



I CONGRESSO DE
**MODELAGEM,
SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL
E INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL DO IPT**

Ficha Técnica

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Tarcísio de Freitas

Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação

Vahan Agopyan

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT

Anderson Ribeiro Correia

Diretor-Presidente

Natália Neto Pereira Cerize

Diretoria de Finanças e Planejamento – DFP

Adriano Marim de Oliveira

Diretoria de Operações – DO

Fabiano Albuquerque de Moraes

Diretoria de Desenvolvimento de Pessoas e Administração – DPA

Levi Pompermayer Machado

Diretoria de Ambientes Inovadores e Inteligência de Mercado – DAIIIM

Sandra Lucia de Moraes

Pesquisadora/Diretora Técnica da Unidade de Negócios de Materiais Avançados – MA

João Carlos Savio Cordeiro

Pesquisador/Diretor Técnica da Unidade de Negócios de Energia – EN

Maria Cristina Machado Domingues

Pesquisadora/Diretora Técnica da Unidade de Negócios de Tecnologias Digitais – TD

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Congresso de Modelagem, Simulação Computacional e Inteligência Artificial (2025 : São Paulo, SP) Anais do I Congresso de Modelagem, Simulação Computacional e Inteligência Artificial do IPT
[livro eletrônico] ; organização André Luiz Nunis da Silva ... [et al.]. -- São Paulo, SP : Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo,
2026. -- (IPT Publicação ; 3085)

PDF

Outros organizadores: Denis Bruno Viríssimo, Felipe Santos de Castro, Guilherme Carmelo Ungar, Guilherme Russo,
Leonardo Rodrigues Danninger, Martha Lucia Mora Bejarano

Vários autores.

Bibliografia

ISBN 978-65-5702-057-9

1. Inteligência artificial - Congressos - Brasil 2. Modelagem 3. Simulação computacional I. Silva, André Luiz Nunis da. II. Viríssimo, Denis Bruno. III. Castro, Felipe Santos de. IV. Ungar, Guilherme Carmelo. V. Russo, Guilherme. VI. Danninger, Leonardo Rodrigues. VII. Bejarano, Martha Lucia Mora. VIII. Título IX. Série.

26-350162.1

CDD-006.3

Índices para catálogo sistemático:

1. Inteligência artificial : Ciência da computação 006.3
Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

I CONGRESSO DE **MODELAGEM, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL DO IPT**

São Paulo - 2026





Sumário

ACELERAÇÃO DE SIMULAÇÕES DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA COM MODELOS DE ORDEM REDUZIDA: APLICAÇÃO AO CASO PERPENDICULAR-FLAP DO PRECICE.....	12
ALGORITMO GENÉTICO COMO SOLVER DE VARIÁVEIS BINÁRIAS APLICADO EM MODELOS BMILP DE OTIMIZAÇÃO DE DESIGN DE CEPAS RECOMBINANTES – RESULTADOS PRELIMINARES.....	15
ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS AVANÇADAS DE CHUNKING PARA APRIMORAMENTO DE RAG	18
ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE PÓ METÁLICO PARA MANUFATURA ADITIVA.....	22
AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE BANDAS ESPECTRAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE ESTRESSE DA VEGETAÇÃO DECORRENTE DE CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS.....	28
AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE SOFOROLIPÍDEOS.....	34
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÃO EXPANSÍVEL TÉRREA ISOLADA.....	38
AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE UM PÉ PROTÉTICO EM COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO	42
AVANÇOS EM IA NO MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE E A LACUNA DA VULNERABILIDADE SOCIAL.....	48
CONSTRUÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS SUPERVISIONADOS PARA O ESTUDO DE TEMPERABILIDADE DO FERRO FUNDIDO BRANCO DE ALTO CROMO	51
DETECÇÃO DE FEIÇÕES GEOLÓGICAS COMBINANDO ATRIBUTOS SÍSMICOS E O MODELO SEGMENT ANYTHING 2.....	57
ESTUDO DE VENTILAÇÃO PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ABERTURAS NO SANTUÁRIO NACIONAL DE APARECIDA.....	61
ESTUDO DO ESCOAMENTO SECUNDÁRIO EM TUBO HELICOIDAL NO PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS LÍQUIDOS: HOMOGENEIZAÇÃO DE TEMPERATURA E INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	66
INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA REFORMA DO ETANOL ACOPLADA A CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO (MS-SOFC) PARA APLICAÇÕES EMBARCADAS EM VEÍCULOS.....	73

