. O ensaio foi feito a temperatura de 25 °C, na região adjacente, paralela ao cordão da solda. A região foi limpa para remover sujeiras, o cabeçote foi calibrado por blocos padrões ajustando a sensibilidade para espessuras menores de 25" (polegadas) e o ângulo do transdutor foi ajustado em 60 graus.

Para cada chanfro soldado foram produzidos 5 corpos de prova para ensaio de tração, conforme modelo apresentado na Figura 4, seguindo critérios estabelecidos por norma AWS B4.0:2016. O ensaio de tração aconteceu no laboratório do CEFET MG, campus Nova Gameleira, no Departamento de Engenharia Civil, onde os valores para velocidade de 5 mm / min e área seção reduzida de 180,975 mm² foram inseridas no software da máquina de tração, modelo Emic DL300 kN, fabricante Instron.

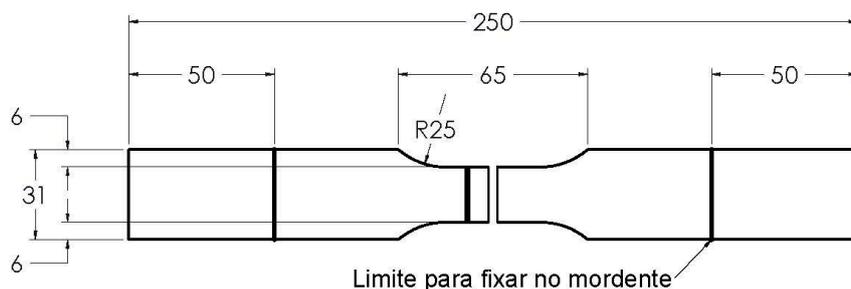


Figura 3 - Dimensões finais das amostras

Para analisar a morfologia dos cordões de solda executados, ensaios metalográficos serão realizados por microscopia ótica.

Resultados e Discussão

Um conjunto de chapas de cada chanfro analisado (Figura 2) foi soldado, sendo apresentado na Tabela 1 as variáveis de soldagem utilizadas.



Tabela 1 Parâmetros de soldagem

Etapa	Processo	Ø (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)
Passe de raiz	GTAW	2,4	136 ± 0,4	11,6 ± 0,4
Enchimento	GMAW	1,2	220 ± 0,4	20,4 ± 0,4

Para cada conjunto soldado, 5 corpos de prova de tração foram ensaiados. A Figura 5 exemplifica um corpo de prova sendo ensaiado e a medida de alongamento obtido.

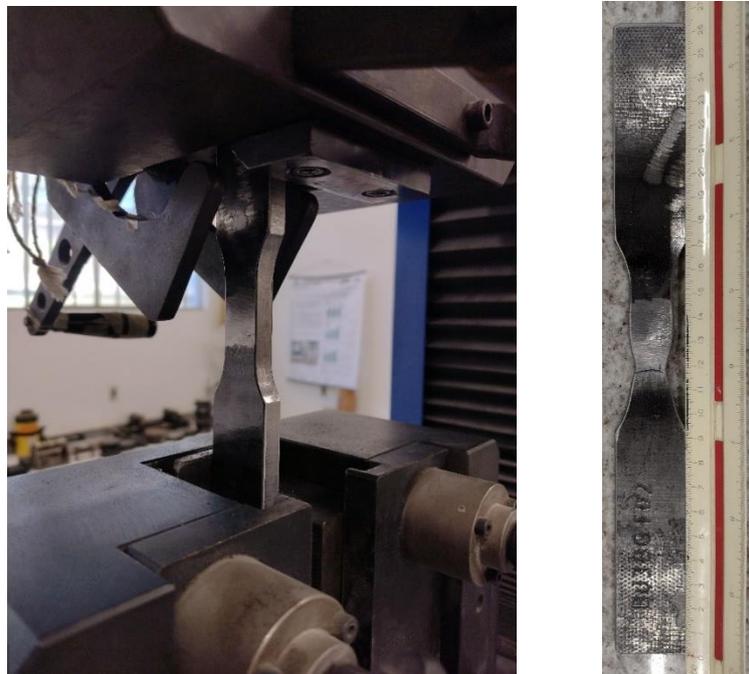


Figura 5 – Teste de tração e verificação do alongamento.

As Figuras 6 e 7 apresentam a média das forças e deslocamentos junto com o coeficiente de variação dos ensaios realizados, lembrando que para cada chanfro realizou-se 5 ensaios.

Observa-se que na média das forças, o chanfro em V representa a maior resistência obtida e o chanfro em J a menor resistência dos seis cenários. Os valores da melhor resistência possuem uma variação de 1% entre os ensaios, e a menor resistência variou 8%, demonstrando uma consistência nos resultados.

Destaca-se que os resultados ainda são inconclusivos, que novos testes de soldagem serão realizados, assim como os ensaios metalográficos e de tração.

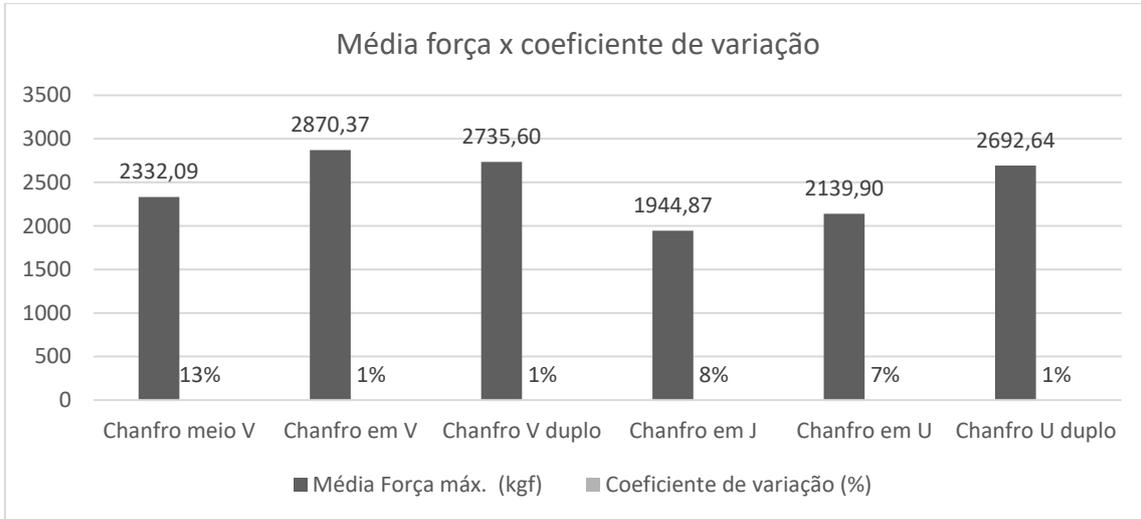


Figura 6 - Média da força e coeficiente de variação

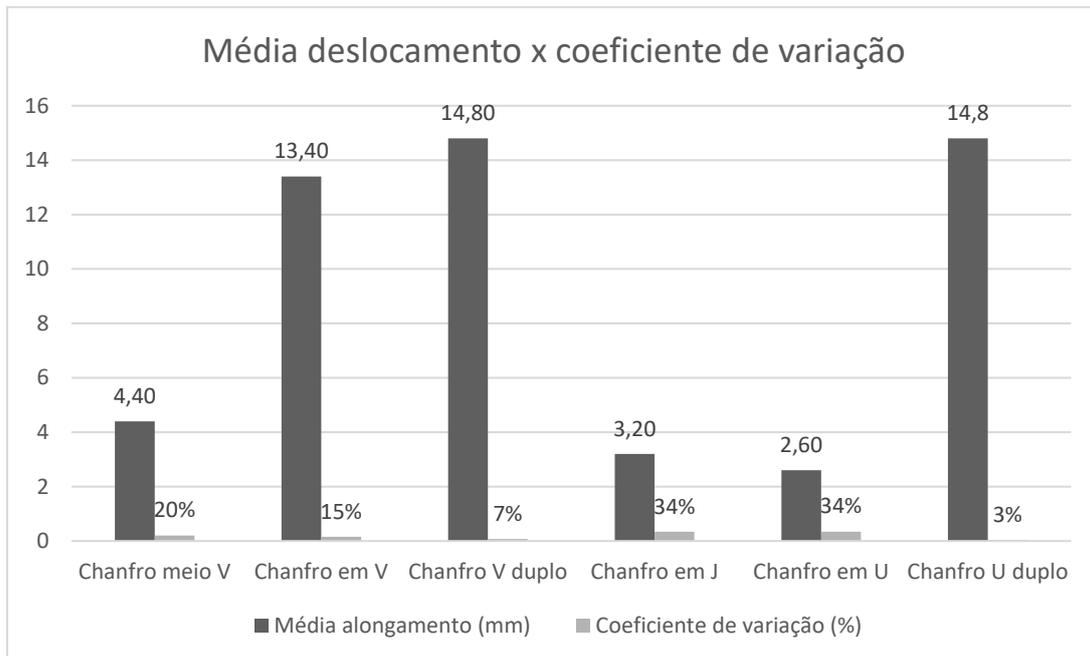


Figura 7 - Média deslocamento x coeficiente de variação

Referências

1. Termos Técnicos. Soldagem Play. Disponível em: <https://soldagemplay.com.br/wp-content/uploads/2023/03/Termos-tecnicos.pdf>. Acesso em março, 2023.
2. American Welding Society. AWS 1.1/D1.1M:2020: Structural Welding Code – Steel. Miami, 2020.
3. American Welding Society. ANSI Z49.1:2012: Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes. Miami, 2012.

Realização:



Apoio:



**21 A 23 DE NOVEMBRO
DE 2023**

- American Welding Society. AWS B4.0:2016: Standard Methods for Mechanical Testing of Welds. Miami, 2016.
- The American Society of Mechanical Engineers. ASME BPVC. V-2019: ASME Boiler and Pressure Vessel Code. New York, 2019.



Arranjos de Plantas Fotovoltaica e Eólica para Geração de Hidrogênio Verde via Dessalinização

Larissa Fernanda N. Ildefonso¹, José Henrique Martins Neto¹

1. Mestrado em Eng. Mecânica, Depto de Eng. Mecânica, CEFET-MG

Resumo

Uma opção promissora de energia renovável é o hidrogênio verde, pois além da aplicação em armazenamento de energia, apresenta a possibilidade de atender os mercados interno e externo. Nesse sentido, integrar a eletrólise da água com sistemas de energia renovável pode promover a produção em larga escala de hidrogênio verde. Entretanto, surge o questionamento sobre a existência de água doce suficiente para sustentar essa produção de hidrogênio havendo pouco consenso sobre a questão, com alguns cientistas preocupados com o consumo significativo de água, enquanto outros desconsideram tais limitações. Deste modo, produzir hidrogênio utilizando água do mar dessalinizada pode contribuir para a preservação da água potável, especialmente em áreas onde a disponibilidade de água doce é limitada. Neste trabalho foi elaborado um modelo para análise técnica e econômica simplificada de um sistema para produção de hidrogênio verde via dessalinização da água do mar. O sistema é constituído por planta fotovoltaica, planta de eletrolise e planta de dessalinização. Diferentes potencias elétricas destinadas para a produção do hidrogênio foram analisadas verificando-se que o investimento aumenta com o aumento dessa potência. Adicionalmente, verificou-se que o custo maior é o da planta fotovoltaica seguido da planta de eletrolise e por último da planta de dessalinização.

Palavras-chave: dessalinização, hidrogênio, fotovoltaica.

Introdução

Com o aumento do consumo de energia e os impactos cada vez mais evidentes do aquecimento global, torna-se necessário o investimento imediato em sistemas de energia a partir de recursos renováveis. Para atingir as metas do Acordo de Paris, que tem como principal objetivo conter o aumento do aquecimento global e, para isso prevê metas para a redução da emissão de gases do efeito estufa, o sistema global de energia deve passar por uma grande transformação, saindo de um sistema amplamente baseado em combustíveis fósseis para um sistema de energia de baixo carbono, eficiente e renovável (IRENA, 2018).

No entanto, apesar da necessidade crescente de investimento em sistemas de energias renováveis, algumas fontes renováveis, tais como eólica e fotovoltaica, apresentam a desvantagem de serem intermitentes e não despacháveis, portanto, menos confiáveis do que a energia derivada de combustível fóssil. Em vista disso, uma possibilidade promissora que tem sido apresentada para essa desvantagem é a produção de hidrogênio renovável. Isso porque, o hidrogênio produzido a partir da energia renovável permite que grandes quantidades de energia renovável sejam canalizadas do setor de energia para setores para os quais a



descarbonização se torna difícil, como transporte e indústria (IRENA, 2018). E, além disso, a possibilidade de inserção de sistemas de armazenamento de energia em usinas renováveis, permite uma geração contínua de energia, o que implica confiabilidade e estabilidade para o sistema elétrico (ANDREWS, 2012).

Dessa forma, muitos estudiosos sugerem que a integração da eletrólise da água com sistemas baseados em energia renovável pode desempenhar um papel importante na produção em larga escala de hidrogênio sustentável, de forma que uma “economia verde de hidrogênio” tem sido promovida há muito tempo como um aspecto inovador de um futuro de baixo carbono, no qual o hidrogênio livre de emissões seja amplamente utilizado na vida cotidiana.

Por outro lado, considerando a aposta de alguns cientistas na eletrólise da água para produção do hidrogênio, à medida que há uma redução nos preços da energia renovável e são alcançadas melhorias na eficiência dos eletrolisadores, os críticos começaram a questionar se haverá água doce suficiente para sustentar uma economia de hidrogênio. Alguns cientistas argumentam que a resposta será negativa, em virtude da demanda significativa de água em todo o processo de produção desse combustível

Portanto, há pouco consenso sobre o que o futuro do hidrogênio renovável implica, com alguns excessivamente preocupados com a falta de demanda, o consumo de água, bem como os altos custos de produção e baixa eficiência na conversão de eletricidade (KRIETH et al, 2004), enquanto outros desconsideram as limitações do hidrogênio.

Deste modo, produzir hidrogênio utilizando água do mar (cerca de 96,5% dos recursos hídricos totais da Terra) em vez de água potável poderia reduzir o consumo de água doce, escassa em todo o mundo, especialmente em áreas nas quais a disponibilidade desta água é altamente limitada como em zonas áridas, além de países costeiros e ilhas (Yu, 2019).

Assim, a eletrólise da água do mar não é apenas apresentada como uma solução promissora para geração de hidrogênio limpa, mas também pode ser apresentada como uma alternativa para a eletrólise de água doce, o que permitirá eliminar a forte pressão sobre a alta demanda de água doce potável (Jamesh, 2020).

A eletrólise ocorre a partir de um eletrolisador, dispositivo que divide a água em hidrogênio e oxigênio nos respectivos eletrodos (HERLAMBANG, 2017). Os eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM), têm sido amplamente estudados, de forma que a expectativa é que no ano de 2025 esta tecnologia alcance um preço inferior ao eletrolisador alcalino (IRENA, 2018). Outras duas tecnologias com desenvolvimento recente e bastante promissoras, principalmente em relação a eficiência, são a célula eletrolisadora de óxido sólido (SOEC) e a membrana de troca de ânion (AEM).

Este trabalho analisa um sistema de geração de hidrogênio verde utilizando uma planta de eletrolise do tipo PEM a partir de água dessalinizada do mar. A energia elétrica é proveniente de uma planta fotovoltaica sem armazenamento de energia.

Metodologia

A metodologia consistiu em elaborar um modelo computacional, tendo como parâmetros e variáveis de entrada valores disponíveis na literatura. O modelo foi implementado no software ESS (Engineering Equation Solver), permitindo realizar análises técnicas e econômicas das seguintes



plantas: (i) solar fotovoltaica; (ii) geração de hidrogênio verde via eletrólise da água, (iii) dessalinização da água do mar.

O modelo analisa a produção de hidrogênio verde obtido de uma planta de eletrolise do tipo PEM tendo como matéria bruta água dessalinizada oriunda de uma planta de dessalinização do tipo “Osmose Reversa” e energia elétrica fornecida por uma planta solar fotovoltaica SEM armazenamento de energia, considerando percentuais de 0% a 100% da potência elétrica máxima da planta em questão (i.e., 100Mwe).

Resultados

Para o sistema modelado, que consiste na planta fotovoltaica com a geração de hidrogênio a partir da dessalinização da água por osmose reversa SEM armazenamento de energia, ao realizar a análise paramétrica variando de 0% a 100% a fração de potência disponibilizada para a produção de hidrogênio encontrou-se os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Potência disponibilizada para produção de hidrogênio.

Produção Hidrogênio (MW)	Eletrólise (MW)	Osmose Reversa (MW)
0	0	0
11,11	11,1	0,009
22,22	22,2	0,019
33,33	33,31	0,028
44,44	44,41	0,037
55,56	55,51	0,046
66,67	66,61	0,056
77,78	77,71	0,065
88,89	88,81	0,074
100	99,92	0,084

Analisando os resultados da Tab. 1 verifica-se que a potência elétrica requerida pelas plantas de eletrolise e de dessalinização aumentam à medida que a potência disponibilizada pela planta fotovoltaica aumenta. Adicionalmente, verifica-se que a potência da planta de eletrolise é muito maior que aquela da planta de dessalinização, para todas as frações analisadas.

Em relação ao custo de investimento (CAPEX) do sistema em questão, o gráfico da Figura 1, apresenta sua variação para cada fração de potência disponibilizada para a produção de hidrogênio.

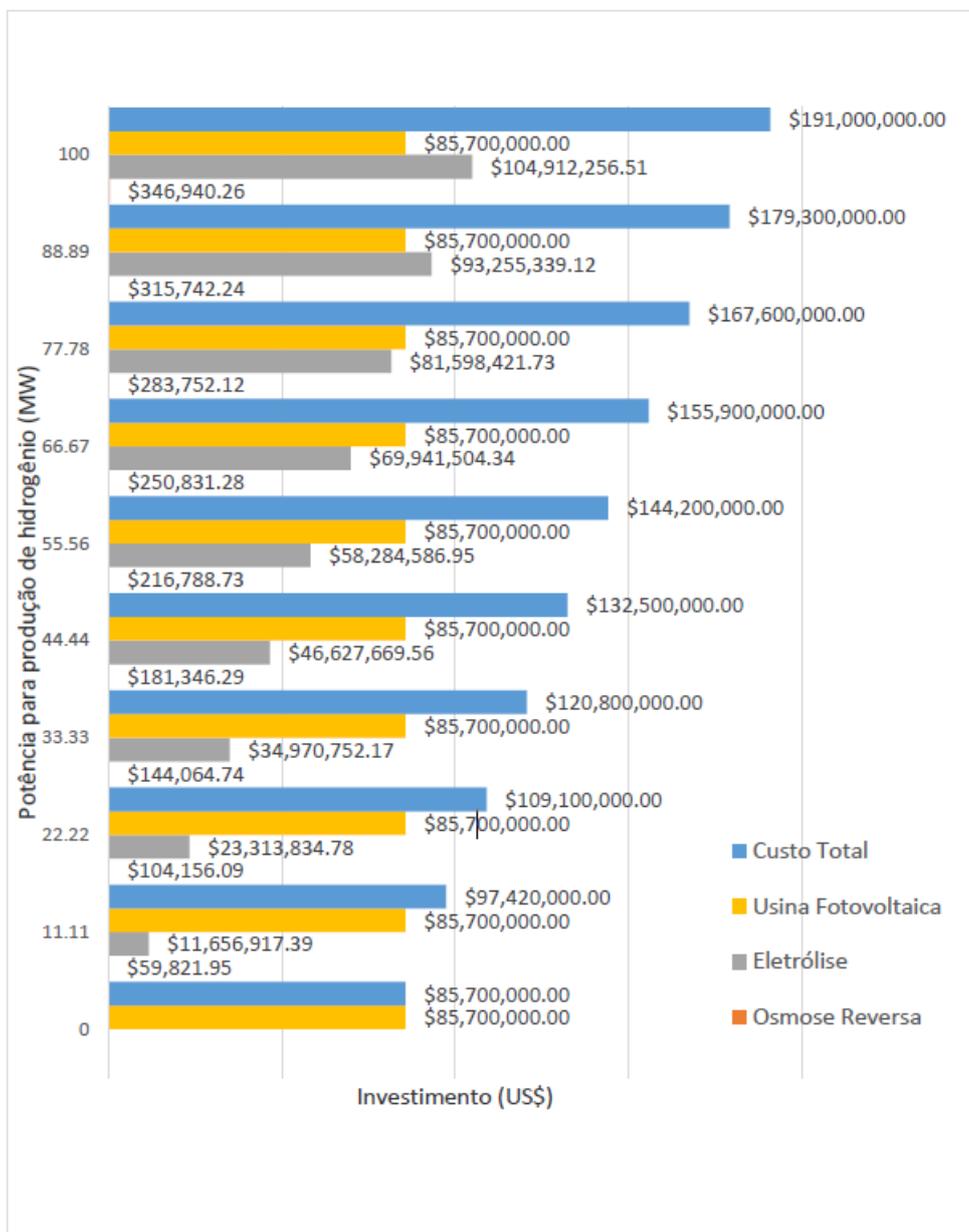


Fig. 1 – Avaliação econômica de frações de energia usadas para geração de hidrogênio verde.

Avaliando a Fig. 11 verifica-se que o custo total do sistema aumenta à medida que a potência da planta fotovoltaica disponibilizada para a produção de hidrogênio aumenta, sendo que o custo maior é o da planta fotovoltaica seguido da planta de eletrolise para frações de potência até 90% da potência máxima (i.e., 100 MWe). A partir de 90% da potência máxima verifica-se uma inversão destes custos. Por outro lado, a planta de dessalinização mostrou custo insignificante.

Conclusão

A produção de hidrogênio verde para atender o consumo interno e o mercado externo é uma realidade e apresenta grande futuro, por atender os quesitos de sustentabilidade ambiental. Entretanto, a utilização de água doce como matéria prima é preocupante devido à escassez deste



insumo principalmente nos locais com maior irradiância solar. Portanto, o uso de água dessalinizada proveniente da água do mar é promissor. Neste trabalho realizou-se simulações com um modelo elaborado para analisar um sistema composto por uma planta fotovoltaica sem armazenamento de energia de 100 MWe de potência, uma planta de eletrolise do tipo PEM e uma planta de dessalinização do tipo OR. Variou-se a potência da planta fotovoltaica de 0 a 100% de forma a analisar parâmetros técnicos e econômicos. Os valores mostram que o custo da planta de dessalinização é muito inferior àqueles da planta fotovoltaica e da planta de eletrolise. A planta de dessalinização apresentou custo insignificante comparado as outras plantas.

Referências

Andrews J., Shabani B., Dimensionless analysis of the global techno-economic feasibility of solar-hydrogen systems for constant year-round power supply, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 1, 2012, Pages 6-18, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.102>.

Herlambang Y. Dewantoro, Shun-Ching Lee & Huan-Chi Hsu (2017) Numerical estimation of photovoltaic–electrolyzer system performance on the basis of a weather database, *International Journal of Green Energy*, 14:7, 575-586, DOI: 10.1080/15435075.2017.1307200

IRENA (2018), *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

Jamesh Mohammed-Ibrahim, Harb Moussab. Recent advances on hydrogen production through seawater electrolysis. *Materials Science for Energy Technologies* 3 (2020) 780–807

Krieth F, West R, Fallacies of a hydrogen economy: a critical analysis of hydrogen production and utilization. *J Energy Resour Technol* 2004, 126:249-257.

Yu L., Zhu Q., Song B., McElhenny B., Wang D., Wu C., Qin Z., Bao J., Yu Y., Chen S., Ren Z., *Nat. Commun.* 10 (2019) 5106. MA Q, LU H. Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. *Desalination*. 2011; 277(1-3):274-80.



ANÁLISES DE RENDIMENTO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA COM EJETOR

João Victor Guimarães Bastos¹ (0009-0007-6212-2483), Ralney Nogueira de Faria¹ (0000-0002-0832-1816), Paulo Eduardo Lopes Barbieri¹ (0000-0002-2449-0353)

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

Resumo: Nas últimas décadas o mundo tem sofrido com mudanças climáticas, devido ao aumento de cerca de 80% da emissão de gases do efeito estufa, entre os anos de 1971 e 2014. Nesse contexto, a demanda pela refrigeração em diversos setores tais como: alimentício, farmacêutico, edificações dentre outros, que são utilizados para preservação de alimentos e conforto térmico, representam 20% da energia consumida no mundo. Além do consumo de energia chamado de poluição indireta, os sistemas de climatização e de refrigeração utilizam fluidos refrigerantes, que por vezes acarretam vazamentos, emitindo gases na atmosfera, poluindo diretamente, destruindo a camada de ozônio e contribuindo para o efeito estufa. Dessa maneira, a busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias que visam reduzir o consumo de energia e a poluição causada por sistemas de climatização e de refrigeração, além de serem mais eficientes e menos agressivos ao meio ambiente, são de grande interesse da sociedade. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo teórico para verificar a influência de ejetores nos sistemas de refrigeração em cascata (absorção-compressão de vapor) e desenvolver um modelo matemático para simulação termoeconômica de um sistema de refrigeração integrado absorção-compressão de vapor para avaliar o desempenho energético, exergético, ambiental e econômico do sistema buscando reduzir o consumo de energia e a redução da emissão dos gases poluentes. O trabalho proposto visa estudar o rendimento do sistema de refrigeração a partir do uso de um componente importante: o ejetor. O trabalho encontra-se em desenvolvimento, haja vista a relevância da proposta e a capacidade dos envolvidos pode-se chegar a resultados muito relevantes.

Palavras-chave: Absorção, compressão, análise termoeconômica, refrigeração, fluidos refrigerantes, R744.

Introdução / Metodologia

Mudanças climáticas provenientes das emissões de gases do efeito estufa vêm ocorrendo no mundo, como o aumento da temperatura. Isso intensifica a busca por sistemas de refrigeração e climatização, para preservação de alimentos e conforto térmico, gerando mais gases que agravam ainda mais o efeito estufa. A contribuição para o aquecimento global ocorre diretamente por meio de vazamentos e, indiretamente, através do consumo de energia. Esses sistemas são responsáveis por 7.8% da emissão de gases do efeito estufa de acordo com (Cabello et al, 2022), (Bellos; Tzivanidis. 2017) e (Blanco et al. 2014).



Iniciaram-se esforços na tentativa de conter esse ciclo e mitigar as mudanças climáticas, e por meio de ações coletivas foram propostos protocolos internacionais. São exemplos, os protocolos de Quioto (1997) e de Montreal (1987), que propuseram medidas para restringir a emissão de gases poluentes, incentivar a utilização de fontes de energia renováveis e a cooperação no compartilhamento de informações sobre novas tecnologias. Em 2016, o protocolo de Montreal passou ainda por uma alteração, reduzindo o valor do potencial de aquecimento global (GWP) de fluidos utilizados em sistemas de ar-condicionado e refrigeração. As nações aderentes implementaram regulamentações destinadas a restringir potentes gases de efeito estufa, como os hidrofluorcarbonos (HFC), colocando explicitamente limites à aplicação de gases como o R134a e o R404A, que têm um elevado efeito de estufa. Consequentemente, diversos estudos foram desenvolvidos para promover o desenvolvimento de refrigerantes alternativos com potencial de destruição da camada de ozônio (ODP) mínimo ou zero e baixo GWP. (Yang et al., 2021), (Andrade, 2008), (Domanski et al., 2017) e (Silva, 2009).

Visto o atual contexto, esse trabalho buscou apresentar uma revisão sistemática de bibliografias recentes que ressaltassem a importância dos ejetores nos sistemas de climatização. Pois assim, é possível obter-se menor consumo energético, reduzir os custos e danos ambientais.

O dióxido de carbono tem recebido atenção considerável como alternativa aos refrigerantes sintéticos, comumente usados em sistemas de refrigeração de supermercados, em um esforço para desenvolver sistemas com menor impacto ambiental. (Sharma et al., 2014).

Sistemas que conectam dois ou mais ciclos de refrigeração são comumente chamados de Sistemas de Refrigeração em Cascata. Esses sistemas possibilitam o alcance de faixas de temperatura mais amplas e podem apresentar maior eficiência energética se comparados com ciclos convencionais. (Nikbakhti et al., 2020) (Stoecker; Jones, 1985).

No estudo realizado por Cimsit e Ozturk (2012), o ciclo de refrigeração em cascata de compressão-absorção foi analisado e simulado com a utilização de seis diferentes combinações de pares de fluidos refrigerantes. Em um dos casos, o ciclo de compressão-absorção de estrutura mais complexa foi utilizado com o par de fluidos refrigerantes LiBr-H₂O e NH₃-H₂O, então, sob as mesmas condições, a capacidade de refrigeração e aplicação foi comparado com o clássico ciclo de compressão de vapor. Os resultados mostraram uma redução de 48 a 51% no consumo de energia elétrica.

O ciclo de refrigeração em cascata automática fracionada acoplado ao ejetor bifásico (FACRC-TPE) usando R1150/R600a ecologicamente correto é proposto no artigo. O ejetor bifásico é substituído pela válvula borboleta na passagem do fluxo líquido do fundo do separador para recuperar o trabalho de expansão e reduzir o consumo de energia, enquanto o trocador de calor de fracionamento é aplicado para purificação de baixo ponto de ebulição. O desempenho e irreversibilidades, são comparados com o ciclo de refrigeração em cascata automática não fracionada com ejetor bifásico (UACRC-TPE) e ciclo de refrigeração em cascata automática fracionada acoplado ao ejetor bifásico (FACRC). Os COPs mais altos em FACRC-TPE e FACRC ocorrem na fração de massa R1150 de 0,33, e o COP mais alto de 0,572 em FACRC-TPE é 0,075 maior do que em FACRC, enquanto UACRC-TPE tem seu COP máximo de 0,515 na fração de massa R1150 de 0,43. Com os resultados é possível observar que a aplicação cooperativa do trocador de calor fracionado acoplado ao ejetor bifásico aumenta o COP do FACRC-TPE e obtém menor temperatura de refrigeração, (TAN et al., 2023)

O ejetor é um elemento utilizado em sistemas de refrigeração. Por absorção, ele recupera a energia de pressão da solução proveniente do gerador e reduz as perdas por estrangulamento associadas



à válvula de expansão no ciclo padrão de refrigeração por compressão de vapor. Dentre as vantagens do uso do ejetor estão o baixo custo, ausência de partes móveis e capacidade de lidar com fluxo bifásico sem danos, o que o torna uma boa opção para o desenvolvimento de sistemas de refrigeração de alto desempenho. No estudo realizado as características de desempenho do ciclo de refrigeração de expansão do ejetor (EERC) com fluido R1234yf foram investigadas. Com um ejetor de mistura de pressão constante, com a temperatura de condensação entre 30 e 55 °C e temperatura de evaporação variando de -10 a 10 °C. Os resultados mostraram que o R1234yf EERC tem melhor desempenho do que o ciclo de refrigeração padrão, e a melhoria é mais significativa quando há maior temperatura de condensação e menor temperatura de evaporação. Nas condições típicas de ar-condicionado de $T_c = 40$ °C e $T_e = 5$ °C, o COP e a capacidade de resfriamento volumétrico (VCC) do R1234yf EERC podem atingir 5,91 e 2590,76 kJ/m³, respectivamente. (LI et al., 2014).

Besagni et al. (2016) realizaram em seu estudo uma revisão do funcionamento de ejetores, seleção de fluidos e tecnologias aplicadas a esse componente, no estudo foi descrito ainda a geometria do bocal e como eles afetam a operação desse dispositivo. A operação dos ejetores depende diretamente das relações das pressões provenientes dos fluxos primário e secundário. Destaca-se a aplicabilidade desse elemento em sistemas de refrigeração, uma vez que geralmente espera-se altas taxas de compressão do fluido nesses casos.

Conclusão

Os estudos em sistemas de refrigeração e climatização são de grande relevância para a sociedade, visto seu impacto ambiental e financeiro. Com o resumo dos estudos recentes realizados, vimos que existem aspectos termodinâmicos que podem ser melhorados nos ciclos, além de novas mudanças que podem trazer significativos aumentos no coeficiente de performance com conseqüente redução no consumo de energia. A eficiência dos sistemas variou conforme a temperatura de entrada e saída dos ciclos, portanto existem muitos estudos e melhorias que podem ser realizados com determinados intervalos de temperatura disponíveis na condensação e esperados nas evaporadoras. O elemento ejetor mostrou resultados positivos, com a reutilização da energia do próprio ciclo. Haja vista que, conseguiu reduzir o consumo de energia e trabalho demandado, podendo ser simulado em diversos outros estudos.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Artur Caron Mottin pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho, ao Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri pela orientação acadêmica, e ao CEFET-MG e seu corpo docente pela oportunidade de realização do mestrado.

Referências

ANDRADE, J. C. S.; COSTA, P.. Mudança climática, protocolo de Kyoto e mercado de créditos de carbono: desafios à governança ambiental global. Organizações & Sociedade, v. 15, n. 45, p. 29–45, abr. 2008.



BELLOS, E.; TZIVANIDIS, C.; TSIFIS, G. Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of a solar assisted refrigeration system for various operating scenarios. *Energy Conversion and Management*, v. 148, p. 1055–1069, set. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.063>.

Blanco, Gabriel, Gerlagh, Reyer, Suh, Sangwon, Barrett, John, Heleen, C., de Coninck, Diaz Morejon, C.F., Mathur, Ritu, Nakicenovic, Nebojsa, , Alfred Ofosu Ahenkorah, Pan, Jiahua, 2014. 'Drivers, Trends and Mitigation', *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

CABELLO, R.; SÁNCHEZ, D.; LLOPIS, R.; ANDREU-NACHER, A.; CALLEJA-ANTA, D. Energy impact of the Internal Heat Exchanger in a horizontal freezing cabinet. Experimental evaluation with the R404A low-GWP alternatives R454C, R455A, R468A, R290 and R1270. *International Journal of Refrigeration*, v. 137, p. 22–33, 2022.

CIMSIT, C.; OZTURK, I. T. Analysis of compression–absorption cascade refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering*, v. 40, p. 311–317, jul. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.035>.

DOMANSKI, P. A.; BRIGNOLI, R.; BROWN, J. S.; KAZAKOV, A. F.; MCLINDEN, M. O. Low-GWP refrigerants for medium and high-pressure applications. *International Journal of Refrigeration*, v. 84, p. 198–209, dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.08.019>.

LI, H.; CAO, F.; BU, X.; WANG, L.; WANG, X. Performance characteristics of R1234yf ejector-expansion refrigeration cycle. *Applied Energy*, v. 121, p. 96–103, maio 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.079>.

NIKBAKHTI, R.; WANG, X.; HUSSEIN, A. K.; IRANMANESH, A. Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. *Alexandria Engineering Journal*, v. 59, n. 2, p. 707–738, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036>.

Sharma, V., Fricke, B., Bansal, P., 2014. “Comparative analysis of various CO2 configurations in supermarket refrigeration systems”. *International Journal of Refrigeration*, vol. 46, pp. 86–99.

SILVA, D. H. DA .. Protocolos de Montreal e Kyoto: pontos em comum e diferenças fundamentais. *Revista Brasileira de Política Internacional*, v. 52, n. 2, p. 155–172, jul. 2009.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. *Refrigeração e Ar Condicionado*. São Paulo: McGrawHill do Brasil, 1985.

TAN, Y.; LI, X.; WANG, L.; HUANG, L.; XIAO, Y.; WANG, Z.; LI, S. Thermodynamic performance of the fractionated auto-cascade refrigeration cycle coupled with two-phase ejector using R1150/R600a at –80 °C temperature level. *Energy*, v. 281, p. 128328, out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128328>.

YANG, Z.; FENG, B.; MA, H.; ZHANG, L.; DUAN, C.; LIU, B.; ZHANG, Y.; CHEN, S.; YANG, Z. Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, v. 126, p. 12–22, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.022>.



Análise termoeconômica de um sistema de refrigeração em cascata que utilizada R744, ejetor e energia solar

Débora Carla Silva Mól¹, Paulo Eduardo Lopes Barbieri¹, Ralney Nogueira de Faria¹, Augusto Veiga de Souza¹

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

Resumo

No presente estudo, um sistema de refrigeração em cascata com ejetores e energia solar foi proposto em uma nova configuração, que inclui dois evaporadores. Esse sistema possui dois evaporadores que tem como função armazenar produtos congelados e o outro para condicionamento de ar em supermercados. Os aspectos termoeconômicos foram investigados considerando que dois refrigerantes de baixo potencial de aquecimento global (GWP), R1233zd(E) e R600a, foram testados no ciclo de alta temperatura e o R744 foi fixado no ciclo de baixa e média temperatura. Observou-se que a temperatura ambiente influenciou de forma contundente os parâmetros avaliados no estudo, sendo que quando essa temperatura é mais alta ($T_{AMB} = 35^{\circ}\text{C}$), o desempenho tem seus valores reduzidos significativamente e a exergia destruída é elevada. Enquanto isso, em $T_{AMB} = 25^{\circ}\text{C}$ o maior COP do sistema foi atingido, chegando em 0,44 para o par de refrigerantes R1233zd(E)/R744. Na análise econômica, o custo total anual foi avaliado e minimizado pelo método de otimização *Conjugate Direct Methods*.

Palavras-chave: Sistemas de refrigeração, cascata, fluidos refrigerantes, desempenho.

Introdução

A necessidade de economia de energia e a preservação do meio ambiente são temas frequentes de discussões em todo o mundo. Nesse cenário, a indústria de refrigeração, aquecimento, ventilação e condicionamento de ar, são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo total de energia primária nos países desenvolvidos (Mwesigye and Dworkin, 2018), com destaque para os supermercados que consomem entre 3 a 4% (Gullo et al., 2018) e que tradicionalmente utilizam refrigerantes que contribuem para o aquecimento global em seus sistemas de refrigeração. Dessa forma, a busca por estratégias tanto para redução do consumo de energia advinda da queima de combustíveis fósseis quanto para substituição de refrigerantes prejudiciais ao meio ambiente, é de extrema importância nos dias atuais.

Em se tratando de degradação ambiental, a pesquisa por fluidos alternativos aos que contribuem para destruição de ozônio e para o agravamento do efeito estufa tem sido intensificada. Com isso, os refrigerantes naturais, hidrocarbonetos e as hidrofluorolefinas vem se destacado no mercado da refrigeração e tem se tornado alvo de inúmeras pesquisas. Ao avaliar o consumo de energia em supermercados, os sistemas em cascata, que operam com dois fluidos refrigerantes em amplas faixas de temperatura tendem a apresentar melhoria de desempenho e menor consumo de potência elétrica e menor custo em relação aos sistemas de refrigeração de estágio único (Aghazadeh Dokandari et al., 2014).



Além disso, os benefícios de se introduzir os sistemas em cascata na refrigeração podem ser melhorados ao utilizar um dispositivo que tem potencial de aumentar o desempenho e de reduzir os consumos de energia na refrigeração. De acordo com Tashtoush et al. (2019) o ejetor é um dispositivo sem partes móveis que pode atuar em um sistema de refrigeração substituindo o compressor, permitindo a redução de trabalho e assim, corroborar para a economia de energia e custos. Pode atuar também de outro modo, no qual ele é utilizado como dispositivo de expansão, recuperando as perdas de energia ocorridas neste processo, tal fato acarreta em um aumento do coeficiente de desempenho (COP).

A utilização de fontes de calor renováveis também vem ganhando espaço e se tornando um aspecto fundamental no cenário que tange a diminuição da degradação do meio ambiente, ao reduzir o consumo de energia elétrica na refrigeração e condicionamento de ar. Com isso, Bellos et al. (2017) utilizaram coletores solares de tubos evacuados em um sistema solar associado ao de refrigeração em cascata e atingiu temperatura ótima do gerador de 93°C com um COP de 0,32 e concluíram que ao utilizar a energia solar, o consumo de energia elétrica foi reduzido.

Dessa forma, uma nova configuração para um sistema em cascata, que contém ciclos de alta, média e baixa temperatura, dois ejetores e sistema solar integrado (SRCE) foi proposta para aplicação em supermercados. Uma vez que o SRCE possui demanda de energia ininterrupta devido a necessidade de conservação de alimentos, a energia solar entra como uma fonte de acionamento alternativa e com intuito de manter o sistema em funcionamento, auxiliando o aquecedor para que menos energia advinda da combustão seja necessária. Com isso, o presente estudo propõe realizar uma análise termoeconômica avaliando o desempenho energético, exergético e os custos de um sistema de refrigeração em cascata com ejetor com baixo potencial de aquecimento global.