IMAGEAMENTO DO SUBSOLO NO ENTORNO DO IPT UTILIZANDO MÉTODOS INDIRETOS DE INVESTIGAÇÃO.....	78
METODOLOGIA INTEGRADA PARA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA APOIADA POR GPT.....	85
MODELAGEM DE CADEIAS DE SUPRIMENTO DE GÁS LIQUEFEITO RENOVÁVEL NO BRASIL VIA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA E ESTIMATIVA DE CRÉDITOS DE DESCARBONIZAÇÃO.....	91
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA CONVERSÃO CATALÍTICA DE CO ₂ EM METANOL EM REATORES TUBULARES.....	95
MODELAGEM NUMÉRICA E ANÁLISE DE ABSORVEDORES PARA TANQUE DE ONDAS.....	101
O IMPACTO DE ALTERNATIVAS DE VITRAIS SOBRE A REVERBERAÇÃO SONORA NO INTERIOR DA BASÍLICA NOVA DE NOSSA SENHORA DA CONCEIÇÃO APARECIDA.....	105
SIMULAÇÃO DA ADSORÇÃO DE DICLOFENACO DE SÓDIO EM CARVÃO ATIVADO DERIVADO DE RESÍDUOS DE PET	109
SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA OSCILADOR	112
SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA ANTENA MICROSTRIP.....	116
SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS ESTRUTURAIS APLICADAS AO PROJETO MECÂNICO DE UM COMPRESSOR CENTRÍFUGO OPERANDO COM CO ₂ SUPERCRÍTICO.....	121
TRANSFERÊNCIA DE CALOR E CINÉTICA DE Vulcanização EM FORNO INDUSTRIAL.....	125



A modelagem numérica baseada no uso de computação de alto desempenho é indispensável para a resolução de problemas complexos em escalas que seriam inviáveis por métodos convencionais. Ao empregar recursos computacionais avançados, essa abordagem possibilita modelar sistemas sofisticados, realizar análises detalhadas e testar diversos cenários com rapidez e precisão em várias subáreas da física, da química e da ciência de dados. Em um ambiente de pesquisa tecnológica, no qual a inovação é essencial, a simulação de alto desempenho fortalece a capacidade de conduzir estudos multidisciplinares, ampliando o impacto das soluções científicas e contribuindo diretamente para o avanço da ciência aplicada e para o aumento da competitividade industrial.

O IPT possui um amplo histórico de utilização de modelagem e simulações computacionais, aplicando essas ferramentas tanto em atividades de pesquisa e desenvolvimento quanto em serviços tecnológicos há pelo menos 20 anos. Nesse contexto, foi formado um grupo de modelagem e simulação entre a equipe de pesquisadores, com os seguintes objetivos: 1) alavancar projetos — sejam comerciais ou realizados em parceria com outras ICTs — que justifiquem sua atuação dentro da dinâmica do IPT; 2) formar recursos humanos, atuando em diversas frentes, como treinamento em softwares comerciais e *open source*, linguagens de programação voltadas à simulação, computação de alto desempenho (HPC) e teoria de métodos numéricos; e 3) fortalecer a infraestrutura de simulação, tanto em termos de recursos de hardware quanto de software.

A partir desse grupo, surgiu em 2023 a iniciativa de realizar um workshop interno voltado ao compartilhamento de conhecimentos e resultados nessa temática, realizado durante a 1ª Semana da Cultura, Ciência e Tecnologia do IPT. Em 2024, em sua segunda edição, o workshop foi ampliado, contando com a participação de palestrantes externos e com a incorporação do tema de inteligência artificial, em função da crescente notoriedade e relevância que o assunto vem adquirindo dentro e fora do IPT.

As experiências obtidas com a realização dessas duas edições, associadas às parcerias externas do Instituto, abriram a oportunidade de levar o evento à comunidade científica e tecnológica mais ampla, considerando o potencial de integração entre diferentes instituições. Dessa forma, foi concebido o I Congresso de Modelagem, Simulação Computacional e Inteligência Artificial do IPT, realizado em 2025.

Em sua primeira edição, o congresso recebeu a submissão de 34 trabalhos, todos selecionados para apresentação na forma de pôster. O evento contou ainda com quatro palestras convidadas, que abordaram diferentes perspectivas sobre modelagem, simulação computacional e inteligência artificial. Denis Bruno Viríssimo, pesquisador do IPT, discutiu o papel da inteligência artificial e suas implicações para o futuro da pesquisa técnico-científica. Rodrigo Ferraz, da ESSS, apresentou o uso integrado de simulação computacional e IA no contexto de aplicações industriais e de engenharia. Roberto Gomes de Aguiar Veiga, professor adjunto da UFABC, explorou as oportunidades associadas ao uso de simulações atomísticas no desenvolvimento de novos materiais. Por fim, Marlon Sproesser Mathias, professor da Escola Politécnica da USP, abordou o conceito de inteligência artificial informada por física, destacando suas aplicações em simulações de fluidos.

Para este volume de anais do congresso, foram selecionados para publicação 25 trabalhos cujos autores autorizaram sua inclusão. A esses autores foi oferecida a oportunidade de submeter versões estendidas de seus trabalhos, expandindo e aprofundando os resultados originalmente apresentados na forma de pôster. A diversidade de contribuições evidencia a riqueza temática do evento realizado no IPT, reunindo trabalhos nos quais diferentes técnicas computacionais foram aplicadas, como fluidodinâmica computacional (CFD), inteligência artificial, simulação de processos e análise estrutural, entre outras.

Na temática de fluidodinâmica computacional, os seis trabalhos apresentados evidenciaram a versatilidade dessa técnica na busca por soluções em diferentes setores, incluindo as indústrias química, alimentícia e metalúrgica, além de aplicações relacionadas ao conforto em edificações e ao desenvolvimento de soluções para estruturas offshore.

No campo da inteligência artificial, foram aprovados onze artigos, cujos conteúdos abrangem diferentes perspectivas e aplicações. Os trabalhos contemplam desde pesquisas aplicadas em diversas áreas do conhecimento até abordagens que exploram a integração entre inteligência artificial, modelagem e simulação computacional. Entre as principais técnicas empregadas destacam-se algoritmos genéticos, processamento de linguagem natural, visão computacional e métodos de aprendizado de máquina. Além disso, parte dos estudos apresenta a inteligência artificial como uma ferramenta de apoio capaz de acelerar etapas do processo de pesquisa, contribuindo para a análise de dados, a otimização de modelos e o desenvolvimento de novas soluções científicas e tecnológicas.

A simulação de processos também esteve presente em quatro artigos voltados à proposição de soluções para as indústrias farmacêutica e química. Nesses trabalhos, a simulação mostrou-se uma ferramenta importante para demonstrar a viabilidade técnica de processos complexos, compostos por diferentes operações unitárias, bem como para avaliar sua viabilidade econômica, ao permitir estimar custos em cenários de máxima eficiência energética e reacional.

Por fim, estudos envolvendo simulação acústica, circuitos elétricos e sistemas eletromagnéticos, diretamente alinhados a aplicações práticas, evidenciam como diferentes técnicas computacionais podem contribuir para acelerar o desenvolvimento tecnológico e sua aplicação.

Apesar da desconfiança que parte da comunidade experimental nutria em relação às técnicas computacionais em um passado recente, o uso de simulações e inteligência artificial consolidou-se graças às suas claras vantagens estratégicas. Essas ferramentas permitem explorar múltiplos cenários com significativa redução de tempo, custos e riscos, revelando soluções que muitas vezes não seriam evidentes por métodos tradicionais. Atualmente, embora essa resistência seja significativamente menor, sua superação completa ainda depende da ampla disseminação dos avanços alcançados e das potencialidades das novas tecnologias em desenvolvimento. Nesse contexto, eventos científicos como este desempenham um papel fundamental. O comitê organizador reafirma, assim, seu compromisso em expandir esta iniciativa, com o objetivo de democratizar o acesso ao conhecimento técnico-científico de ponta.

Comissão Organizadora

André Luiz Nunis da Silva

Denis Bruno Virissimo

Felipe Santos de Castro

Guilherme Carmelo Ungar

Guilherme Russo

Leonardo Rodrigues Danninger

Martha Lucia Mora Bejarano

ACELERAÇÃO DE SIMULAÇÕES DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA COM MODELOS DE ORDEM REDUZIDA: APLICAÇÃO AO CASO PERPENDICULAR-FLAP DO PRECICE

AM de CARVALHO¹, DZ LIMA¹, JC da C FILHO¹, WG FERREIRA¹,
JI YANAGIHARA², DJ DEZAN¹



¹ Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas

² Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

E-mail para contato: allan.carvalho@ufabc.edu.br

RESUMO – Este trabalho propõe uma metodologia para acelerar simulações de Interação Fluido-Estrutura (FSI) substituindo o solucionador de fluido por um Modelo de Ordem Reduzida (ROM) não intrusivo e baseado em dados. O modelo foi treinado a partir do benchmark perpendicular-flap da biblioteca preCICE. O ROM é construído em um espaço reduzido obtido por Decomposição em Modos Ortogonais (POD) e utiliza uma rede neural para prever os coeficientes modais em função de parâmetros independentes, mapeando os deslocamentos do domínio sólido em campos de forças das simulações de fluido. Na fase online, o acoplamento híbrido entre o ROM do fluido e o modelo de ordem completa da estrutura proporcionou aceleração superior a uma ordem de magnitude, mantendo alta precisão nos casos de teste. Esses resultados evidenciam o potencial de ROMs não intrusivos para reduzir drasticamente o custo de simulações FSI complexas.

1 INTRODUÇÃO

A Interação Fluido-Estrutura (*Fluid-Structure Interaction* – FSI) é fundamental em diversas análises de sistemas de engenharia, mas simulações de alta fidelidade (Full Order Models – FOM) têm alto custo computacional, dificultando estudos de otimização e análises paramétricas. Os Modelos de Ordem Reduzida (Reduced Order Models – ROMs) surgem como alternativa eficiente ao projetar a dinâmica do sistema em um subespaço de baixa ordem, [1]. Entre eles, os ROMs não intrusivos destacam-se por tratar o FOM como uma “caixa-preta”, aprendendo puramente a partir dos dados, sem modificar suas equações, o que facilita a integração com softwares existentes. Este trabalho desenvolve um ROM não intrusivo baseado em aprendizado de máquina para o benchmark FSI perpendicular-flap, com os objetivos de: (i) reproduzir sua dinâmica com precisão, (ii) integrá-lo ao framework preCICE [2], para simulações mais eficientes e (iii) avaliar ganho de tempo e acurácia em relação ao FOM. Os resultados evidenciam ganhos significativos em eficiência computacional, ampliando a viabilidade de análises FSI complexas.

2 METODOLOGIA

2.1 Caso de Estudo: Benchmark Perpendicular-Flap

O cenário de simulação é o benchmark *perpendicular-flap* do preCICE, que consiste em um canal bidimensional com um flap elástico fixado na parede inferior, conforme mostrado na Figura 1. O escoamento de fluido induz a oscilação do flap, caracterizando um problema FSI transiente e fortemente acoplado.