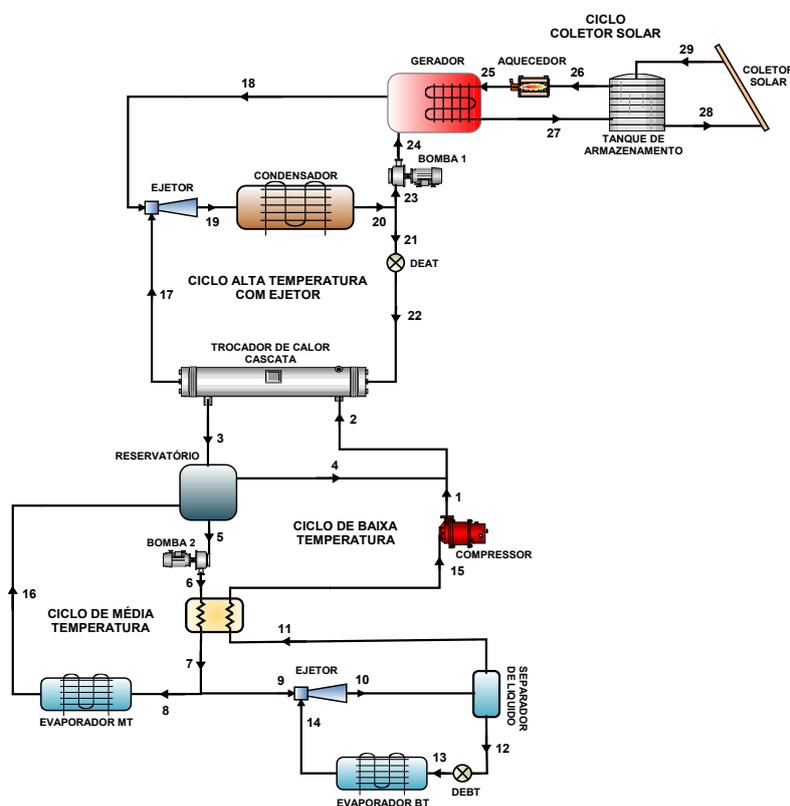


Figura 1 – Sistema de refrigeração em cascata com ejetores e energia solar.



Metodologia

O sistema de refrigeração em cascata com ejetores e energia solar, Figura 1, foi implementado no *software Engineering Equation Solver (EES)* considerando os balanços de massa, energia e exergia. Alguns parâmetros de entrada principais foram definidos, tais como eficiência das seções dos ejetores e temperatura do espaço de média temperatura e da câmara de congelados, respectivamente, com valores fixados em 12°C e -30°C. No ciclo de alta temperatura, os refrigerantes R1233zd(E) e R600a foram testados, já no ciclo de baixa e média temperatura o R744 foi o fluido fixado para análise. Com isso, os resultados foram gerados considerando que para cada fluido refrigerante utilizado no ciclo de alta temperatura, os fluxos solares (G_T) foram variados, assim como as áreas do coletor, temperaturas do gerador (T_{GER}) e por fim duas temperaturas ambiente (T_{AMB}). A modelagem matemática do ciclo de alta temperatura, bem como de seus componentes foi baseada em (Bellos and Tzivanidis, 2017) o mesmo utilizado para o ciclo coletor solar, já o modelo do ciclo de baixa e média temperatura segue o algoritmo proposto por (Li et al., 2014).

Resultados e Discussão:

Os resultados demonstraram que os valores de COP variam significativamente com a temperatura ambiente, Figura 2, sendo que quando essa temperatura é elevada, menor o desempenho do sistema. Tal fato ocorre uma vez que em temperaturas externas mais altas, maior a temperatura do condensador, com isso maior a potência consumida pelo sistema e assim, esse sistema é menos eficiente. Em contraponto a isso, a temperatura do gerador elevada impacta positivamente no desempenho do sistema, já que nesse caso, faz com que a pressão na saída do ejetor seja mais alta, acarretando assim, em um sistema mais eficiente. Logo, a combinação de $T_{GER} = 105\text{ °C}$ e $T_{AMB} = 25\text{ °C}$ gera os maiores valores de COP para ambos refrigerantes em análise, atingindo 0,30 para o R1233zd(E) e 0,287 para o R600a.

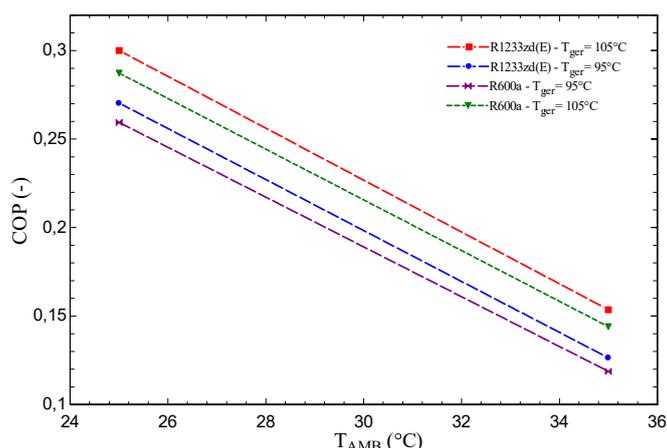


Figura 2 – Efeito da temperatura ambiente no COP do sistema para duas temperaturas ambiente.

Concordando com os resultados de COP do presente estudo, a condição de operação onde $T_{AMB} = 25\text{ °C}$ e $T_{GER} = 105\text{ °C}$ apresentou os menores valores de exergia destruída do sistema dentre todas as que foram simuladas. Sendo assim, a Figura 3, mostra a variação da exergia total destruída no SRCE em relação as áreas do coletor solar para diferentes fluxos solares (G_T) na condição mencionada. Os resultados mostraram que quanto maior a área do coletor e maior o fluxo solar, maior a taxa de exergia destruída total do sistema, uma vez que quanto maior a



disponibilidade e utilização da energia termosolar, maior as irreversibilidades geradas pelo sistema. O R600a apresentou as maiores taxas desse parâmetro para cada G_T testada.

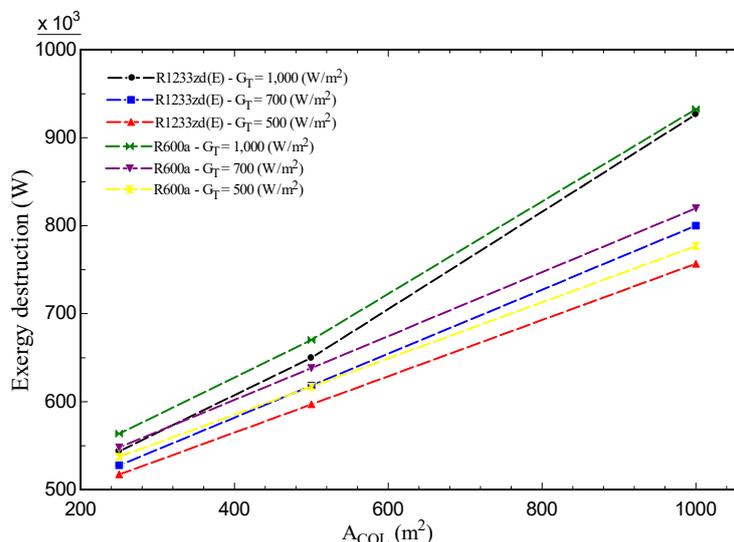


Figura 3 – Exergia destruída total em relação as áreas do coletor solar para diferentes fluxos solares ($T_{GER} = 105^{\circ}C$ e $T_{AMB} = 25^{\circ}C$).

A Tabela 1 mostra o resultado da minimização do custo total, e observou-se que como esperado, em T_{AMB} mais alta, maior o custo total para ambos os fluidos refrigerantes testados. Pode-se dizer que esse resultado acompanha o resultado do COP do SRCE, que como visto, tem seus valores aumentados em temperatura ambiente mais baixa, devido a menor necessidade de consumo de potência em relação à $T_{AMB} = 35^{\circ}C$. Além disso, a T_{GER} convergiu para o valor mais elevado da faixa, o que já era esperado, pois em temperaturas mais altas do gerador, maior o desempenho do sistema de refrigeração e com isso, o custo é minimizado.

Com isso, nota-se um aumento do COP referente ao R1233zd(E), de respectivamente 47,4% e 60,5%, para as temperaturas ambiente de $25^{\circ}C$ e $35^{\circ}C$, comparando com o COP da melhor condição referente a cada T_{AMB} da Figura 2. Observou-se ainda, que uma grande quantidade de energia do sol foi absorvida pelo coletor solar, já que a área ótima para o custo total reduzido apresentou valores acima de $2.000 m^2$, gerando muitas irreversibilidades e pouco aproveitamento dessa energia, pelo sistema de refrigeração. Como consequência disso, a exergia total destruída aumentou para o SRCE na situação de otimização, em relação aos resultados apresentados na simulação.

Parâmetros	R1233zd(E)		R600a	
	$T_{AMB} = 25^{\circ}C$	$T_{AMB} = 35^{\circ}C$	$T_{AMB} = 25^{\circ}C$	$T_{AMB} = 35^{\circ}C$
Custo total anual [C_{TOTAL}]	US\$ 113.175	US\$ 190.096	US\$ 119.606	US\$ 209.798
Área coletora [A_{COL}]	2.549 m^2	2.971 m^2	2.772 m^2	2.800 m^2
Temperatura do gerador [T_{GER}]	125 $^{\circ}C$	125 $^{\circ}C$	125 $^{\circ}C$	125 $^{\circ}C$
Coefficiente de desempenho [COP]	0,44 (-)	0,25 (-)	0,42 [-]	0,23 (-)
Exergia destruída total [$Ex_{D,SRCE}$]	1.430 kW	1.660 kW	1.550 kW	1.700 kW

Tabela1- Resultado da minimização do custo total anual.



Conclusão

Através do estudo, percebeu-se que a temperatura ambiente tem forte influência sobre os parâmetros avaliados, sendo que quando ela é mais baixa, maior o desempenho e menores os custos do sistema. Além disso, a utilização de energia solar favoreceu a redução dos custos avaliados, atingindo um custo mínimo total otimizado de US\$113.175 por ano para o R1233zd(E), ocorrido na melhor condição de operação ($T_{GER} = 105\text{ °C}$ e $T_{AMB} = 95\text{ °C}$), com um coeficiente de desempenho (COP) associado a essa condição igual a 0,44. A partir dos resultados, conclui-se então que o par de refrigerante R1233zd(E)/R744 apresentou o maior desempenho, menor exergia destruída e menor custo de operação e ambiental que o outro par testado, sendo assim, é o mais indicado para o SRCE em aplicação supermercadista.

Agradecimentos:

Os autores gostariam de agradecer o programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelo apoio durante a pesquisa e também a CAPES pelo financiamento em forma de bolsa de estudos.

Referências:

- Aghazadeh Dokandari, D., Setayesh Hagh, A., Mahmoudi, S.M.S., 2014. Thermodynamic investigation and optimization of novel ejector-expansion CO₂/NH₃ cascade refrigeration cycles (novel CO₂/NH₃ cycle). *International Journal of Refrigeration* 46, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.012>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., 2017. Energetic and financial analysis of solar cooling systems with single effect absorption chiller in various climates. *Applied Thermal Engineering* 126, 809–821. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.005>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K.A., 2016. Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types. *Applied Thermal Engineering* 102, 749–759. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.032>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Tsifis, G., 2017. Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of a solar assisted refrigeration system for various operating scenarios. *Energy Conversion and Management* 148, 1055–1069. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.063>
- Gullo, P., Hafner, A., Banasiak, K., 2018a. Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives. *International Journal of Refrigeration* 93, 269–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.07.001>
- Li, H., Cao, F., Bu, X., Wang, L., Wang, X., 2014. Performance characteristics of R1234yf ejector-expansion refrigeration cycle. *Applied Energy* 121, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.079>
- Mwesigye, A., Dworkin, S.B., 2018. Performance analysis and optimization of an ejector refrigeration system using alternative working fluids under critical and subcritical operation modes. *Energy Conversion and Management* 176, 209–226. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.021>
- Tashtoush, B.M., Al-Nimr, M.A., Khasawneh, M.A., 2019. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy* 240, 138–172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185>



Avaliação do Desempenho de uma Ferramenta de PCBN no Torneamento do Aço Endurecido AISI D2 em Corte Contínuo e Interrompido

Ernane Felipe Dias¹ Sandro Cardoso Santos¹

1 Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEP: 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo

Melhorias no desempenho das ferramentas de corte é crucial para resistir as condições tribológicas severas do processo de torneamento de materiais endurecidos, utilizando ferramentas de nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN). Neste contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de uma ferramenta de PCBN no torneamento do aço AISI D2 temperado e revenido, tanto em condições de corte contínuo quanto em corte interrompido, na operação de acabamento com usinagem a seco. Avaliou-se a rugosidade superficial nos parâmetros (R_a , R_t e R_z), o desgaste das ferramentas, seus mecanismos e análise morfológica dos cavacos. Foram realizados ensaios com diferentes velocidades de corte (60, 130, 200 e 240 m/min), mantendo um avanço constante de 0,15 mm/rev e uma profundidade de corte de 0,2 mm. Os resultados indicaram que os desgastes mais evidentes foram cratera e flanco no corte contínuo, enquanto no corte interrompido houve a presença de lascamentos e falha catastrófica. Os mecanismos de desgaste, tais como adesão (*attrition*), abrasão e difusão foram observados com destaque. Além disso, os testes apontaram que o aumento do desgaste de flanco não necessariamente implicou em um aumento na rugosidade superficial, e que o mecanismo de desgaste se modificou com o aumento da velocidade de corte.

Palavras-chave: Aço AISI D2. Desgaste de Ferramenta. Ferramenta de PCBN. Rugosidade. Torneamento Duro.

Introdução

O torneamento de aços endurecidos vem sendo aplicado em grande parte da indústria por apresentar bons resultados frente a outros processos, como a retificação, especificadamente na indústria automotiva e de moldes e matrizes. Além disso, permite que os fabricantes executem de maneira simplificada seus processos e alcancem bons resultados de qualidade e integridade superficial (YOUSEFI *et al.*, 2019).

De acordo com Machado *et al.* (2015), é definido como torneamento de materiais endurecidos aqueles que possuem dureza acima de 45 HRC, durezas que, até nas últimas décadas, eram usinadas apenas em processos ditos como abrasivos. Além disso, as ferramentas devem ser selecionadas de maneira correta. É importante salientar que as máquinas-ferramentas tem um papel muito significativo em todo o processo. Esses equipamentos devem apresentar características que garantam uma usinagem satisfatória, tais como estabilidade dinâmica para garantir que ruídos não prejudiquem o trabalho, acarretando, por exemplo, em vibração excessiva, folga no curso e potência suficiente para atingir aos parâmetros de corte exigidos (BOING, 2018).



Os processos empregados em operações de acabamento em materiais endurecidos eram realizados por processos abrasivos, como a retificação. Em função dos avanços tecnológicos, que conferiram uma maior rigidez e estabilidade dinâmica das máquinas-ferramentas, alinhados a uma melhora dos materiais das ferramentas de corte de elevada dureza e resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, tornou-se possível a usinagem desses materiais pelo processo de torneamento (ASTAKHOV e DAVIM, 2011). De acordo com Grzesik (2018), o torneamento duro é capaz de produzir peças com o acabamento superficial comparáveis à retificação.

Os mais variados materiais de ferramentas, como metal duro, cerâmicas, diamante policristalino (PCD) e nitreto cúbico de boro (CBN), têm grande uso na usinagem de materiais endurecidos. O último é apontado como uma tendência mundial, como a melhor escolha (KUMAR *et al.*, 2019). Esse fato se dá devido à sua boa condutividade térmica e dureza se comparada às outras ferramentas.

Nos processos de torneamento duro, pequenas profundidades de cortes são utilizadas devido a dureza dos materiais que são usinados. Geralmente, esses valores de profundidade de corte são menores ou igual ao raio da ponta da pastilha (YOUSEFI *et al.*, 2019).

Diversos autores dedicaram estudos para avaliar as condições de usinagem no *hard turning*. Os autores Sarmad Ali Khan *et al.* (2018) compararam uma pastilha convencional com outras de geometria de aresta alisadoras a fim de observar o comportamento dos parâmetros de saída na usinagem do aço AISI D2 tratado termicamente com dois valores de dureza (55 e 60 HRC).

No trabalho de Linhu Tang *et al.* (2019), o desempenho e os mecanismos de desgaste foram analisados em uma ferramenta de corte de PCBN no torneamento do aço temperado AISI D2 usinado a seco. Além da dureza elevada (40-60HRC), parâmetros de corte como velocidade de corte de 250 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e uma profundidade de corte constante de 0,15 mm foram aplicados. Como resultado, observaram que o desgaste de flanco aumenta linearmente com o aumento da dureza do aço AISI D2.

Ainda que o torneamento de aço endurecidos demonstre diversas vantagens em relação ao processo de retificação, não se pode afirmar que esse processo substitui todas as operações práticas nas retificadoras. Isso ocorre porque o torneamento, a retificação e outras operações de acabamento abrasivo geram diferentes estruturas superficiais, que podem influenciar em suas propriedades funcionais devido a essas distintas características topográficas. (GRZESIK, W., RECH, J. & ŽAK, K., 2015).

O estudo das características superficiais e subsuperficiais dos materiais que são obtidos por processos de usinagem, tais como microdureza, análise da tensão residual, rugosidade e transformação de fase, se torna muito importante na busca e no entendimento dos fenômenos envolvidos no processo, além da redução das falhas de componentes finais. O desempenho desses componentes depende fortemente das características e suas propriedades das superfícies finais obtidas (KAYNAK *et al.*, 2014).

A rugosidade da superfície é o resultado mais comumente visível de quaisquer processos de usinagem que pode ser usado para caracterizar a qualidade do processo, pois determina as propriedades funcionais dos componentes usinados. Isso ocorre porque a rugosidade da superfície altera a tribologia de contato, que é a chave para processos que vão desde o desgaste, adesão a fricção, lubrificação e sistemas de revestimento (BUZIO *et al.*, 2003). Isso, por sua vez, influencia a resistência à fadiga, resistência à fluência, resistência à corrosão e vida útil do componente usinado.



Deste modo, adequar e controlar a rugosidade da superficial usinada a um alto nível de precisão é um requisito fundamental para muitas aplicações relevantes (ASAKURA *et al.*, 2014).

Nesse escopo, é importante que se realize pesquisas em que seja estudado o comportamento dessas ferramentas ao usinar aços endurecidos. Diversos fabricantes propõem novos revestimentos, orientações de grãos, compostos e ligantes a fim de obter bons resultados em condições severas. Desta maneira, é possível levantar algumas questões: As ferramentas de PCBN, em dadas condições tribológicas severas, tendem a ter o mesmo desempenho para condições de cortes diferentes? A porcentagem de conteúdo de CBN, bem como o material ligante, na maioria dos casos cerâmicos, tem influência na resistência a abrasão e ao impacto na usinagem de aços ferramenta endurecidos por têmpera e revenimento?

Nesse trabalho avaliou-se o desempenho de uma ferramenta de PCBN, com 75% em volume de CBN ligados a uma matriz de Titânio (Ti), no torneamento do aço endurecido AISI D2 nas condições de corte contínuo e interrompido. Buscou-se investigar os mecanismos e tipos de desgastes sofridos, além da integridade superficial do material, com intuito de obter resultados que possam contribuir com a escolha correta da classe de CBN afim de proporcionar uma seleção mais assertiva, diminuindo os custos de fabricação e aumentando a produtividade.

Metodologia

Os experimentos dessa pesquisa foram realizados na oficina de usinagem mecânica do SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - unidade Euvaldo Lodi, localizado na cidade de Contagem, e nas dependências do SENAI CETEF - Centro Tecnológico de Fundação Marcelino Corradi, na cidade de Itaúna. As análises das ferramentas e dos materiais foram feitas no laboratório de ensaios e análises em materiais (LAMAT), pertencentes ao SENAI CETEF.

Inicialmente, os materiais foram recebidos através de doação em tarugos de Ø150 x 60 mm, oriundos de uma mesma barra. O primeiro passo realizado foi a pré-usinagem de preparação desses materiais. Foi feita em um torno convencional da marca ROMI, modelo T-240, a usinagem dos furos centrais e diâmetros externos. Em seguida, com auxílio de usinagem por eletroerosão a fio com um equipamento da marca Eurostec, modelo FW2, foram realizados cortes transversais reduzindo-os a espessuras próximas as medidas finais do corpo de prova. Sabe-se que este processo usinagem demanda um tempo maior que demais processos; no entanto, diante da disponibilidade da máquina e facilidade de execução por parte do autor, o equipamento foi escolhido para tal operação. Após esse processo, os discos foram novamente usinados em ambas as faces, para a remoção da camada superficial alterada (camada branca) para realização dos tratamentos térmicos. Estes foram realizados com apoio externo.