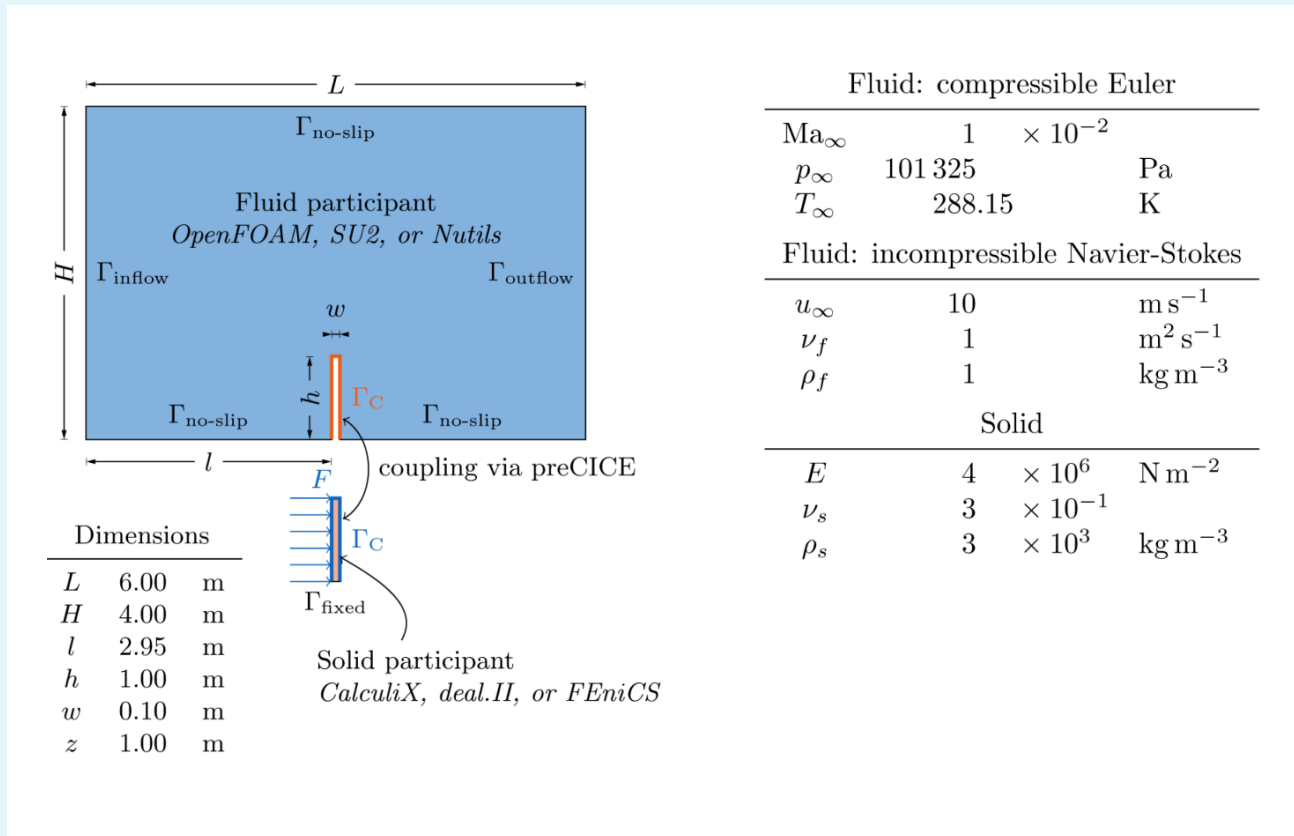


Figura 1: A configuração geométrica é mostrada à esquerda e os parâmetros físicos estão listados à direita. A base da flap é engastada, o participante sólido lê as forças na interface enquanto o participante fluido lê os deslocamentos. A velocidade de entrada no canal é de 10 m/s e na saída impõe-se gradiente nulo para a velocidade. A grandeza u_{∞} corresponde a velocidade na entrada; ν_f e ρ_f são a viscosidade cinemática e a densidade do fluido; E é o módulo de Young; ν_s é a razão de Poisson do sólido; ρ_s é a densidade do sólido; e z representa a espessura fora do plano. Os valores apresentados são aqueles relativos à referência base [2], nesse estudo específico, utilizamos o solver incompressível Navier-Stokes, e variamos os parâmetros de densidade do fluido e do sólido. Fonte: [2].

2.2 Solucionadores de Alta Fidelidade

Os dois domínios foram modelados no OpenFOAM com solucionadores baseados no Método dos Volumes Finitos. O escoamento, de baixa velocidade e incompressível, foi resolvido com o *pimpleFoam*, que fornece o campo de pressão na superfície do flap para o acoplamento. Já a estrutura foi simulada com o *solidDisplacementFoam*, um solucionador transiente para sólidos com pequenas deformações e comportamento linear-elástico, responsável por calcular o campo de deslocamentos e atualizar a geometria do domínio fluido.

A comunicação entre os solucionadores pimpleFoam e solidDisplacementFoam foi gerenciada pela biblioteca preCICE. O preCICE opera de forma não intrusiva, tratando cada solucionador como um participante que troca dados (forças e deslocamentos) em uma interface definida, sem exigir modificações em seus códigos internos.