O processo de têmpera e revenimento ocorreu inicialmente, através do aquecimento das amostras a 1020 °C por um tempo de 30 minutos. Em seguida, resfriamento interrompido a 500 °C para o primeiro revenimento por cerca de 3 horas. Foram realizados também mais dois revenimentos, ambos a 500 °C por um tempo de 3 horas.

Uma amostra do aço AISI D2 foi caracterizada através de espectrometria de emissão ótica por meio do espectrômetro SPECTROMAXx, com intuito de verificar sua composição química. Para avaliação das alterações microestruturais, as amostras foram preparadas, embutidas em resina e atacadas com Vilella por aproximadamente 20 segundos. A avaliação foi realizada com auxílio de um microscópio Ótico GX51 OLYMPUS. Um ensaio de dureza na escala Rockwell C também foi realizado com o durômetro universal Dura Visio DV30 antes e após os tratamentos térmicos.



A máquina que foi utilizada no torneamento é um torno CNC marca Nardini, modelo Logic VS I. O equipamento possui potência nominal disponível 7,5 kW, rotação máxima de 3500 RPM, distância entre pontas de 1000 mm, diâmetro máximo de 440mm, torre traseira com 8 posições e avanço rápido em X e Z é de 15 m/min. A placa possui acionamento pneumático com 8 bar de pressão.

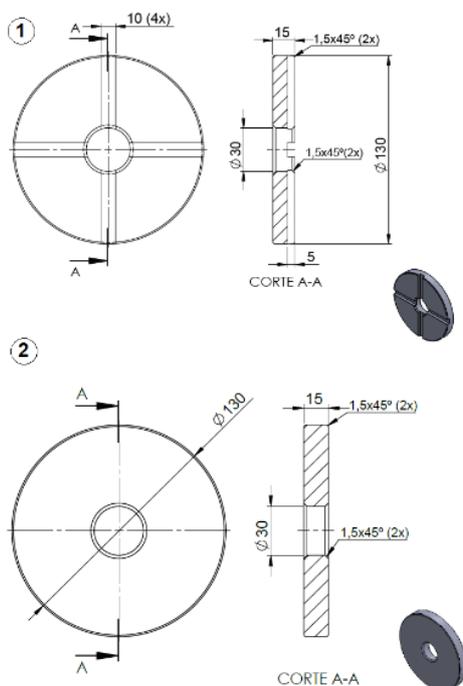
Para a fixação dos corpos de prova na máquina, foi necessário usinar castanhas com o objetivo de criar um batente de apoio para facilitar o encaixe correto e ajuste da profundidade, haja visto que o formato de disco é utilizado na pesquisa em operação de faceamento.

Os insertos utilizados nos ensaios foram fornecidos pelo fabricante MAPAL do Brasil com o contato direto com a fábrica no país. Foram fornecidos insertos com geometria ISO DCGW 11T304S14N-OAB-PCBN. A matéria prima de CBN utilizada foi desenvolvido pela Diamond Innovations da classe compacto de BZN 9000. Possui elevado volume em porcentagem de CBN, cerca de 75% de volume na matriz com base de Titânio (Ti). Tem tamanho médio de partículas 4 μm .

O suporte porta-ferramentas utilizado foi SDJCL 2020K 11, com ângulo de posição (93°), ângulo de ataque da ferramenta (-3°), ângulo de saída ortogonal (0°), ângulo de inclinação (0°), Ângulo do corpo da ferramenta em relação à máquina (0°), e ângulo do corpo da ferramenta em relação à peça (0°).

A geometria do corpo de prova tem o formato circular (disco) contendo em seu centro um furo passante. Essa geometria induz uma maior rigidez no que diz respeito a usinagem, porque possui pequenos comprimentos em balanço. Para o corte interrompido é realizado rasgos na face. Na Figura 1 é apresentada a geometria.

Figura 1 - Geometria dos corpos de prova: 1 corte interrompido e 2 corte contínuo



Preparados os corpos de provas, iniciou-se o torneamento externo a seco em sucessivos passes no sentido radial (faceamento) tanto para o corte contínuo como o interrompido. Foram realizados 5 passes de 0,2 mm de profundidade de corte (a_p) totalizando 1 mm de material removido para cada faixa de velocidade de corte determinada (60, 130, 200 e 240 m/min). Em cada faixa, uma



nova ferramenta era selecionada. O avanço foi mantido o mesmo para todos os experimentos $f = 0,15 \text{ mm/rev}$. O acabamento superficial da peça usinada foi medido com auxílio de um rugosímetro marca e modelo Mitutoyo SJ-210, realizando-se em três pontos distintos nos parâmetros R_a , R_z e R_t .

Resultados

3.1. Análise da Composição Química, Metalográfica e Dureza

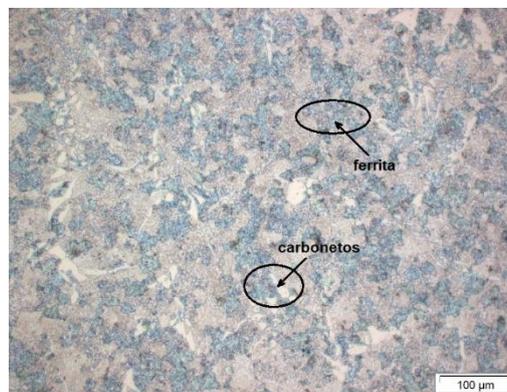
O resultado da análise química através de espectrometria de emissão óptica com espectrômetro SPECTROMAXx, pode ser analisado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do material

C %	Mn %	Cr %	Mo %	V %
1,5865	0,3256	11,6740	0,6818	0,8324

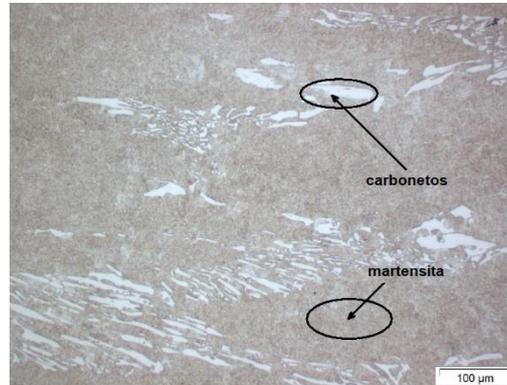
Os valores encontrados estão condizentes com os que são estabelecidos através da regulamentação normativa. Na Figura 2 é apresentado a microestrutura do aço AISI D2 em seu estado normalizado, sem a submissão de tratamento térmico de têmpera e revenimento com ampliação de 200x e reativo Vilella.

Figura 2 - Microestrutura do aço AISI D2 – normalizado



Nota-se a presença de ferrita e carbonetos, característicos desse tipo de aço, em função da sua composição química, onde, através dos elementos de liga, promovem a anuência de carbonetos na microestrutura. Após a realização dos tratamentos térmicos, é obtida a microestrutura que pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 - Microestrutura do aço AISI D2 – temperado e revenido



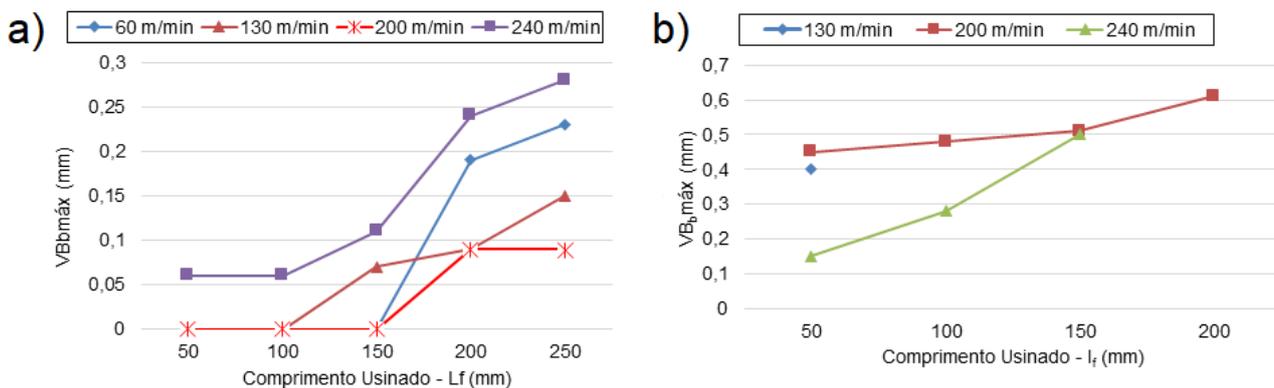
É possível observar a presença maciça de martensita em toda região analisada, formada a partir da têmpera, além de grande parte de carbonetos característicos desse material.

Em relação a análise dureza, é encontrado um valor médio de 15,17 HRC antes do tratamento térmico, sendo esse valor tipicamente encontrado nesse tipo de aço sem tratamento térmico. Em relação aos valores encontrados após tratamento térmico de têmpera e revenimento, o valor médio encontrado foi de 59,86 HRC, atingindo o objetivo inicialmente estabelecido.

3.2. Análise dos Desgastes da Ferramenta de Corte e Mecanismos

A seguir, é apresentado os resultados do desgaste de flanco máximo (VB_b máx) e as análises dos mecanismos em cada faixa de velocidade de corte nas duas condições usinadas. Na Figura 4, é apresentada a evolução do VB_b máx em função do comprimento usinado (l_f) para as curvas de velocidades de corte na condição de corte contínuo e interrompido.

Figura 4 - Evolução do VB_b máx em função do comprimento usinado (l_f) a) Corte contínuo e b) Corte interrompido



Na análise para corte contínuo em velocidade de corte de 60 m/min, é observado valores somente a partir de $l_f = 200$ mm, tendo VB_b máx = 0,19 mm e atingindo um valor máximo de 0,23 mm ao final dos passes. Em relação a curva de velocidade de corte 130 m/min, apenas foi possível de medir a partir de 150 mm de comprimento usinado, iniciando com VB_b máx = 0,07 mm, tendo seu valor máximo de desgaste de 0,15 mm em $l_f = 250$ mm. Já na faixa de velocidade de corte de 200 m/min, apenas no comprimento usinado de 200 mm, o VB_b máx foi de 0,09 mm e manteve o valor até o último passe. Percebe-se que a evolução do desgaste de flanco máximo para a $V_c = 240$ m/min

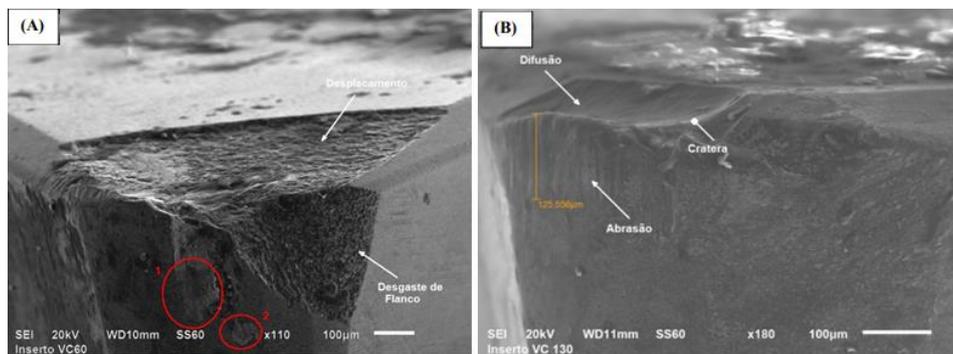


apresentou valores desde o primeiro passe com 0,06 mm, até atingir o valor máximo de $VB_{b\text{máx}} = 0,28$ mm.

No corte interrompido, na faixa de velocidade de corte de 60 m/min, não foi possível realizar nenhuma medição em função de falha catastrófica logo no primeiro instante de corte. Em 130 m/min, é medido o desgaste apenas no primeiro passe ($l_f = 50$ mm), pois logo no próximo comprimento usinado a ferramenta falhou. Não foi possível realizar a medição do desgaste no comprimento usinado de 250 mm em nenhuma das faixas de velocidade de corte, em função de quebras e falhas catastróficas anteriores

As avaliações através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) estão descritas nas próximas figuras. Na Figura 5, é apresentado o estado final da ferramenta em corte contínuo nas velocidades de corte de 60m/min (A) e a 130 m/min (B).

Figura 5 – Análise (MEV) em corte contínuo – (A) $V_c = 60$ m/min (B) $V_c = 130$ m/min

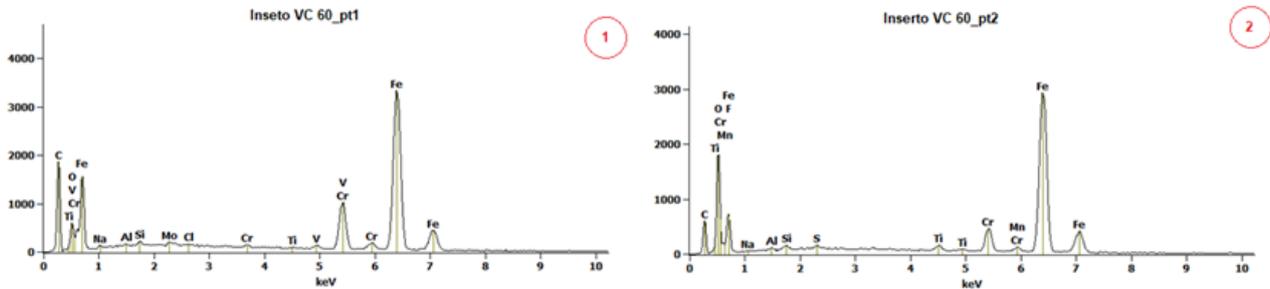


Na $V_c = 60$ m/min (A), é possível notar um desprendimento de material da superfície de saída da ferramenta e um desgaste de flanco significativo. O movimento relativo entre peça e a ferramenta promoveu o deslocamento tanto do próprio material aderido como de pequenas partículas da ferramenta. Boing, (2016). Tal situação caracteriza o mecanismo de adesão (*attrition*) que ocorre a baixas velocidades de corte e temperaturas menores. Foi realizada uma espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao (MEV) para a velocidade de corte de 60 m/min, que é apresentado na Figura 6. O resultado da análise apontou a presença dos elementos como Ferro (Fe), Cromo (Cr) e Vanádio (V) condizem com a composição química do corpo de prova usinado, caracterizando material aderido a ferramenta.

Ao analisar a $V_c = 130$ m/min (B), observou-se a presença dos desgastes de cratera e flanco. Houve, a partir dessa faixa de velocidade, uma mudança no mecanismo de desgaste. A abrasão atuou contribuindo para os dois tipos de desgastes, e além dele, é destaque o mecanismo de difusão devido a evidência de aspecto liso no interior da cratera, característico do processo difusivo. (SANTOS e SALES, 2007).

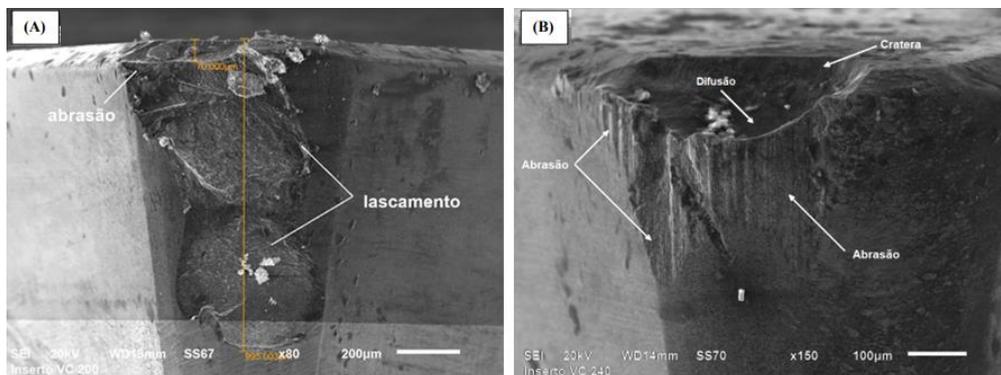


Figura 6 - Análise EDS - corte contínuo $V_c = 60$ m/min



Na Figura 7, é mostrado o estado final da ferramenta em corte contínuo nas velocidades de corte de 200 m/min (A) e a 240 m/min (B). Na faixa de 200 m/min a ferramenta teve seu comportamento satisfatório até o penúltimo passe. De uma maneira geral, o desgaste ocorrido não é proveniente apenas de um mecanismo, mas sim de uma combinação de vários deles. As características do aço AISI D2 endurecido (presença grande de carbonetos, resistência à alta temperatura), ocasionaram em grande parte das velocidades de corte estudadas, um intenso desgaste proporcionando um tempo de vida reduzido. Provavelmente ocorreram os mecanismos de difusão e abrasão, por provocarem uma cratera considerável na superfície de saída e o processo de lascamento ocorrido no último passe.

Figura 7 - Análise (MEV) em corte contínuo – (A) $V_c = 200$ m/min (B) $V_c = 240$ m/min

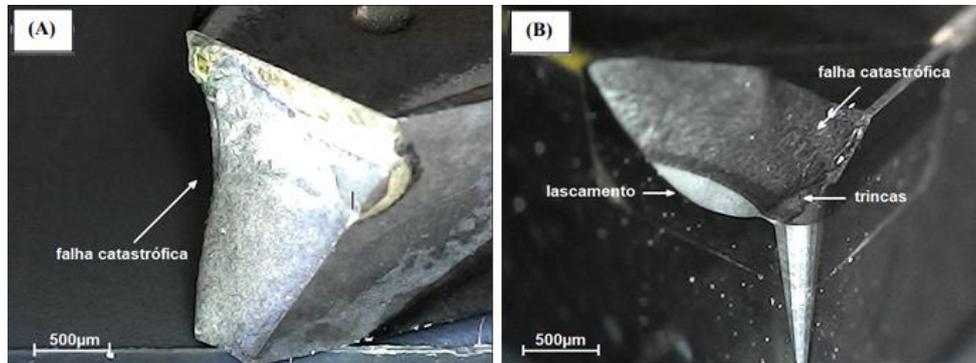


No ensaio com velocidade de corte 240 m/min (faixa de maior valor recomendado pelo fabricante), a ferramenta comportou-se de maneira satisfatória, principalmente na atuação com gume novo e no posterior passe. Como pode ser observado, o desgaste de cratera provocado pelos mecanismos de abrasão seguido de difusão, mais uma vez foi predominante, além do desgaste de flanco. Segundo Trent e Wright, (2000), Diniz e Oliveira (2018), as altas temperaturas presentes na região do corte tende a estimular os dois mecanismos citados. Isso porque a remoção de fragmentos da ferramenta por abrasão, favorece a troca de partículas entre ferramenta e cavaco (difusão). Não houve a presença de trincas ou lascamentos nessa faixa de velocidade de corte, o que torna uma escolha interessante no que tange a produtividade.

Nas análises realizadas para corte interrompido, inicialmente a velocidade de corte de 60 m/min e 130 m/min se comportou de maneira insatisfatória. Logo nos primeiros instantes do corte a ferramenta falhou. A condição tribológica severa, seguida pelo número maior de entradas e saídas, provocou a falha da ferramenta, não suportando os impactos do corte interrompido. A tenacidade e dureza da ferramenta não foram capazes de suportar a esses esforços impulsionados pelas baixas velocidades de cortes. Na Figura 8, é apresentado o estado final.

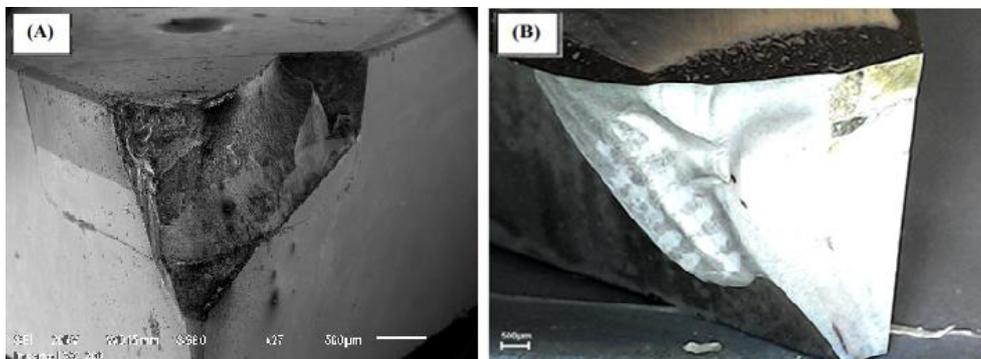


Figura 8 - Estado final das ferramentas em corte interrompido - (A) V_c 60 m/min e (B) V_c 130 m/min



Nos testes com a ferramenta em maiores velocidades de corte (Figura 9), houve um desempenho ligeiramente mais satisfatório que os resultados anteriores. Na $V_c = 200$ m/min, o ensaio foi realizado até o comprimento usinado de 200 mm, culminando no último passe com a quebra do inserto. Já na indicação da maior faixa de velocidade de corte indicada pelo fabricante em $V_c = 240$ m/min, a ferramenta conseguiu alcançar apenas 150 mm de comprimento usinado, culminando com falha catastrófica.