2.3 Metodologia do Modelo de Ordem Reduzida Não Intrusivo

A metodologia proposta substitui o solucionador de fluidos por um modelo de ordem reduzida (ROM) não intrusivo baseado em aprendizado de máquina. No estágio offline, foram realizadas 100 simulações completas variando-se uniformemente as densidades do fluido e do sólido resultando em matrizes de entrada e saída compostas, respectivamente, por deslocamentos estruturais com parâmetros independentes e por campos de pressão do fluido. Essas matrizes foram reduzidas por Decomposição em Modos Ortogonais (POD), e uma rede neural foi treinada para mapear o espaço reduzido de entrada no espaço reduzido de saída. No estágio online, o ROM substitui o solucionador de fluidos: os deslocamentos estruturais projetados são fornecidos ao modelo, que prediz os coeficientes reduzidos de pressão, posteriormente reconstruídos e aplicados como forças na estrutura via preCICE.

3 RESULTADOS

A eficácia do framework foi avaliada com base na sua precisão e aceleração computacional, utilizando os 20 casos de teste não vistos durante o treinamento, obteve-se um $R^2 = 0.999987$ e $NRMSE = 0.000749$. O ROM demonstrou também a capacidade de prever a dinâmica do flap para novas combinações de densidades. A Figura 2 compara a evolução temporal do deslocamento da ponta do flap para um caso de teste, mostrando excelente concordância entre a simulação híbrida e a de referência (FOM).

A principal vantagem do ROM é a drástica redução no tempo de simulação online (10x nesse cenário). Embora a fase offline exija um investimento computacional significativo (100 simulações FOM), esse custo é amortizado em cenários de multi-consulta, como otimização ou análise de incerteza.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a implementação bem-sucedida de um framework de simulação FSI acelerado, substituindo o solucionador de fluidos de alta fidelidade por um Modelo de Ordem Reduzida não intrusivo. A combinação do OpenFOAM, da biblioteca de acoplamento preCICE e de um ROM baseado em aprendizado de máquina provou ser uma estratégia poderosa e flexível.

5 REFERÊNCIAS

- [1] TIBA A et al., Non-intrusive reduced order models for partitioned fluid–structure interactions. *Journal of Fluids and Structures*, v. 128, 2024.
- [2] CHOURDAKIS G et al. preCICE v2: A sustainable and user-friendly coupling library. *Open Research Europe*, v. 2, n. 51, 2022.



ALGORITMO GENÉTICO COMO SOLVER DE VARIÁVEIS BINÁRIAS APLICADO EM MODELOS BMILP DE OTIMIZAÇÃO DE DESIGN DE CEPAS RECOMBINANTES – RESULTADOS PRELIMINARES

G de O M OHIRA¹, G A C LE ROUX¹¹



¹ Universidade de São Paulo (USP), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

E-mail para contato: guilhermeohira@gmail.com

RESUMO – Metodologias para realização de modificações genéticas em células são abundantes, embora a escolha de seus alvos seja frequentemente atrelada a análises intuitivas. Aplicando técnicas de fluxômica (e.g., Flux Balance Analysis), e conhecimento prévio do genoma de um microrganismo, é possível aplicar modelos conhecidos, tal qual o OptKnock (2003). Esses são estruturados como problemas Misto-Inteiros Lineares de dois níveis (BMILP), conhecidos por serem computacionalmente custosos. Com o objetivo de diminuir o custo computacional e aumentar a liberdade na sugestão de futuras restrições, foi sugerido um Algoritmo Genético (GA) para lidar com as variáveis binárias do problema. O modelo (BMILP) foi resolvido ainda pela heurística do solver Gurobi, sendo possível comparar os melhores valores conhecidos para seis funções objetivos diferentes. Exceto para o glioxilato (-20,55%), todas as demais soluções foram as melhores conhecidas. Somente foi possível superar a inconsistência de natureza estocástica do GA pelo fornecimento de informações do redirecionamento de fluxos do metabolismo.

1 INTRODUÇÃO

Modelos como o OptKnock [1] são capazes de sugerir o melhor conjunto de deleções (a nível reacional) para maximizar a conversão de substrato em produto. Adicionalmente, o modelo considera a função objetivo biológica (i.e., nível interno, a restrição é um problema de otimização linear, LP), tornando o modelo mais próximo da realidade. Essa formulação pode ser traduzida em um problema Bilevel Misto-Inteiro Linear (BMILP).

Problemas desse tipo são conhecidos por serem computacionalmente desafiadores. Em especial, o OptKnock é generalizado em um MILP após a aquisição de variáveis binárias do nível interno com o amparo da dualidade forte. Isso resulta em um problema substancialmente maior em número de variáveis e restrições. Com poucas intervenções se torna inviável obter solução ótima em um tempo razoável de otimização (e.g., mais do que uma semana).

O presente trabalho tem como objetivo sugerir um Algoritmo Genético (GA) feito especialmente para modelos similares ao OptKnock. Dessa forma é possível obter soluções de alta qualidade, em pouco tempo de processamento, ao passo que se soluciona o BMILP de forma sequencial.

Foi possível obter o melhor resultado conhecido com GA, exceto para a maximização do glioxilato, obtendo-se um resultado substancialmente pior. Ademais, apesar da natureza estocástica do GA, o mesmo se mostrou consistente, dentro de limitações. É notável mencionar a dependência de informações prévias para o funcionamento adequado do algoritmo.

2 METODOLOGIA

O BMILP utilizado é similar ao OptKnock, o modelo usado é explicado em detalhes em [2], nomeado *Augmented ReackKnock* (ARK). Considerou-se o modelo metabólico genômico de *E. coli* iAF1260 e meio de glicose mínimo em aerobiose, com exatas cinco intervenções. Foram maximizados seis fluxos diferentes: Succinato, Etanol, L-Glutamato, Hidrogênio (átomo), Glioxilato e D-Lactato.

Esse problema foi solucionado de duas formas diferentes: (*i – Sequencial*) O BMILP é composto por um LP cuja uma restrição é outro LP. Ao invés de se generalizar em um único problema, é possível fazer de forma sequencial, sob pena de definir as binárias a priori. Dessa forma, a solução do LP é realizada pelo solver comercial Gurobi (Simplex), e as binárias pelo GA sugerido. Foram testadas 3 *seeds* pelo gerador *Threefry 4x64*. Cada otimização foi limitada a: 500 mil nós explorados ou 120 minutos ou se o maior valor conhecido foi atingido.

(*ii – Simultânea*) O BMILP é generalizado em um MILP [1][2]. Abordagens determinísticas falharam em entregar resultados ótimos ou mesmo o melhor conhecido em 7 dias de simulação explorando mais de 30 milhões de nós. Por esse motivo o MILP foi solucionado usando a heurística implementada no Gurobi (v.12). Foram explorados 500 mil nós sem restrição de tempo, obtendo assim os melhores valores conhecidos.

As rotinas foram implementadas em MATLAB e executadas em um computador doméstico Threadripper 7960X (24/48), atingindo menos de 5 GHz ao longo das otimizações.

2.1 Algoritmo Genético

O algoritmo genético sugerido possui a estrutura clássica padrão [3] com adição de algumas funcionalidades: (*i – Informação prévia*) A primeira e mais importante é o aumento da probabilidade (dez mil por cento) de grupos de reações específicos serem selecionadas em qualquer sorteio: 1. Reações de transporte intra/extracelular; 2. Reações que usam ATP/ADP; 3. e 4. Reações que usam CO₂ ou CoA. 5. Reações de isomerização. Os 5 grupos totalizam em torno de 44% das variáveis binárias. (*ii – Memória Tabu*) Os nós explorados são resolvidos somente uma vez. Caso aquele mesmo nó seja sugerido, o algoritmo substitui por outro nó inexplorado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A otimização do caso simultâneo explorou um pouco mais de 500 mil nós (o espaço total é da ordem de 2^{12005} , o espaço viável é da ordem de 2^{1032}), para as 6 funções objetivos, ao longo de 54 horas, resultado em, aproximadamente, 54 mil nós por hora em média.

A otimização do caso sequencial (Tabela 1) conseguiu atingir os melhores valores conhecidos rapidamente, exceto para o glioxilato, onde não se obteve-o dentro dos limites de tempo. Não é possível comparar a velocidade com que o caso simultâneo atingiu o melhor valor conhecido, dado que essa otimização somente é limitada pela quantidade de nós. No entanto, a presente abordagem foi cerca de até 8 vezes mais rápida que o caso simultâneo em termos de milhares de nós por hora, nos piores casos, cerca de 2 vezes.

O caso sequencial obteve valores de nós explorados por hora superiores aos do simultâneo por diversos motivos. O problema sequencial resolve dois LP's pequenos (2 vezes 1032 vs. 12005 restrições). A heurística implementada no Gurobi não consegue prever nós inviáveis (e.g., nós com número de intervenções diferente de 5), logo uma quantidade substancial de tempo é perdida tentando solucionar problemas inviáveis.

Tabela 1: Resultados caso sequencial (GA)

Alvos	Gap	Nós explorados	Tempo real (min)
Succinato	0%±0%	43433±5300	6,27±1,00
Etanol	0%±0%	18233±2250	2,60±0,36
L-Glutamato	0%±0%	146100±57719	27,19±13,28
Hidrogênio	0%±0%	209800±148971	58,62±44,11
Glioxilato	20,55%±0%	332300±14749	120±0
D-Lactato	0%±0%	121366±21027	35,12±7,60

Porém, a inexistência de um MILP de fato impede que o GA use o problema relaxado para realizar podas na árvore binária, reduzindo substancialmente a capacidade de refinar a solução incumbente. Por esse motivo a adição de informações de contexto biológico são relevantes. Por outro lado, a abordagem simultânea permite a sugestão de meta modelos ou modelos ainda mais complexos sem grandes custos.

O problema encontrado no glioxilato se deve a necessidade de se trocar 2 intervenções piores por 2 melhores, atingindo assim o melhor valor conhecido. No entanto tal sorteio é improvável. A troca de uma intervenção somente, devido a efeitos sinérgicos, resulta em uma função objetivo menor, e, por conseguinte na não seleção para etapas futuras.