Figura 9 - Estado Final das ferramentas em corte interrompido (A) $V_c = 200$ m/min (B) $V_c = 240$ m/min



3.3. Análise da Rugosidade

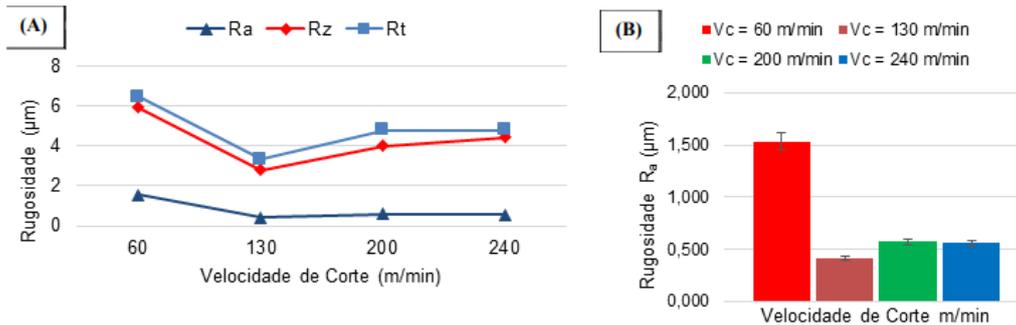
Para realizar a avaliação do acabamento superficial, foram analisados a evolução da rugosidade da superfície, comparando-a em alguns aspectos, como a influência da velocidade de corte em função dos comprimentos de usinagem, nas condições de corte contínuo e interrompido. Embora, sabe-se que o avanço é o parâmetro mais influente no acabamento superficial (FERRARESI, 2014), (MACHADO *et al.*, 2015), outras condições afetam a qualidade da superfície e devem ser avaliadas para a melhor compreensão do processo.

Inicialmente, ao observar a influência da velocidade de corte na rugosidade do aço AISI D2 em corte contínuo, no último passe (Figura 10-A), notou-se um comportamento semelhante nos três parâmetros avaliados. Houve inicialmente uma redução nos valores de rugosidade na velocidade de corte de 130 m/min em relação a velocidade de 60 m/min, 200 m/min e 240 m/min. Nas duas maiores V_c , ocorreu pouca variação dos resultados, mostrando uma faixa estável para a condição de corte contínuo. Na avaliação da rugosidade média (R_a) (Figura 10-B), é apontado um melhor resultado para a faixa de velocidade de corte de 130 m/min que atingiu valor de R_a 0,416 μm , condição favorável para operações de acabamento e que pode ser usado para caracterizar a



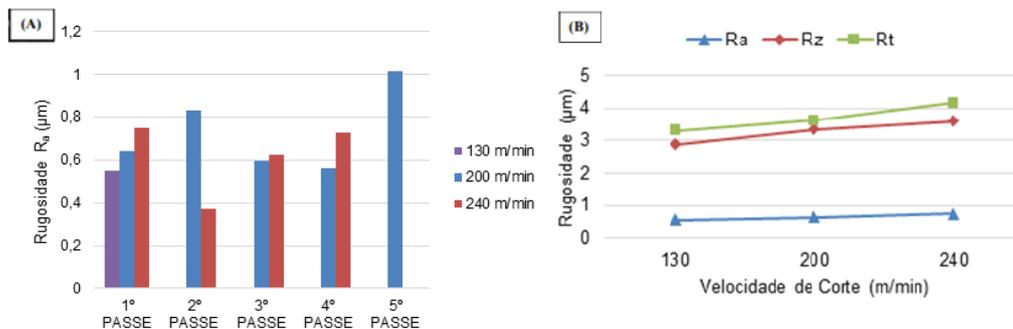
qualidade da usinagem, uma vez que determina as propriedades funcionais de um componente usinado (ANUPAM *et al.*, 2015).

Figura 10 - (A) Efeito da velocidade de corte na rugosidade superficial do aço AISI D2 nos parâmetros R_a , R_z e R_t (B) rugosidade média (R_a) em função da variação das velocidades de corte – corte contínuo



Na análise da condição de corte interrompido apresentado na Figura 11 (A), a faixa de velocidade de corte 60 m/min não aparece nos gráficos, pois não foi possível medir a rugosidade em função da quebra ocorrida no início do corte. Nota-se que a faixa de velocidade de corte que obteve a menor rugosidade avaliada foi a 240 m/min, com um valor de $R_a = 0,549 \mu\text{m}$ no segundo passe, e a maior rugosidade medida ocorreu com velocidade de corte de 200 m/min no último passe, com um valor de $1,013 \mu\text{m}$. A partir do segundo passe, não houve valores de rugosidade para a faixa de 130 m/min, pois a ferramenta sofreu quebra impedido a continuação do ensaio. Também, não houve valores para a faixa de 240 m/min, a partir do quarto passe pelo mesmo motivo. Observou-se que o aumento da velocidade de corte não influenciou de forma significativa nos valores da rugosidade superficial para a ferramenta com o gume novo. Portanto, nessa faixa (130 a 240 m/min) o aumento da velocidade de corte tem pouca ação na qualidade superficial quando se trata de ferramentas novas. No geral, a rugosidade é aumentada pela evolução do desgaste. Na Figura 11 (B) é mostrado uma avaliação apenas do primeiro passe, dos três parâmetros de rugosidades avaliados. Não houve diferença significativa nas faixas de $V_c = 130, 200$ e 240 m/min.

Figura 11 - (A) Evolução da rugosidade média (R_a) em função dos passes (B) efeito da velocidade de corte na rugosidade superficial do aço AISI D2 nos parâmetros R_a , R_z e R_t - corte interrompido



Conclusão

Os desgastes ocorridos no corte contínuo de maiores evidências foram cratera e flanco. Assim como, lascamento e falha catastrófica no corte interrompido. Os mecanismos de destaque foram adesão (*attrition*), abrasão e difusão.



Com o aumento da velocidade de corte observou-se a mudança do mecanismo de desgaste, passando de *attrition* ($V_c = 60$ m/min) para abrasão e difusão ($V_c = 130, 200$ e 240 m/min), convergindo com as informações disponíveis em literatura.

O aumento da velocidade de corte teve influência direta no aumento do desgaste da ferramenta, como esperado. No corte contínuo a ferramenta teve um desempenho mais satisfatório, conseguindo atingir 250 mm de comprimento usinado em todas as velocidades de corte selecionadas.

Na faixa de velocidade de corte de 130m/min em corte contínuo foi medido uma rugosidade média (R_a) de $0,416\mu\text{m}$. Resultado muito favorável que pode ser equiparado as operações de retificação, tornando possível a substituição do processo em situações determinadas.

Os testes mostraram que o desgaste de flanco não necessariamente resulta em aumento da rugosidade, e, à medida que acontece a sua acomodação ao longo de um determinado tempo de corte, a qualidade superficial melhora.

A classe BZN9000 não foi suficientemente dura e tenaz para suportar os impactos causados pelo corte interrompido, não sendo indicado para esse tipo de operação. Em contrapartida, para o corte contínuo maiores velocidades são indicadas, o que demonstra bons resultados em termos de aumento de produtividade.

Agradecimentos

O autor agradece as unidades SENAI Euvaldo Lodi – Contagem e SENAI CETEF – Itaúna pela disponibilidade de equipamentos e apoio com as análises. À Mapal do Brasil pela doação e apoio das ferramentas de corte. À LCF Indústria Mecânica pela doação dos aços AISI D2. E à Metaltemper por ter realizados os tratamentos térmicos nas amostras.

Referências

AMLANA PANDA, ASHOK KUMAR SAHOO, RAMANUJ KUMAR, RABIN KUMAR DAS, A review on machinability aspects for AISI 52100 bearing steel, **Materials Today: Proceedings**, Volume 23, Part 3, 2020, Pages 617-621, 2020.

ANUPAM AGRAWAL, SAURAV GOEL, WALEED BIN RASHID, MARK PRICE, Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC), **Applied Soft Computing**, Volume 30, Pages 279-286, 2015.

ASAKURA, Kazuma; YAN, Ji Wang. Ultraprecision micro grooving on brass for surface wettability control. In: **Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd.** p. 489-494, 2014.

ASTAKHOV, V. P. Machining of Hard Materials – Definitions and Industrial Applications. In: DAVIM, J. D. **Machining of Hard Materials. Springer-Verlag London Limited.** p. 211, 2011.

BOING, DENIS. **Transição da aplicação do metal-duro revestido e do PCBN no torneamento de aços endurecidos em função da dureza e do teor carbonetos.** 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

BOING, D.; SCHROETER, R.B.; OLIVEIRA, A.J. Three– Dimensional Wear Parameters and Wear Mechanisms in Turning Hardened Steels with PCBN Tools. **Wear**, v. 398– 399, p. 69– 78, 2018.



BUZIO, Renato *et al.* The contact mechanics of fractal surfaces. **Nature materials**, v. 2, n. 4, p. 233-236, 2003.

DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, A. J. D. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 195, 275-281, 2018.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 17^a Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2014.

GRZESIK, W. Prediction of surface topography in precision hard machining based on modelling of the generation mechanisms resulting from a variable feed rate. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v. 94, p. 4115– 4123, 2018.

GRZESIK, W., RECH, J. & ŽAK, K. Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations. **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, v.78, p.2049–2056, 2015.

KAYNAK, Y.; LU, T.; JAWAHIR, I.S. Cryogenic machining-induced surface integrity: A review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. **Machining Science and Technology: An International Journal**, v.18, p. 149-198, 2014.

KUMAR, P.; CHAUHAN, S.R.; PRUNCU, C.I.; GUPTA, M.K.; PIMENOV, D.Y.; MIA, M.; GILL, H.S. Influence of Different Grades of CBN Inserts on Cutting Force and Surface Roughness of AISI H13 Die Tool Steel during Hard Turning Operation. **Materials**, v.12, 177p., 2019.

LINHU TANG, YONGJI SUN, BAODONG LI, JIANCHENG SHEN, GUOLIANG MENG, Wear performance and mechanisms of PCBN tool in dry hard turning of AISI D2 hardened steel, **Tribology International**, Volume 132, 2019, Pages 228-236, 2019.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da Usinagem dos Materiais**.3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora, v. 246, 2007.

SARMAD ALI KHAN, MUHAMMAD UMAR, MUHAMMAD QAISER SALEEM, NADEEM AHMAD MUFTI, SYED FARHAN RAZA, Experimental investigations on wiper inserts' edge preparation, workpiece hardness and operating parameters in hard turning of AISI D2 steel, **Journal of Manufacturing Processes**, Volume 34, Part A, Pages 187-196, 2018.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Coolants and lubricants BT - Metal Cutting (Fourth Edition)**. [S.l.]: [s.n.], 311–337 p., 2000.

YOUSEFI, S., ZOHOOR, M. Effect of cutting parameters on the dimensional accuracy and surface finish in the hard turning of MDN250 steel with cubic boron nitride tool, for developing a knowledge based expert system. **Int J Mech Mater Eng** 14, 1, 2019.



Estudo comparativo de brasagem de tubos em aço baixo carbono pelos processos de indução e forno contínuo

Alexandre Aurelio Santos Diniz¹, Sandro Cardoso Santos¹, Ivanilza Felizardo¹

¹CEFET-MG, Belo Horizonte (PPGEM, Departamento de Engenharia Mecânica)

Resumo: Tubos hidráulicos são componentes presentes em máquinas agrícolas. Tubos são unidos a conexões, principalmente pelo processo de brasagem. Os processos de brasagem por indução e por forno contínuo foram comparados em um novo projeto numa manufatura brasileira. O primeiro mostra-se competitivo para baixo e médio volume produtivo, enquanto o segundo para alto volume. Ambos os processos promovem juntas brasadas de alta qualidade e resistência mecânica.

Palavras-chave: Brasagem por indução; Brasagem em forno contínuo; Tubos hidráulicos;

Introdução

Dentre os vários segmentos da indústria de veículos automotores, destaca-se às máquinas agrícolas responsáveis diretamente pela mecanização da agricultura, gerando aumento da produtividade e profissionalização da cadeia produtiva do agronegócio (Seibel, 2007). O sistema hidráulico presente na máquina agrícola é responsável pela geração, controle e transmissão de energia por meio de fluido (óleo hidráulico) pressurizado, o que proporciona características tais como controle de velocidade e do sentido de deslocamento e alta precisão e força na operação dos implementos agrícolas (Garcia e Junior, 2020). Diferentes componentes integram o sistema hidráulico de máquinas agrícolas, em maior quantidade apresentam-se os tubos e conexões hidráulicas em aço baixo carbono, projetados em diferentes geometrias e dimensões e unidos principalmente por brasagem. A brasagem é amplamente utilizada na indústria metal mecânica e consiste na utilização de um metal de adição com ponto de fusão inferior ao ponto de fusão do metal base. Durante o processo de brasagem, apenas o metal de adição funde e reage quimicamente com as superfícies dos metais base. Nessa união, para que seja perfeita, é necessário que o líquido formado molhe as superfícies do metal base e seja conduzido por capilaridade para os vazios (folgas geométricas) existentes entre o tubo e as conexões flanges e/ou conectores hidráulicos (Paula e Borges, 2002). Quanto à qualidade, a união por brasagem deve resultar em patamares de resistência mecânica adequada para suportar cargas e vibrações típicas aplicadas em máquinas off-road como as máquinas agrícolas e ser estanques (isento de vazamento de óleo hidráulico). As propriedades mecânicas das juntas brasadas dependem diretamente de diversos fatores, dentre eles a natureza do metal de adição, que são ligas ou metais puros apropriados para a brasagem utilizados na forma de arames, varetas, pastas, pós, chapas, fitas e pré-formados (Okimoto, 1999).

A brasagem por indução é um processo que utiliza o campo magnético gerado por um indutor ou bobina para a união de metais base e adição. Para Marques et al (2009), o aquecimento da peça é obtido pela dissipação de calor provocada por correntes elétricas induzidas por uma bobina conectada a uma fonte de energia elétrica de corrente alternada. O aquecimento é restrito a uma pequena área, e se propaga às áreas restantes da peça por condução ou pelo deslocamento da peça em relação à bobina, o metal de adição é normalmente colocado com antecedência na junta e a proteção é feita por fluxo.

Fernandes (2011) destaca que a brasagem por indução se caracteriza pelo aquecimento rápido e localizado. Esse método de aquecimento, rápido e versátil, consta essencialmente de um



transformador cujo enrolamento secundário está ligado em circuito a uma bobina de cobre tubular, resfriada com água que envolve as peças sem qualquer contato direto, produzindo aquecimento localizado por meio de fluxo magnético de média ou alta frequência que emana da bobina. O forno mais utilizado para o processo de brasagem é o contínuo tipo esteira transportadora com atmosfera controlada e temperaturas até 1.150°C.

O objetivo deste trabalho foi comparar 2 (dois) tipos de processos de brasagem (indução versus forno contínuo) aplicados no desenvolvimento de um tubo hidráulico em aço baixo carbono em união com conexão hidráulica, na forma geométrica de flange em ferro fundido cinzento. Como objetivos específicos buscou-se apontar de forma comparativa: vantagens e desvantagens de cada processo; dificuldades de desenvolvimento; resistência mecânica da junta brasada; riscos Qualitativos; produtividade e custos envolvidos.

Metodologia

Para confecção das amostras foram utilizados tubos circulares trefilados sem costura, conforme norma EN10305 (ISO E235), nas dimensões 12 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura.

Os metais de adição foram pré-selecionados a partir do tipo de processo de brasagem. Para o processo de brasagem por indução foi utilizado liga de prata AWS BAg34 e para o processo de brasagem por forno contínuo, o cobre puro (99% de composição química), conforme norma AWS A5.7/07. Foi utilizado o metal de adição comercialmente disponível em formato de anel.

Foi utilizado para brasagem das amostras a máquina de indução de 1000 KWA, fabricante JAMO. A temperatura de indução é um parâmetro chave para a qualidade da união por brasagem. Foi ajustado a temperatura de fusão de 720°C em um tempo de indução de 2,5 segundos.

O processo de brasagem foi realizado em forno contínuo de esteira metálica constando de aquecimento a gás GLP na câmara, dotado do sistema de atmosfera protetora na câmara (Hi/Ni) tendo acoplado uma câmara de resfriamento controlado dos materiais processados, obtendo uma uniformidade de processo e performance operacional.

As peças foram posicionadas diretamente sobre a esteira na área de entrada sendo movimentada com acionamento eletromecânico para sua transferência internamente na câmara aquecida do forno e da área de resfriamento totalmente automatizada e controlado por painel elétrico. Foram utilizados a temperatura de brasagem de 1050°C a uma velocidade de esteira de 250 mm/min.

Resultados e Discussão

Foram fabricadas 6 (seis) amostras em cada processo de brasagem (indução e forno contínuo). As peças foram preparadas em laboratório para exame visual e macrografia conforme demonstrado na Figura 1 (esquerda).

As amostras brasadas em forno contínuo foram aprovadas (100%) no exame visual e ensaio metalográfico de macrografia. As amostras brasadas em processo de indução resultaram em 33% de reprovação devido às falhas de preenchimento por capilaridade da folga de junta, apresentando 37,8% do comprimento total da junta brasada (10,208 mm) sem preenchimento, conforme pode ser visto na Figura 1 (direita).

Uma análise detalhada foi realizada sobre o problema utilizando metodologias da qualidade e desenvolvimento de produto (Kaizen, FMEA de Processo, dentre outras) e foi identificada como causa raiz a existência de grau de liberdade aleatória no dispositivo de fixação do flange no suporte da máquina de brasagem por indução, conforme apresentado na Figura 2 (esquerda).

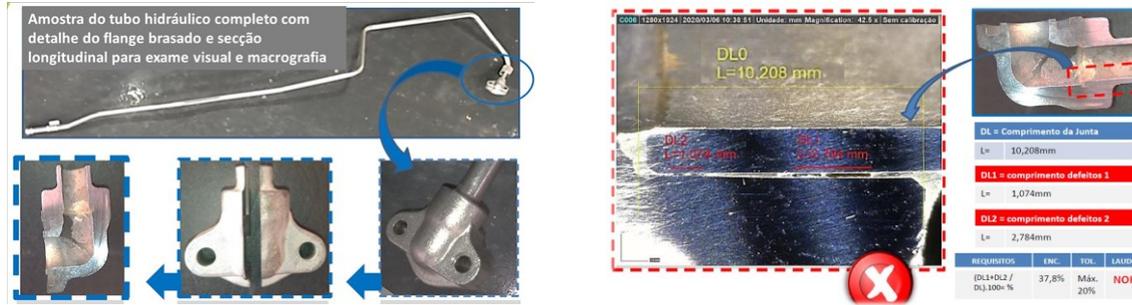


Figura 1. Preparação de amostras para macrografia | Macrografia brasagem por indução reprovada

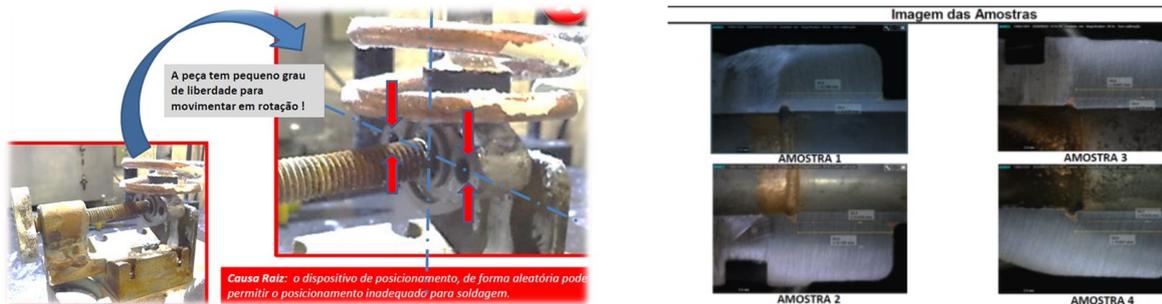


Figura 2. Dispositivo brasagem por indução | Macrografia brasagem por indução aprovada

Após implementação de ações corretivas robustas no processo de indução, novas amostras foram fabricadas e submetidas a exame metalográfico e aprovadas, Figura 2 (direita). O comprimento da junta brasada (10,208 mm) foi completamente preenchido por capilaridade

Todas as amostras (de ambos os processos de brasagem) foram aprovados no ensaio destrutivo de alta pressão hidráulica (ruptura) para validação das propriedades mecânicas das juntas brasadas. Aplicou-se pressão hidráulica acima da tensão de ruptura do metal base. Em todas as amostras ensaiadas não houve ruptura da junta brasada. Na Figura 3 (esquerda) observa-se que a ruptura ocorreu no parafuso de fixação do flange na bancada de teste após ultrapassar a pressão correspondente ao limite de ruptura do metal base, resultando em ensaio aprovado. Em algumas amostras (na mesma pressão de ensaio) houve deformação plástica no tubo como apresentado na Figura 3 (centro), também configurando aprovação da junta brasada quanto à resistência mecânica. A Figura 3 (direita) evidencia amostras de tubos hidráulicos acabados, com aplicação de pintura superficial protetora. As setas indicam a região de brasagem.

A Tabela 1 representa a sinopse da entrevista conduzida com 1 (um) engenheiro de produto, 2 (dois) engenheiros de processo e (1) um engenheiro da qualidade, integrante do time de profissionais do fabricante de tubos hidráulicos brasados envolvidos neste projeto. Obteve-se por consenso técnico desse time, as seguintes atribuições comparativas entre o processo de brasagem por indução e o processo de brasagem por forno contínuo, baseando-se no projeto do tubo hidráulico desenvolvido nesse trabalho, bem como na extensa experiência profissional. Os profissionais entrevistados ressaltaram que no Brasil há competentes fabricantes de máquina de brasagem a indução bem como fabricantes de forno contínuo, gerando autonomia tecnológica estrangeira, ou seja, não é necessário importar máquinas e equipamentos de brasagem.



Figura 3. Ensaio destrutivo alta pressão | Detalhe deformação plástica tubo | Produto acabado pós brasagem e pintura

Tabela 1. Variáveis comparativas por tipo de processo de brasagem

Variável Comparativa	Tipo Processo Brasagem		Comentários
	Indução	Forno Contínuo	
Custo de Fabricação	↓	↑	Indução: Pasta de fluxo obrigatório Forno: Alto consumo de energia (necessário ficar ligado durante todo turno produtivo)
Custo Metal de Adição	↑	↓	Indução: Alto custo liga de prata; Forno: Menor custo cobre puro.
Produtividade	=	=	Indução: Maior produtividade para médio/baixo volumes; Forno: Maior produtividade para altos volumes
Risco Qualitativo	↑	↓	Indução: Maior risco set up processo (fixação peça, ajuste parâmetros brasagem, etc); Forno: Maior controle processo (set up inclusive)
Resistência Mecânica	=	=	Resistência mecânica equivalentes
Limitação pela geometria da peça	↓	↑	Indução: Alta flexibilidade quanto a dimensões e complexidade geométrica das peças; Forno: Restrição de tamanho de porta do forno.
Complexidade desenvolv. do processo	↑	↓	Indução: Necessário atenção a mais variáveis de processo (mão de obra, máquina, etc); Forno: Processo robusto (maior nível automação)

O custo de compra e manutenção (aquisição e gestão de ativo) do forno contínuo é bem maior que as máquinas de brasagem por indução, porém o forno contínuo oferece destacadas vantagens complementares: peças saem do forno totalmente limpas e sem óxidos, podendo ser imediatamente submetidas aos processos de pintura, galvanização ou qualquer outro tipo de acabamento; dispensa o uso de fluxos; preserva a superfície metálica original; elimina

eventual oxidação pré-existente; excelente penetração do metal de adição; aquecimento e resfriamento controlados; permite tratamentos térmicos e termoquímicos posteriores.



Conclusão

O alto investimento para aquisição do forno contínuo justifica-se para organizações industriais com alta escala de produção para componentes fabricados em série, desde simples às complexas geometrias, porém apresenta a grande limitação de tamanho de porta (largura e altura da porta de entrada do forno).

O processo de brasagem por indução apresenta-se versátil e produtivo para pequenos e médios lotes de produção mas demonstra ser ineficiente para produção de peças de diferentes geometrias (diâmetros, formas e comprimentos diferentes), onde a necessidade de frequentes preparação de máquinas (*setups* de processo) traz perda de produtividade e riscos qualitativos haja vista a maior dependência de mão de obra especializada, oposto do forno contínuo que possui robusto controle de processo devido a maior automação, à vista disso esforços e cuidados preventivos maiores devem ser dedicados ao desenvolvimento do processo de brasagem por indução para garantia da qualidade da junta brasada bem como controle do produto e processo durante a fabricação.

Ambos os processos de brasagem, desde que adequadamente desenvolvidos e controlados, produzem juntas brasadas de alta qualidade e confiabilidade mecânica a custo competitivo.

Agradecimentos

Agradecemos a empresa parceira fabricante de tubos hidráulicos pelo profissionalismo dos colaboradores, pelos recursos industriais e laboratoriais disponibilizados. Aos professores do CEFET-MG campus Belo Horizonte Sandro Cardoso e Ivanilza Felizardo, pelo suporte metodológico, científico e motivacional dispensados para realização deste projeto.

Referências

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

GARCIA, Ricardo Ferreira, JUNIOR, José Francisco Sá Vasconcelos. «Manutenção do sistema hidráulico de tratores» Publicado em 16 de junho de 2020. Artigo publicado na edição 162 da revista Cultivar. [acesso em 18 de janeiro de 2022]. Disponível em <https://revistacultivar.com.br/artigos/manutencao-do-sistema-hidraulico-de-tratores>

MACHADO, I. G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. 1 ed. Porto Alegre: UFRGS, 1996.

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

OKIMOTO, Paulo C. Brasagem sem fluxo entre aço carbono e cobre com metais de adição convencionais à base de Ag e com revestimento metálico de Sn. Tese Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999

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

PAULA, T. J. de; BORGES, C. P. Brasagem: Influência do tamanho de grão no processo de brasagem. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. João Pessoa, 2002.

SEIBEL, Felipe. «O novo salto do agronegócio» Revista digital Exame. Publicado em 14 de junho de 2007. Acesso em 18 de janeiro de 2022. Disponível em <https://exame.com/revista-exame/a-revolucao-nao-pode-parar/>



Análise de um sistema de resfriamento geotérmico aplicado para climas tropicais

Renato Vinicius¹, Tiago de Freitas Paulino¹, Paulo E. L. Barbieri¹

1. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), programa de pós graduação em engenharia mecânica

Resumo

A climatização de espaços em regiões tropicais como no Brasil, demandam muita energia elétrica, além disso, o crescimento populacional, econômico e as mudanças climáticas têm resultado em uma crescente demanda por refrigeração e climatização, diante desse cenário, soluções que promovam o aumento da eficiência energética de plantas e equipamentos de climatização e refrigeração podem colaborar na redução do consumo de energia elétrica e promover a sustentabilidade ambiental do planeta. Os sistemas de climatização e refrigeração assistidos geotermicamente são mundialmente conhecidos como uma solução eficaz para melhoria da performance dos ciclos de refrigeração/aquecimento, além de ser uma energia confiável, econômica, segura e ecológica. Pelas suas vantagens, hoje é utilizada em grande escala em vários países pelo mundo, mas ainda pouco empregada no Brasil. Este trabalho tem por objetivo verificar a performance energética de um sistema de refrigeração de expansão indireta de grande porte com condensador geotérmico acoplado, em comparação com o mesmo sistema com condensação convencional (Torres de resfriamento evaporativo), para aplicação em climas tropicais. A proposta é simular através de um modelo matemático, a operação anual dos 2 sistemas para 4 cidades do Brasil avaliando a viabilidade técnica e financeira do sistema de refrigeração com condensador geotérmico.

Palavras-chave: Modelo matemático. Sistema de ar condicionado. Condensador geotérmico.

Introdução

Pode-se melhorar substancialmente o desempenho energético de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor ao se utilizar soluções técnicas capazes de proporcionar o aproveitamento de outras fontes de energia no processo. A ideia fundamental é utilizar essa energia disponível no circuito de compressão para diminuição da potência consumida pelo compressor, proporcionado melhoria no coeficiente de performance (COP) do equipamento. Na literatura, alguns autores afirmam que o desempenho de um sistema de refrigeração pode ser melhorado através da sua integração com fontes de energia renovável, através de coletores térmicos (BUKER; RIFA,2016),



coletores fotovoltaicos (CHOW,2010), trocadores de calor geotérmico (KHARSEN,2015) ou turbinas eólicas (LI, 2018).

Neste contexto o uso da energia geotérmica tem se mostrado uma excelente opção na melhoria na eficiência de sistemas de refrigeração e climatização ao redor do mundo. As bombas de calor geotérmicas (GSHP's), têm despertando grande interesse oferecendo níveis de eficiência para aquecimento e resfriamento que são teoricamente superiores as tecnologias tradicionais hoje

empregadas. As GSHP's podem proporcionar alto desempenho energético com sustentabilidade ambiental, aliado a fácil integração aos sistemas existentes nas edificações.

As GSHP's trocam calor com o subsolo, tomando vantagem da sua estabilidade térmica. O ambiente subterrâneo experimenta temperaturas mais baixas e com menos flutuações anuais em relação ao ar ambiente, em sistemas de refrigeração, tal condição proporciona uma melhoria no coeficiente de troca de calor, principalmente no condensador. O efeito prático observado é a diminuição da entalpia do fluido refrigerante com a redução da pressão de condensação e diminuição trabalho a ser realizado pelo compressor da máquina de refrigeração, gerando menor consumo de energia elétrica, com melhoria no COP do equipamento. Atualmente GSHP's podem entregar uma economia de energia anual da ordem de 9,7% a 23% dependendo da temperatura do poço, com uma vida útil superior a 15 anos. (TAVARES,2020)

Foram levantados a partir da literatura alguns artigos publicados no mundo sobre estudos e aplicações da climatização geotérmica destinada para refrigeração em regiões de clima predominantemente tropical com ambientes dominados por resfriamento, muitos dos estudos realizaram a comparação de sistemas convencionais com sistemas com condensadores geotérmicos acoplados. Os resultados observados de maneira geral foram positivos e recomendam a aplicação das bombas de calor geotérmica nas localidades em estudo.

Tabela 1: Resumo das referências bibliográficas estudadas para emprego de GSHP's em climas tropicais; Fonte do autor.

Autor	Ano	Localidade	Tipo	Tipo Condensador	Capacidade	COP	Resultado	Baypack
Yujin et al,2008	2008	Coreia do sul	Experimental	Vertical,24 poços 175m profundidade	80 kW prédio 1193m ²	5,9	74% de economia ao convencional	-----
Kharseha et.al,2015	2015	Doha/Catar	Modelagem	Vertical, 1 poço 100m profundidade	12,7kW Casa 144m ²	3,5	19% de economia ao convencional	9 anos
Nabiha et.al.2015	2015	Tunísia	Experimental	Horizontal, tipo Série 100m comprimento	12,7kW sala 12m ²	4,46	Economia superior ao convencional	-----
Arif et.al,2019	2019	Tailândia	Experimental	Horizontal, tipo Slink coil 73,8m ²	7kW sala 24m ²	3	19% de economia ao convencional	-----
Sabrin et.al.2020	2020	Saara/ Argelia	Modelagem	Vertical, 1 poço,100m Profundidade	12,7kW casa 95m ²	3,89	Economia superior ao convencional	-----
Tavares et.al,2020	2020	BH/Brasil	Modelagem	Vertical, 1Poço Circuito aberto	2,7kW sala 9m ²	4,7 a 5,9	33% de economia ao convencional	1,7 anos



Metodologia

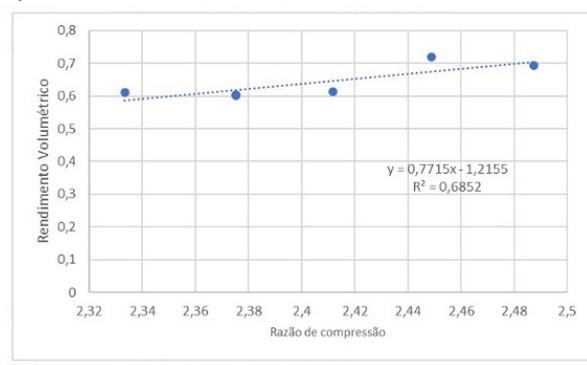
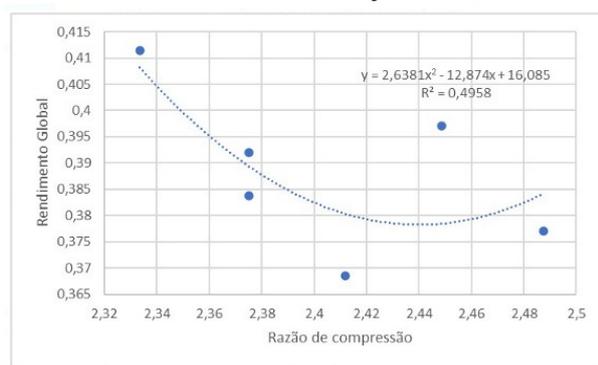
Para a análise da performance do sistema de refrigeração geotermica em estudo, foi utilizada uma planta de refrigeração em operação. Os dados coletados na planta serviram de subsídio para elaboração dos modelos matemáticos do compressor e do condensador do chiller, a validação dos modelos se deram ao se comparar os resultados obtidos na planta com os resultados obtidos nos modelos, posteriormente o modelo matemático do compressor será acoplado a um modelo de um condensador geotérmico escolhido a partir da literatura. Serão simulados os modelos convencional e o geotérmico para operação anual para 4 cidades do Brasil sendo os resultados obtidos para as 2 simulações comparados e avaliados tecnicamente e financeiramente, foi também avaliado os efeitos técnicos e financeiros da redução da temperatura de condensação na operação da planta.

A planta de refrigeração avaliada está localizada na cidade de Belo Horizonte/Brasil sendo utilizada para climatização de um edifício comercial de escritórios com 5.500 m² de área. O dispositivo experimental implementado é composto por uma planta de produção e distribuição de água gelada composta por um chiller modelo RTWA125, fabricante Trane, com 422kW de capacidade de refrigeração composto de dois compressores de parafuso modelo CHHN060G de 211kw de capacidade frigorífica operando com fluido refrigerante R22, um condensador do tipo casco tubo não inundado, um evaporador do tipo casco tubo inundado e uma válvula de expansão eletrônica. Foram realizados 2 testes no equipamento durante o horário comercial entre 8:00 e 17:00 horas durante os dias 03 e 10 de Março de 2023, os dados foram coletados de hora em hora. Adicionalmente foram simulados alguns pontos de operação de acordo com a demanda de carga no momento dos testes. No Teste 1, a temperatura de saída da água de condensação da torre foi ajustada para 29,5 °C, por sua vez, no Teste 2 a temperatura de saída da água de condensação da torre foi ajustada para 27,0 °C. Durante os testes foram acionados os resfriadores de ar (Fancoil's) da planta de climatização totalizando 800 kW de capacidade sendo ajustados para um temperatura de controle de 23°C (set point) para dos ambientes. Dos 3 chiller's instalados na planta foram acionados 2 chiller's para suprir a demanda de refrigeração sendo escolhido para coleta dos dados o chiller de número 3.

Resultados e Discussão:

Os resultados obtidos para validação do modelo proposto para o compressor estão apresentados nas Figura 1. A partir do modelo matemático foram obtidas as equações de rendimento volumétrico e rendimento global do compressor através dos coeficientes de regressão respectivos.

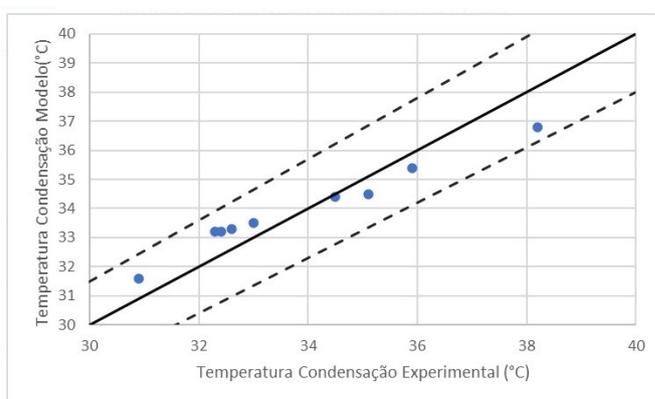
Figura 1 – Valores de rendimento global (a) e rendimento volumétrico (b) obtidos na validação do modelo do compressor. Fonte: do Autor





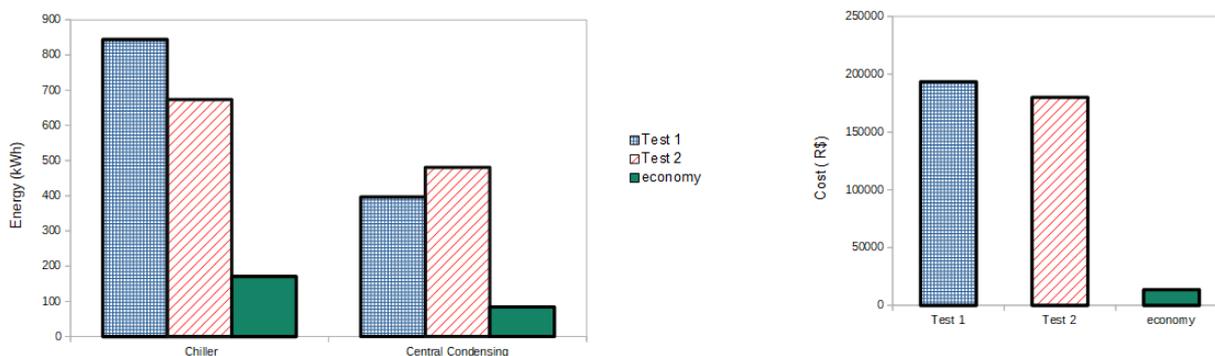
Os resultados obtidos para validação do modelo proposto para o condensador estão apresentados na Figura 2. Foram comparados os valores experimentais obtido da temperatura do fluido refrigerante na saída do condensador e do valor calculado pelo modelo matemático.

Figura 2 – Valores para temperatura de condensação obtidos na validação do modelo do condensador. Fonte: do Autor



Constou que ao reduzir a temperatura da água de condensação do chiller em 2 °C, é possível garantir uma redução no consumo de energia elétrica na planta na ordem de 86,8kWh/ dia, gerando uma economia de R\$ 13.540,80 por ano de operação. Conclui-se que a implantação da redução da temperatura da água de condensação em plantas frigoríficas pode proporcionar uma redução no consumo de energia elétrica com pouco impacto operacional, com a previsão do aumento na vida operacional do chiller devido a redução das temperaturas e pressões de descarga do compressor.

Figura 3: a) Consumo elétrico diário da planta, b) Custo anual de eletricidade da planta. Fonte: do Autor





Conclusão

Neste projeto qualificado, foram levantados alguns artigos sobre estudos e aplicações da climatização geotérmica destinadas na refrigeração de ambientes localizados em regiões de clima predominantemente tropical dominados por resfriamento. Os resultados apontam sobre a relevância da utilização desses sistemas sendo recomendado a aplicação das bombas de calor geotérmica nas localidades em estudo.

Foram elaborados e apresentados os modelos matemáticos do compressor e do condensador de um chiller de parafuso de 211 kW validados experimentalmente, também foram avaliados os efeitos da redução da temperatura de condensação do fluido refrigerante da planta em estudo, sendo comprovados seus ganhos operacionais e financeiros.

Na próxima etapa deste trabalho, será acoplado um modelo matemático de um condensador geotérmico a partir da literatura, nos modelos matemáticos obtidos, realizando a simulação da operação anual para 4 cidades do Brasil e concluir sobre sua viabilidade técnica, econômica e financeira.

Referências

BUKER, M.S. ,RIFFAT, S.B. Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: a systematic review *Renew Sustain. Energy. Rev* 55, 399–413. 2016.

CHOW, T. A. review on fotovoltaic/thermal hybrid solar technology. *App Energy* 87. 365–379. 2010.

Kharseh, M. AL-KHAWAJA, M. SULEIMAN, M.T. Potential of ground source heat pump systems in cooling-dominated environments residential buildings. *Geothermics* 57. 104–110. 2015.