4 CONCLUSÃO

O Algoritmo Genético apresentou performance computacional satisfatória, podendo ser até 8 vezes mais rápido que o estado da arte. A qualidade das soluções se mostrou consistente dentro dos limites definidos, embora um resultado, entre os 6 sugeridos, tenha sido substancialmente pior.

Futuros experimentos visam sanar essa inconsistência com adição de algoritmos capazes de reconhecer padrões sinérgicos. Bem como incorporar mais informação biológica sem custo ou com custo computacional reduzido.

5 AGRADECIMENTOS

Nós agradecemos ao suporte do RCGI – *Research Centre for Gas Innovation*, sediado na Universidade de São Paulo (USP) e financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2014/50279-4, 2020/15230-5 e 2023/09130-6). Agradecemos ainda a Shell Brasil e a importância estratégica da ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

6 REFERÊNCIAS

- [1] BURGARD, Anthony P.; PHARKYA, Priti; MARANAS, Costas D. *Optknock: a bilevel programming framework for identifying gene knockout strategies for microbial strain optimization*. Biotechnology and bioengineering, v. 84, n. 6, p. 647-657, 2003.
- [2] OHIRA, Guilherme de Oliveira Mendes. *Desenvolvimento de ferramentas e algoritmos em Computational Strain Optimization Models*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. doi:10.11606/D.3.2023.tde-29112023-143720. Acesso em: 2025-08-13.
- [3] KATOCH, Sourabh; CHAUHAN, Sumit Singh; KUMAR, Vijay. *A review on genetic algorithm: past, present, and future*. Multimedia tools and applications, v. 80, n. 5, p. 8091-8126, 2021.

ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS AVANÇADAS DE CHUNKING PARA APRIMORAMENTO DE RAG

A C de BRITO¹, C de S CARVALHO²

^{1, 2} Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Seção de Inteligência Artificial e Analytics

E-mail para contato:
adrianab@ipt.br1,
cassiasouza@ipt.br2

RESUMO – Este estudo avalia o impacto de várias técnicas de chunking em arquiteturas de Retrieval-Augmented Generation (RAG). Foram comparadas quatro estratégias (Recursiva, Semântica, SDPM e LATE) aplicadas a um documento sobre cidades inteligentes. Os resultados mostram um trade-off: trechos menores reduziram a latência ($\approx 2,5$ s), mas comprometeram fidelidade e relevância; trechos maiores aumentaram a consistência (0,9), porém com maior tempo de resposta (≈ 14 s). Isso reforça a importância de equilibrar granularidade e desempenho em RAGs.

1 INTRODUÇÃO

Grandes Modelos de Linguagem (LLMs) possuem capacidade avançada de compreender e gerar texto, mas restringem-se ao conhecimento presente em seus dados de treinamento. Para suprir essa limitação, surgiu a técnica *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) [1], que permite incorporar informações externas como contexto. Em RAGs, os documentos são divididos em segmentos (*chunks*), transformados em vetores densos e indexados em bancos de dados vetoriais, possibilitando a recuperação semântica de trechos relevantes a serem fornecidos a LLMs. Com o avanço das pesquisas, surgiram estratégias que ampliam a precisão das respostas, voltadas a: segmentação de documentos, reordenação de trechos recuperados, mecanismos híbridos de busca (que combinam vetores densos e esparsos) e grafos de conhecimento. Este trabalho analisa o efeito de técnicas avançadas de *chunking* no desempenho de RAG, para identificar até que ponto diferentes granularidades de segmentação influenciam a relevância, fidelidade e similaridade das respostas.

2 METODOLOGIA

2.1 Construção da RAG

Foi desenvolvida uma RAG em linguagem Python com o framework LangChain [2], a partir de documento PDF com oito páginas tamanho A4, sobre conectividade em cidades inteligentes. Textos, tabelas e descrições de imagens foram extraídos com a biblioteca PyMuPDF4LLM [3] e segmentados em chunks com estratégia tradicional (pontuação e limite de caracteres) e três estratégias avançadas (item 2.3). Os chunks foram convertidos em vetores densos (modelo especificado no item 2.2) e armazenados no banco de dados Qdrant [4], que suporta busca híbrida, combinando vetores densos (similaridade semântica) e esparsos (palavras-chave). Os resultados são integrados por Reciprocal Rank Fusion (RFF) [5], que soma os scores recíprocos para a ordenação final

dos chunks. A RAG foi configurada para retornar cinco chunks com maior similaridade à pergunta do usuário. O desempenho da RAG foi avaliado conforme item 2.5.

2.2 Modelos utilizados

Foram utilizados o modelo *paraphrase-multilingual-mpnet-base-v2* [6] para vetores densos, o modelo BM-25 [7] para vetores esparsos. Para a geração das respostas, foi usado o modelo *llama-3.1-8b-instant* [8], e para a avaliação das respostas, o *gpt-oss-120b* [9], que são procedentes de famílias diferentes para minimizar o fenômeno conhecido como “narcisismo de LLM” [10].