LI, H. CAMPANA, P.E. TAN,Y. YAN, J. Feasibility study about using a stand-alone wind power driven heat pump for space heating. *Appl. Energy* 228. 1486–1498. 2018.

TAVARES,S.G. Estudo comparativo de ar Geotérmico e convencional, ABCM. 2020.



Definição de viabilidade econômica de sistema fotovoltaico residencial no Brasil através do algoritmo ACVO com a entrada da lei 14.300

Fabrcio Pinto Coelho¹, Dr. Ralney Nogueira de Faria²

1 (Aluno de Pós-Graduação Eficiência Energética, Engenharia Mecânica, CEFET-MG)

2 (Orientador Pós-Graduação Eficiência Energética, Engenharia Mecânica, CEFET-MG)

Resumo:

A decisão de instalar uma usina fotovoltaica residencial é na maioria das vezes decidida por questões do retorno financeiro, uma vez que é um investimento de um valor considerável. É crucial que o retorno do investimento seja no menor tempo possível, tornando-se o mesmo atrativo. Com a lei 14.300 que entrou em vigor no dia 06 de janeiro de 2022, houve a necessidade de fazer novos cálculos para verificar os impactos econômicos quanto a este investimento uma vez que haverá taxas incidentes da geração injetada na rede e posteriormente consumo dessa geração. Foi realizado uma avaliação econômica e do desempenho de 27 instalações distribuídos em cada capital do estado brasileiro e no Distrito Federal. Foram levadas em consideração seis variáveis e sete constantes. Para melhor otimização dos resultados, foi utilizado o algoritmo metaheurístico ACVO (Anti Corona Virus Algorithm).

Palavras-chave: algoritmo metaheurísticos, lei 14.300, usina fotovoltaica residencial

Introdução

Com a entrada da Lei 14.300 de janeiro de 2022 a na qual sistemas fotovoltaicos instalados vão deixar de ter compensação de 1:1 (tudo que era injetado na rede da distribuidora, poderia ser consumido sem pagar taxas, exceto os tributos de PIS e COFINS) e vão a passar a ter uma compensação parcial (quando o excedente de energia é direcionado para a concessionária, haverá cobrança de tarifa quando consumir/“resgatar” o excedente injetado na rede). Com essa nova lei, teremos de refazer novos estudos para verificar impactos financeiros em novos projetos de sistemas fotovoltaicos e, por isso, é muito importante otimizar esses novos projetos com objetivo de se ter um maior retorno econômico num menor espaço de tempo.

Antes de chegar no solo terrestre, a radiação sofre alterações devido ao efeito atmosférico, de acordo com o Modelo de Angstrom – Prescott a radiação incidente no topo da atmosfera para uma superfície horizontal (H_{0H}^d) pode ser estimada pela equação (1):

$$H_{0H}^d = (24/\pi) I_{sc} E_0 [1+0,033 \cos(360n/365)] [\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + (\pi\omega_s/180) \sin\varphi \sin\delta] \quad (1)$$

onde:

I_{sc} = constante solar (1.367 W/m²)

φ = latitude do local (°)



ω_s = ângulo horário do pôr do sol para o plano horizontal ($^\circ$) δ = declinação solar ($^\circ$)
 E_0 = fator de correção da excentricidade da órbita da Terra (adimensional)
 N = é o dia de um ano a partir de primeiro de janeiro

sendo, $\omega_s = \arcsin [-\tan\delta \tan\varphi]$ e a declinação solar como $\delta = 23,45 \sin((n+284) 360/365)$
 $E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + 0,00719 \cos 2 \Gamma + 0,000077 \sin 2 \Gamma$
 onde $\Gamma = 2 \pi (n - 1) / 365$

Uma vez calculado a radiação no plano horizontal, é necessário transformá-la para o plano inclinado ($H_{\beta 0}^d$) conforme (Simonsen, 1981; Iqbal, 1983; Wenxian et al., 1995)

$$H_{\beta 0}^d = (24/\pi) I_{sc} E_0 [(\pi/180) \omega_s (\sin\delta \sin(\varphi - \beta)) + (\cos\delta \cos(\varphi - \beta) \sin\omega'_s)] \quad (2)$$

onde β é o ângulo de inclinação de um painel em um plano horizontal e ω'_s representa o ângulo horário solar para um plano inclinado descrito como $\omega'_s = \min \{\omega_s \arccos [-\tan\delta \tan(\varphi - \beta)]\}$ (3)

Para o ângulo de inclinação de um painel em um plano horizontal (β) utilizaremos os valores descritos na tabela 01 conforme VILLALVA [01]:

Tabela 01: Ângulos de inclinação dos módulos fotovoltaicos

Latitude	Ângulo de inclinação (β)
0° à 10°	$\beta = 10^\circ$
11° à 20°	$\beta = \text{latitude}$
21° à 30°	$\beta = \text{latitude} + 5^\circ$
31° à 40°	$\beta = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais°	$\beta = \text{latitude} + 15^\circ$

A radiação solar e a temperatura da célula do módulo fotovoltaico são variáveis que interferem na potência de saída de um painel fotovoltaico e pode ser calculada da seguinte maneira [2] na equação

$$P_{PV,out} = P_{STC} d^{PV} (H_T/H_{STC}) [1 + a_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (4)$$

onde,

P_{STC} = capacidade nominal do sistema sob condições de teste padrão (STC)

d^{PV} = fator de redução como sombreamento, sujeira, degradação do sistema fotovoltaico

H_T = radiação solar no sistema fotovoltaico

H_{STC} = radiação solar no STC que é de 1 kW/m²

a_p = coeficiente de temperatura da potência

T_c = temperatura da célula sob condições atuais

$T_{c,STC}$ = temperatura da célula sob condições STC

Porém a radiação extraterrestre (H_T) é decomposta em 3 radiações: H_B (radiação por feixe), H_D (radiação difusa) e H_R (radiação refletida), representado nas equações:

$$H_T = H_B + H_D + H_R \quad (5)$$

sendo que a radiação difusa é $H_D = H_T (0,9345 - 0,8113 K_T - 0,2228 (n/N))$ (6)

onde,



n = o dia de um ano a partir de primeiro de janeiro e N = duração máxima do dia

Porém como avaliamos a radiação no plano inclinado, a radiação difusa no plano inclinado ($H_{D,t}$) é dado por $H_{D,t} = 0,5 H_D (1 + \cos \beta)$ (7), sendo que da mesma forma que a radiação refletida no plano inclinado ($H_{R,t}$) é dado por $H_{R,t} = 0,5 \rho H_T (1 - \cos \beta)$ (8) onde ρ é a refletância do solo (que adotaremos como 0,2). Já a radiação por feixe ($H_{B,t}$) num plano inclinado é dada por:

$$H_{B,t} = (1 - H_{D,t}/H_T) R_b H_T \quad (9)$$

na qual R_b é a razão entre a radiação do feixe na superfície inclinada e a do plano horizontal que é expresso por:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi+\beta) \cos(\delta) \text{sen}(\omega'_s) + \omega'_s (\pi/180) \text{sen}(\varphi+\beta) \text{sen}(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s) + \omega_s (\pi/180) \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta)} \quad (10)$$

a radiação total no plano inclinado é $H_{T,t} = H_{B,t} + H_{D,t} + H_{R,t}$ (11):

No nosso caso o fator de redução d^{PV} foi assumido como 0,80 [03] e para a radiação solar (H_T) foi considerado para o plano inclinado ($H_{T,t}$) com isso, a nova equação adotada é:

$$P_{PV,out} = P_{STC} d^{PV} (H_{T,t}/H_{STC}) [1 + a_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (12)$$

Um dos fatores que determina a potência de saída do painel fotovoltaico é a temperatura da célula do módulo fotovoltaico, portanto iremos considerar como a temperatura da célula:

$$T_c = \frac{T_a + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) (H_{d_{\beta 0}}/H_{STC}) [1 - \eta_{m,STC} (1 - a_p T_{c,STC})/\tau\alpha]}{1 + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) (H_{d_{\beta 0}}/H_{STC}) (a_p \eta_{m,STC}/\tau\alpha)} \quad (13)$$

onde,

T_a = temperatura ambiente

$T_{c,NOCT}$ = temperatura da célula abaixo da temperatura operacional nominal do módulo

$T_{a,NOCT}$ = temperatura ambiente abaixo da temperatura operacional nominal do módulo

$\eta_{m,STC}$ = eficiência máxima do ponto de energia sob STC

τ = transmitância (fração de energia luminosa que consegue atravessar a espessura de um determinado material, sem ser absorvida) solar

α = absorvância (energia luminosa absorvida pela espessura de determinado material) do módulo

$T_{c,STC}$ = temperatura da célula sob condições de teste padrão

Todas as análises foram realizadas com base no módulo fotovoltaico da Canadian Solar CS6W-520 cujas especificações técnicas foram retiradas do *datasheet* da tabela 02:

Tabela 02 – Especificações do módulo CS6W-520 utilizados na análise

Especificação	Valor
Potência máxima nominal (P_{STC})	550 W
Eficiência do módulo ($\eta_{m,STC}$)	21,40%
Coef. Temperatura de potência (a_p)	- 0,34 %/°C
Temp. operacional nominal da célula ($T_{c,NOCT}$)	41 ± 3°C
Temp. ambiente sob NOCT ($T_{a,NOCT}$)	20°C
Temp. sob STC ($T_{c,STC}$)	25°C
Irradiância sob condições de teste padrão (H_{STC})	1000 W/m ²



Metodologia

Para avaliar o desempenho de cada instalação mapeada, foram levadas em consideração seis variáveis e sete constantes. A primeira variável é a localização da instalação do sistema fotovoltaico residencial.

Cidade	Latitude (°)
Porto Alegre	-30,03
Florianópolis	-27,60
Curitiba	-25,42
São Paulo	-23,53
Belo Horizonte	-19,91
Rio de Janeiro	-22,91
Vitória	-20,32
Salvador	-12,97
Aracajú	-10,91

Cidade	Latitude (°)
Maceió	-9,66
Recife	-8,05
João Pessoa	-7,12
Natal	-5,79
Fortaleza	-3,72
Teresina	-5,79
São Luís	-2,54
Palmas	-10,24
Goiânia	-16,69

Cidade	Latitude (°)
Cuiabá	-15,60
Campo Grande	-20,45
Brasília	-15,78
Belém	-1,46
Boa Vista	2,82
Manaus	-3,12
Porto Velho	-8,76
Rio Branco	-9,98
Macapá	0,03

A segunda variável é a média diária da temperatura ambiente nos últimos 3 anos (2020, 2021 e 2022). No caso do ano de 2020, não foi considerado o dia 29 de fevereiro. Esses dados foram extraídos do Instituto Nacional de Meteorologia através do endereço <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Foram analisadas 26.280 temperaturas para cada localidade. O valor adotado da temperatura é a média aritmética das temperaturas de 7:00h da manhã até às 18:00h da tarde, esse é o horário em que o painel fotovoltaico recebe radiação solar.

A terceira variável é o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos (β). Para a inclinação, foi utilizado a tabela 01.

A quarta variável é o preço da tarifa de cada concessionária de energia. Essa tarifa que foi retirado do site <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas> no dia 11/09/2023.

A quinta variável é o índice de claridade (K_T). Usaremos a média de cada mês. Devido à dificuldade de se modelar esse índice, optamos por fazer da seguinte maneira $K_T = H_T/H_{0H}^d$ (7), onde o H_{0H}^d (radiação extraterrestre que atinge o exterior da atmosfera terrestre vinda do Sol) é calculado através da equação (1) onde esse valor é a soma diária do mês, e o H_T (radiação solar total global) onde os valores foram retirados do Atlas Solarimétrico do INPE (http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod), sendo esse valor também mensalizada onde a unidade é Wh/m².dia.

A sexta variável é a quantidade de placas solares, podendo variar de 4 à 7 placas solares. Foi utilizado o algoritmo metaheurístico para otimizar a quantidade ótima de placas solares

Foram definidos sete constantes, isto é, os valores são iguais, independentemente do local aonde o sistema fotovoltaico foi instalado. A primeira constante foi determinada a potência para o sistema fotovoltaico. A potência definida foi de 3,0 kWp por ser a de maior abrangência para a população brasileira e o consumo horário é igual para todos conforme o gráfico 01. Isso significa que em todas as localidades teremos uma mesma quantidade de placas solares instaladas, que no nosso caso foram 5 placas solares



A segunda constante foi o perfil de consumo residencial do próprio autor. Foi adotado um consumo padrão durante todo o dia, sendo que não ocorreu alteração de consumo durante todo o ano conforme gráfico 01.

Gráfico 01 - Padrão de consumo diário Wh



Fonte: Próprio autor

A terceira constante diz respeito ao conjunto de dados financeiros como os custos de aquisição, instalação e manutenção (R\$), degradação (d), transmitância (τ), absorvância (α) e refletância (ρ) do sistema fotovoltaico. Foi adotado os valores conforme mencionado na Tabela 06.

Tabela 06: Valores de fixos

Descrição	Valor
Custo de aquisição	R\$ 14.790,00
Custo de instalação	R\$ 6.000,00
Custo de manutenção	R\$ 415,80
Degradação (d)	0,8
transmitância x absorvância ($\tau\alpha$)	0,9
Refletância (ρ)	0,2

Fonte: Próprio autor

A quarta constante foi o percentual de aumento do TUSD conforme tabela 07 no decorrer dos próximos anos, iniciando em 2023 com 15% e aumentando 15% a cada ano, atingindo 90% em 2028 de acordo com a lei nº 14.300.

Tabela 07: Percentual de pagamento do TUSD no decorrer do ano

Ano 2023	% Pagamento da TUSD fio B
2023	15%
2024	30%
2025	45%
2026	60%
2027	75%
2028	90%
2029*	Nova regra

Fonte: Lei 14.300 de 6 de janeiro de 2022



A quinta constante foi o aumento anual de consumo. Foi estimado um aumento de 1% anual. Começando com 180,0 kWh/mês no ano zero e chegando a 219,6kWh/mês no ano 20 após a instalação do sistema fotovoltaico.

A sexta constante foi a perda de eficiência das placas solares. Foi estimado uma perda de eficiência de 1% ano. Começando com 100% no ano zero e chegando a 81,8% de eficiência no ano 20.

A sétima constante foi o modelo de placas solares monocristalinas por ser mais eficientes e duráveis em comparação com as policristalinas. Foram retiradas as informações do *datasheet* das placas solares de acordo com a tabela 02.

Com essas informações calculamos a geração produzida mensalmente por cada sistema fotovoltaico em cada localidade. O consumo mensal é subtraído da geração produzida e é possível verificar o comportamento do excedente ao longo dos anos.

Resultados e Discussão

Com o modelamento da geração da energia, conseguimos construir o ranking das localidades com maiores gerações aplicando 5 placas fotovoltaicas (tabela 09). Foi observado que dos 5 primeiros colocados na geração de energia elétrica, 4 se encontram no Nordeste brasileiro. Com relação ao índice de claridade (K_T) (tabela 10), que nada mais é a razão solar que chega até a superfície e a radiação solar extraterrestre, os 5 primeiros colocados estão localizados no Nordeste brasileiro. Outro resultado que pode ser comprovado foi o tempo em anos (tabela 11) na qual o consumo supera a geração da energia do sistema fotovoltaico. Com 16 anos 6 localidades estão nesse patamar sendo 1 localizado no Distrito Federal, 4 na região Nordeste e 1 na região Sudeste e o no oposto, ou seja, no menor tempo em que o consumo supera a geração ficou na região Norte, especificamente no Amazonas.

Tabela 09

Geração	Cidade
2.939.627,97	Natal
2.936.113,20	Brasília
2.926.008,72	João Pessoa
2.911.937,03	Recife
2.903.240,16	Maceió
2.899.771,70	Rio de Janeiro
2.888.578,08	Goiânia
2.883.490,66	São Paulo
2.876.087,73	Fortaleza
2.873.855,81	Belo Horizonte
2.865.022,29	Aracajú
2.861.888,83	Teresina
2.854.522,11	Porto Alegre
2.847.044,12	Salvador
2.829.325,45	Palmas
2.803.888,50	Curitiba
2.796.149,08	Cuiabá
2.795.389,49	Florianópolis
2.795.355,97	Campo Grande

Tabela 10

K_T	Cidade
0,56	Fortaleza
0,55	Natal
0,54	Teresina
0,54	Maceió
0,54	João Pessoa
0,53	Aracajú
0,53	Goiânia
0,53	Brasília
0,53	Recife
0,53	Belo Horizonte
0,53	Salvador
0,52	Campo Grande
0,52	Palmas
0,51	Cuiabá
0,51	Vitória
0,50	São Luís
0,49	Rio de Janeiro
0,48	Macapá
0,47	Porto Alegre

Tabela 11

Ano	Cidade
16	Brasília
16	Natal
16	João Pessoa
16	Recife
16	Maceió
16	Rio de Janeiro
15	Goiânia
15	Teresina
15	Fortaleza
15	Aracajú
15	Salvador
15	Belo Horizonte
15	São Paulo
15	Porto Alegre
14	Campo Grande
14	Cuiabá
14	Palmas
14	Curitiba
14	Florianópolis



2.754.175,91	Macapá
2.749.805,73	Vitória
2.694.662,83	São Luís
2.631.920,10	Rio Branco
2.626.078,95	Boa Vista
2.614.992,67	Porto Velho
2.542.788,01	Belém
2.464.927,87	Manaus

0,47	Boa Vista
0,47	Belém
0,47	São Paulo
0,45	Florianópolis
0,45	Rio Branco
0,44	Curitiba
0,44	Porto Velho
0,42	Manaus

13	Vitória
12	São Luís
11	Macapá
11	Rio Branco
11	Boa Vista
10	Porto Velho
9	Belém
7	Manaus

Com os valores das tarifas disponibilizados pela concessionária é possível iniciar as entradas de dados no algoritmo. Temos todas as seis variáveis e sete constantes mapeadas sendo as variáveis (localização, temperatura ambiente, ângulo de inclinação das placas, preço da tarifa da concessionária, índice de claridade - K_T , quantidade de placas) e as constantes sendo (potência do sistema, perfil do consumo, custos financeiros, TUSD, aumento do consumo, perda de eficiência das placas e modelo de placas adotadas).

Conclusão

Com o modelamento da geração da energia, conseguimos construir o ranking das localidades com maiores gerações e índice de claridade (K_T). Com os valores das tarifas disponibilizados pela concessionária é possível iniciar as entradas de dados no algoritmo. Temos todas as seis variáveis e sete constantes mapeadas sendo as variáveis (localização, temperatura ambiente, ângulo de inclinação das placas, preço da tarifa da concessionária, índice de claridade - K_T , quantidade de placas) e as constantes sendo (potência do sistema, perfil do consumo, custos financeiros, TUSD, aumento do consumo, perda de eficiência das placas e modelo de placas adotadas). Porém devido a indisponibilidade da programação do ACVO no Matlab abordando a métrica da lei 14.300, ainda não foi possível extrair as devidas conclusões realizando a otimização do sistema como por exemplo: quantidade de painéis fotovoltaicos e a melhor inclinação dos módulos.

Referências

01- VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações**. 2ª ed. [S.1.]: Saraiva, 2017

02- OMER GONUL1,2, A. CAN DUMAN1,2, BURAK BARUTÇU1, ONDER GULER1 (1Istanbul Technical University, Energy Institute, Istanbul, Turkey, 2Turkish-German University, Department of Energy Science and Technology, Istanbul, Turkey) **Techno-economic analysis of PV systems with manually adjustable tilt mechanisms (2022)**

03- C. LI, d. ZHOU, Y. ZHENG **Techno-economic comparative study of grid-connected PV power systems in five climate zones, China, Energy 165 (2018) 1352 – 1369, , <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.062>**

04 – Lei nº 14.300, de 6 de Janeiro de 2022



Avaliação experimental da viabilidade econômica e ambiental do fluido R744 em sistemas de refrigeração por compressão de vapor

Flávio França Vasconcelos¹, Tiago de Freitas Paulino¹, Antonio Augusto Torres Maia²

1 Grupo de Pesquisa em Refrigeração, Aquecimento e Climatização (GRAC), Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação tecnológica (CEFET-MG)

2 Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Resumo

Com a regulamentação e restrição ao uso dos fluidos agressivos ao meio ambiente conforme os protocolos de Montreal e Kyoto e recentemente com a emenda de Kigali, refrigerantes ecologicamente corretos ganharam destaque nos sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Tais fluidos tiveram um crescente uso nos sistemas mais modernos, como é o caso de refrigeradores domésticos operando com fluidos naturais. Mesmo com a crescente utilização de tais fluidos, existe ainda a necessidade de estudos experimental para responder e construir uma previsibilidade do funcionamento de máquinas de baixa capacidade de refrigeração/aquecimento operando com fluidos ecológicos não só nos sistemas subcríticos mas também naqueles que operam no ciclo transcrito. O presente estudo trata-se de um trabalho desenvolvido em um dispositivo experimental de baixa capacidade de refrigeração/aquecimento operando com R744 em ciclo transcrito, capaz de produzir água gelada para climatização e de forma simultânea aquecer água para banho. . Nesse contexto o objetivo do trabalho é avaliar o desempenho energético, exegético e ambiental da bomba de calor a CO₂ produzindo água gelada a 10°C e simultaneamente aquecendo água a 45°C para consumo direto. Serão implementadas diferentes aberturas do dispositivo de expansão, para assim determinar a pressão ótima e consequentemente um COP máximo.

Palavras chave: Ciclo transcrito, Dióxido de Carbono (CO₂), Fluidos naturais, R744

Introdução

Atualmente, há uma demanda crescente por sistemas de resfriamento/aquecimento que são fundamentais para o nosso dia a dia. Com o aumento da utilização e exigências ambientais mais rígidas, despertou-se a necessidade de utilizar sistemas com maiores eficiências utilizando fluidos ideais e ecológicos. Tal necessidade impulsionou o mundo a entrar na quarta geração de fluidos refrigerantes, geração essa que busca refrigerantes adequados e que não causem danos ao meio ambiente (Vuppaladadiyam, *et al.*, 2022).



Em resposta as demandas e exigências ambientais, os fluidos naturais, em especial o Dióxido de Carbono (R744, CO_2) foi “redescoberto” e teve considerável interesse e atividade de desenvolvimento internacionalmente. O retorno do R744 aos sistemas de refrigeração por compressão de vapor se deu graças aos avanços tecnológicos, principalmente nos materiais de vedação, que possibilitou o desenvolvimento do ciclo transcrito proposto e patenteado por Gustav Lorentzen (Kima, et al., 2004).

O CO_2 apresenta vantagens quando comparados aos demais fluidos naturais empregados em sistemas de refrigeração/aquecimento, pois além de possuir alta capacidade térmica, GWP insignificante e não ser inflamável apresenta ainda baixa toxicidade e baixo custo (Barta, et al., 2021). De acordo com de Paula et al. o CO_2 apareceu no topo da lista de trabalhos científicos como o fluido de trabalho mais estudado para sistemas de refrigeração/aquecimento por compressão de vapor entre os fluidos de baixo GWP no período de 2000 a 2018.

Contudo, os estudos realizados não contemplam sistemas de baixa capacidade de refrigeração, muito menos sistemas que aproveitam a fonte quente e fria simultaneamente, portanto esse trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho energético, exegético e ambiental de uma máquina de baixa capacidade de refrigeração/aquecimento operando com R744.

Metodologia

A máquina experimental possui um evaporador e um condensador que são de tubos concêntricos tendo a água como fluido secundário, tendo como objetivo o aquecimento e o resfriamento da água respectivamente.

O sistema representado na figura 1 conta ainda com compressor hermético, dispositivo de controle fixo (tubo capilar), medidor de vazão para a água, bombas centrífugas e reservatórios de água. Termopares e transdutores de pressão estão dispostos na saída e entrada de cada dispositivo termodinâmico (Pontos 1,2,3 e 4), a fim de determinar os estados do fluido refrigerante. Os valores gerados pelos termopares e pelos transdutores serão obtidos através de uma placa de aquisição de dados. Os valores gerados pela placa de aquisição serão armazenados em banco de dados. Além disso alicate wattímetro será utilizado a fim de determinar a potência elétrica consumida pelos componentes que demandam energia elétrica.

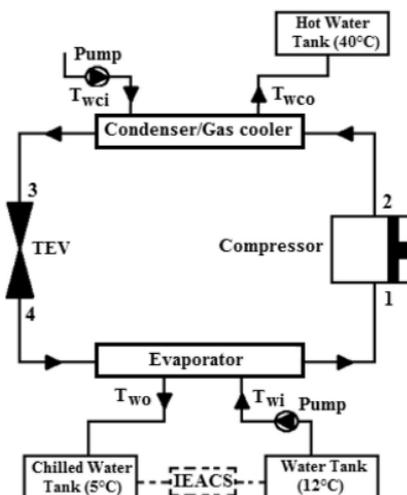


Figura 1 – Representação do dispositivo experimental.



O sistema terá uma capacidade de refrigeração de 0,5 kW operando com R744 que se mostra muito promissor na substituição dos fluidos Fluorados.

Os testes experimentais ocorrerão em regime de funcionamento estacionário a fim de determinar as propriedades Termodinâmicas em pontos estratégicos a fim de observar como o sistema se comporta e realizar o levantamento dos dados. Os testes experimentais, nos possibilitará avaliar e comparar grandezas de relevante importância na refrigeração, como o COP e o TEWI.

Além das grandezas citadas, analisaremos ainda a eficiência energética global.

Resultados e Discussão

O estudo encontra-se na fase inicial, mas espera-se que os resultados sejam satisfatórios e que o estudo contribua para a comunidade científica. Espera-se ainda determinar os parâmetros de operação para sistemas de baixa capacidade de refrigeração/aquecimento

Referências

BARTA, Riley B.; ZIVIANI, Davide; GROLL, Eckhard A.. Design and commissioning of a modular multi-stage two-evaporator transcritical CO₂ test stand. *International Journal Of Refrigeration*, [S.L.], v. 130, p. 392-403, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.05.033>.

DE PAULA, Cleison Henrique de; DUARTE, Willian Moreira; ROCHA, Thiago Torres Martins; OLIVEIRA, Raphael Nunes de; MAIA, Antônio Augusto Torres. Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal Of Refrigeration*, [S.L.], v. 113, p. 10-20, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.01.012>.

VUPPALADADIYAM, Arun Krishna; ANTUNES, Elsa; VUPPALADADIYAM, Sai Sree Varsha; BAIG, Zenab Tariq; SUBIANTORO, Alison; LEI, Guoyuan; LEU, Shao-Yuan; SARMAH, Ajit K.; DUAN, Huabo. Progress in the development and use of refrigerants and unintended environmental consequences. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 823, p. 153670, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153670>.



Supressão de Finos no Cálculo da Velocidade Crítica de Deposição em Bombeamento de Polpa de Minério de Ferro

Eduardo Campêlo Fonseca¹ (0000-0001-8505-9009), Cristina Almeida Magalhães¹ (0000-0001-6427-5941)

1 Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

RESUMO

O comportamento de deposição dos sólidos no fundo das tubulações, requer que a velocidade de projeto seja calculada de forma a ter magnitude suficiente para suspender e transportar os sólidos, sem ser economicamente inviável dado ao aumento de perda de carga e gastos no consumo de energia. Nessa perspectiva, o presente trabalho visou realizar uma comparação de resultados de simulações no software AFT Fathom onde os parâmetros de entrada foram baseadas primeiramente em uma estimativa de velocidade de sedimentação sem supressão de finos e posteriormente com supressão de finos, baseando-se da premissa que as partículas em suspensão da polpa que apresentam tamanho abaixo de 50 micrômetros não sofrem deposição, pois são partículas que essencialmente não sedimentam durante as operações normais de bombeamento. As velocidades críticas foram calculadas através do método de Durand, para a distribuição granulométrica da polpa original, os valores encontrados para o d₅₀ e velocidade foram respectivamente 62 micrometros e 4,05 m/s. Já realizando a supressão de finos, os valores encontrados foram 72 micrometros e 3,69 m/s, possibilitando trabalhar em uma velocidade de projeto 9% menor, resultando em custos inferiores em energia elétrica e de aquisição do motor de acionamento da bomba centrífuga selecionado para atender ao bombeamento.

Palavras-chave: AFT Fathom. Cálculo Hidráulico. Finos. Granulometria. Sedimentação.

INTRODUÇÃO

A velocidade de deposição de sólidos ou a velocidade crítica é uma das variáveis de projeto essenciais no dimensionamento de sistemas de bombeamento de polpa. Segundo Souza Pinto et al (2014), a importância se deve ao fato desse parâmetro representar o limite mínimo de velocidade no qual o fluido consegue escoar sem que ocorra deposição de partículas no fundo do tubo, de forma que ocorra acúmulo de sedimentos podendo, assim, gerar obstrução da linha.

Todavia, segundo Poloski (2010), o funcionamento muito acima da velocidade crítica evita a deposição, mas essa combinação promove aumento de perdas de carga e consumo de energia, bem como desgaste e erosão das bombas, resultando em altos custos de transporte.

Sendo assim, este trabalho busca realizar uma comparação entre simulações no software AFT Fathom 10, partindo da premissa do manual da Warman (2009) que as partículas em suspensão da polpa que apresentam tamanho abaixo de 50 micrômetros não sofrem deposição, pois são partículas que essencialmente não sedimentam durante as operações normais de bombeamento. Determinando a porção que é sub-50 micrômetros de um determinado fluxo a ser estudado e fundindo essas partículas com o fluido (suprimindo essas partículas mais finas), então redistribuindo as partículas restantes para determinar o tamanho de d₅₀ alternativo, o intuito desse



trabalho é refinar o cálculo da velocidade de deposição de sólidos, de forma que esse parâmetro seja estimado de forma mais compatível com os resultados que podem ser observados na prática.

A primeira simulação realizada no software AFT Fathom 10 foi do sistema com o valor de d_{50} real, considerando as partículas abaixo de 0,050 mm suspensas na polpa e a segunda simulação foi com um valor de d_{50} alternativo que é consequência da desconsideração das partículas sub-50 micrômetros. Após elaboração dos resultados, a principal contribuição científica deste trabalho foi comparar as velocidades críticas calculadas pelo software, de forma a mapear o impacto da supressão de finos nas simulações. O autor contribui com registros científicos deste método de refino do parâmetro de entrada d_{50} nas simulações através do software AFT Fathom 10 no cálculo da velocidade de deposição que já é amplamente empregado por projetistas de tubulações.

METODOLOGIA

A Tabela 1 demonstra as interpolações para cálculo dos valores de d_{50} da distribuição granulométrica da polpa em estado original e da distribuição granulométrica corrigida a partir da supressão das partículas finas (sendo que pela aproximação ao valor de 0,05 mm, foi considerado que todos os sólidos menores que 0,053 mm estão incorporados ao fluido de transporte).

Tabela 1 – Distribuição granulométrica original da polpa e com supressão de finos

Malha (mm)	Passante (original) %	Passante (com supressão) %
15,000	100,000	100,000
2,400	100,000	100,000
1,000	100,000	100,000
0,840	99,952	99,928
0,600	99,680	99,521
0,420	98,687	98,040
0,250	95,963	93,972
0,210	93,586	90,422
0,150	91,028	86,602
0,105	85,451	78,274
0,075	71,283	57,117
0,052	33,033	0,000
0,037	13,838	-
0,025	5,256	-
0,015	1,460	-
0,010	0,450	-
0,000	0,000	-
d_{50} estimado (microns)	62,203	72,134

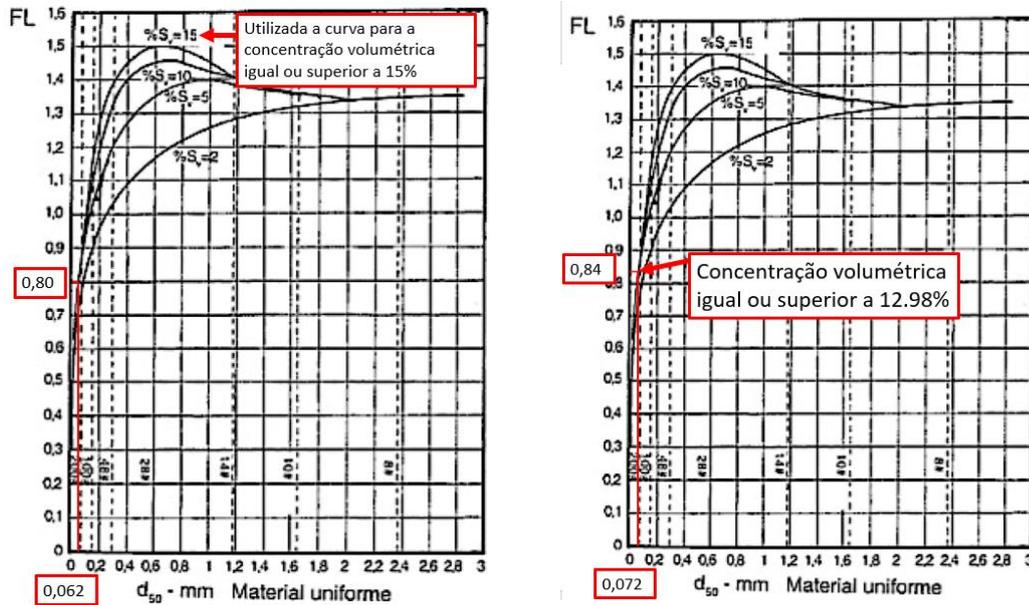
Fonte: Próprio autor.

Cálculo das Velocidades de Sedimentação

Utilizando o ábaco da Figura 2, demonstrado por Chaves (2022), foi selecionado o fator FL igual a 0,80 para o cenário sem supressão de finos, sabendo que a concentração volumétrica original da polpa é igual a 19,38 %.



Figura 1 – (a) Parâmetro F_L – sem supressão de finos. (b) com supressão de finos



Fonte: Adaptado de Chaves (2022).

Já para o cenário 2, é necessário realizar o ajuste da concentração volumétrica da polpa com finos incorporados ao líquido de transporte, para isso foi extraída a informação da porcentagem de finos menores ou igual 0,052 mm da polpa da Tabela 1, sendo esse valor igual a 33,03 %.

Assim foi calculada a concentração volumétrica da polpa (12,98%) e a densidade do líquido de transporte com finos incorporados ($1,232 \text{ kg/m}^3$).

Com essas informações, foram realizados os cálculos das velocidades críticas de deposição (VD) para ambos os cenários, baseando-se na fórmula dada por Durand (1952).

Para o Cenário 1:

$$V_D = F_L \cdot [2gD \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)]^{1/2} \quad (1)$$

$$V_D = 0,80 \times \left[\frac{2 \times 9,81 \times 0,4139(4160 - 1000)}{1000} \right]^{1/2}$$

$$V_D = 4,05 \text{ m/s}$$

Para o Cenário 2:

$$V_D' = 0,84 \times \left[\frac{2 \times 9,81 \times 0,4139(4160 - 1232)}{1232} \right]^{1/2}$$

$$V_D' = 3,69 \text{ m/s}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Velocidades de projeto e diâmetro de tubulação

Para a velocidade crítica de 4,05 m/s do Cenário 1, foi necessário reajustar o diâmetro inicial estimado de 18" para a tubulação do sistema, nessa perspectiva, um diâmetro nominal de 16" foi



selecionado para este cenário, resultando assim em uma velocidade de projeto igual a 5,22 m/s para a vazão volumétrica de 1949,48 m³/h (com revestimento interno de 12 mm de PEAD, conforme especificação de tubulação de referência).

Já para o cenário onde temos a supressão de finos, podemos continuar com o diâmetro nominal de 18", pois com este diâmetro, 12 mm de revestimento PEAD e a vazão volumétrica de 1949,48 m³/h, a velocidade de projeto deste cenário resulta em 4,02 m/s, superior a velocidade crítica calculada deste cenário, igual a 3,69 m/s.

Resultados do AFT Fathom

Para o cenário sem supressão de finos, o software AFT Fathom apresentou os seguintes resultados de altura manométrica:

Figura 2 – Resultado AFT Fathom – sem supressão de finos

Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (m ³ /hr)	dH (meters)	NPSHA (meters)
3	Show	Bomba de Polpa	1.949	35,75	7,725

Fonte: Próprio Autor.

Para o cenário com supressão de finos, o software AFT Fathom apresentou os seguintes resultados de altura manométrica:

Figura 3 – Resultado AFT Fathom – com supressão de finos

Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (m ³ /hr)	dH (meters)	NPSHA (meters)
3	Show	Bomba de Polpa	1.949	32,85	8,794

Fonte: Próprio Autor.

Potência da bomba para atender a altura manométrica requerida

Com uma potência consumida no eixo calculada de 725,83 CV, o autor selecionou o motor W50 – Alta tensão de potência de placa igual à 750 cavalos para atender a bomba no ponto de operação referente ao Cenário 1 deste trabalho.

Já para a potência consumida no eixo calculada de 547,2 CV, o autor selecionou o motor W50 – Alta tensão de potência de placa igual à 550 cavalos para atender a bomba no ponto de operação referente ao Cenário 2 deste trabalho.

Através da análise de resultados do Cenário 2, foi observado que a diferença em perda de carga ao se utilizar a tubulação de 18" (com supressão de finos) resultou uma potência consumida no acionamento 25% inferior ao observado no Cenário 1, quando tivemos que optar em utilizar uma tubulação de 16" na ilusão de uma velocidade de sedimentação superior a realidade, pois não foi utilizado um método correto de tratamento dos dados reológicos recebidos da polpa.

Comparação de CAPEX

Para comparação do CAPEX de cada um dos cenários, o autor consultou uma representante da WEG para elaboração de um orçamento para compra dos motores de potência de placa igual à 550 cavalos e 750 cavalos.

Ao compararmos o custo de aquisição dos motores requeridos para atender o ponto de operação de cada um dos cenários estudados neste trabalho, foi possível observar que o motor



elétrico para atender ao Cenário 1 (sem supressão de finos) é R\$ 126.565,22 mais caro do que o motor elétrico requerido para atender ao Cenário 2 (com supressão de finos).

Cálculo do Custo Mensal em Reais (R\$) de Energia Elétrica

Para o Cenário 1 entrando com a rendimento do motor em plena carga igual à 95,8 % e a potência útil no eixo igual à 541,24 kW temos uma potência absorvida da rede igual a 565 kW e para o Cenário 2 entrando com a rendimento do motor em plena carga igual à 95,3 % e a potência útil no eixo igual à 408,06 kW temos uma potência absorvida da rede igual a 428,18 kW.

Através da Tabela 2 é expresso o custo mensal em reais em energia elétrica do motor da bomba de polpa operando no ponto de operação de ambos os cenários para diferentes bandeiras tarifárias:

Tabela 2 – Custo mensal em reais em energia elétrica

BANDEIRA TARIFÁRIA:	VERDE	AMARELA	VERMELHA 1	VERMELHA 2
Custo Mensal - Cenário 1 (R\$)	304.717,61	316.876,86	331.159,61	344.563,67
Custo Mensal - Cenário 2 (R\$)	230.927,41	240.142,18	250.966,23	261.124,37
Economia Mensal (R\$)	73.790,20	76.734,68	80.193,38	83.439,29

Fonte: Próprio autor.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados do AFT Fathom em relação à altura manométrica requerida para cada um dos cenários estudados neste trabalho, foi possível quantificar os gastos em energia elétrica e o capital necessário para aquisição do motor elétrico para atender a cada um dos pontos de operação.

Utilizando o procedimento de supressão de finos ao se dimensionar o equipamento a ser empregado no sistema de bombeamento estudado foi possível uma economia em CAPEX igual à R\$ 126.565,22 (por bomba comprada) e uma economia mensal em OPEX podendo chegar a R\$ 83.439,29, a depender da bandeira tarifária. Sendo que a economia em CAPEX tende a ser ainda superior, visto que o recomendado é se adquirir duas bombas, uma operante e uma reserva.

A partir destes resultados foi possível demonstrar o impacto em custo (R\$) de se estimar corretamente a velocidade crítica de deposição antes de se realizar projetos de sistemas de bombeamento de polpas de minério de ferro.

REFERÊNCIAS

CHAVES, A. P., “Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Bombeamento de polpa e classificação”, Editora Oficina de Textos, 5ª Edição, Vol. 1, 2022.

DURAND, R., *The hydraulic Transportation of coal and solid material in pipes*. Proceedings of the London Colloquium of the National Coal Board, 1952.

POLOSKI, A.P. *A Pipeline Transport Correlation for Slurries with Small But Dense Particles*. 2010, Canadian Society for Chemical Engineering DOI 10.1002/cjce.20260

SOUZA PINTO, T.C. *et al. Modelling the critical velocity for heterogeneous flow of mineral slurries. International Journal of Multiphase Flow*, v. 65, p. 31-37, 2014.

WARMAN. *Slurry Pump Handbook*. 5th ed., 2009.

Editoração e Projeto Gráfico
Artur Caron Mottin