2.3 Estratégias de chunking

Foram usadas as seguintes estratégias: (i) Caractere Recursivo (referência), divisão por pontuação e caracteres, com limite de tamanho fixo; (ii) Semântico, que cria *chunks* com o mesmo assunto; (iii) *Semantic Double-Pass Merging* (SDPM) [11], que identifica mudanças de assunto pela queda de similaridade semântica entre sentenças e (iv) LATE [12], que agrupa sentenças até atingir um limite de similaridade ou tamanho do *chunk*. Os parâmetros empregados nas técnicas foram: em (i), 512 caracteres de tamanho e 75 caracteres de sobreposição; em (ii, iii, iv), 512 *tokens* de tamanho e o modelo de vetores densos do item 2.2; em (iii, iv), limiar de 0.6 de similaridade.

2.4 Especificações do ambiente de execução dos experimentos

Os experimentos foram executados em ambiente Google Colab [13], com a seguinte configuração: CPU Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.20GHz e 14 GB de memória RAM. A inferência dos modelos de LLM foi realizada no servidor em nuvem Groq [14].

2.5 Mecanismos de avaliação

Para a avaliação foram consideradas cinco perguntas referentes ao assunto do contexto, escritas por pessoa que será usuária da RAG. As perguntas foram encaminhadas para a RAG, que teve seu desempenho avaliado com base nas seguintes métricas: (i) Similaridade, que considera o valor da distância do cosseno entre a pergunta e o *chunk* (é apresentada a pontuação média de todos os *chunks* e a pontuação do primeiro *chunk* retornado); (ii) Fidelidade, o quanto a resposta gerada é fiel ao contexto, (iii) Relevância, se o *chunk* é relevante à resposta. As métricas (ii) e (iii) empregam um LLM para o julgamento, cujo *prompt zero-shot* solicita que sejam dadas notas de 0 a 10 para cada critério. As métricas (i, ii, iii) variam entre 0 e 1, com escala crescente de desempenho. Além disso, são apresentadas estatísticas dos segmentos como latência média em segundos para fornecer a resposta, tamanho médio dos *chunks*, quantidade máxima de caracteres dos *chunks*, e número de *chunks* por estratégia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentadas as estatísticas dos *chunks* e as métricas de avaliação do desempenho da RAG.

Tabela 1: Métricas por tipo de chunker

Chunker	Num. chunks	Tamanho máximo de chunk	Tamanho médio de chunks	Latência média (s)	Similaridade		Fidelidade média	Relevância média
					Média	Média primeiro chunk		
Recursivo	41	510	429	2,9	0,6	0,9	0,7	0,7
SDPM	15	2219	1707	13,8	0,6	0,9	0,9	0,9
LATE	10	2381	1138	14,1	0,6	0,8	0,9	0,9
Semântico	71	1057	240	2,4	0,5	0,8	0,7	0,8

Os métodos SDPM e LATE alcançaram maior fidelidade e relevância (0,9), indicando que trechos mais extensos (da ordem de 2000 caracteres) favoreceram a recuperação de contexto consistente. Em contraste, com os métodos Recursivo e Semântico foram produzidos mais *chunks* (41 a 71), representando trechos menores (510 a 1057 caracteres), proporcionando uma latência significativamente reduzida (entre 2,4 e 2,0 s). Porém, com tais métodos, houve redução de 10 a 20% na fidelidade e relevância, possivelmente em decorrência de uma fragmentação excessiva do contexto.

A similaridade média manteve-se estável (entre 0,5 e 0,6), refletindo a diversidade semântica dos trechos recuperados. Entretanto, a análise do primeiro *chunk* sugere que a segmentação SDPM e a recursiva preservam maior proximidade imediata com a consulta, embora isso não se traduza em maior fidelidade global, no caso da recursiva.

Esses achados evidenciam um *trade-off* entre granularidade e desempenho, ou seja, com chunking mais fino, com trechos curtos, ocorre uma otimização da velocidade de resposta, mas ocorre um comprometimento da consistência semântica. Por outro lado, com o chunking mais grosso, com trechos mais longos, há uma maior preservação do contexto, porém aumenta latência. Essa dinâmica corrobora estudos anteriores que destacam a importância do equilíbrio entre tamanho do chunk e eficiência de recuperação [15–16].

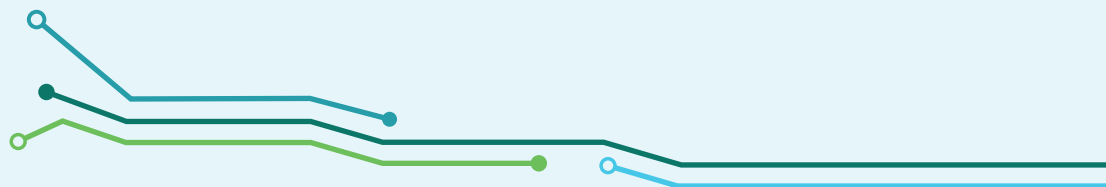
4 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o impacto de diferentes estratégias de *chunking* no desempenho de uma arquitetura RAG. Os resultados demonstraram que as abordagens SDPM e LATE, ao produzirem chunks mais extensos, alcançaram maiores níveis de fidelidade e relevância (0,9), indicando que a preservação de contextos amplos favorece respostas mais consistentes. Em contrapartida, as estratégias Recursiva e Semântica, ao fragmentarem o documento em maior número de trechos menores, reduziram a latência de resposta, mas perderam de 10 a 20% em fidelidade e relevância. Há um *trade-off* entre granularidade e qualidade das respostas em RAGs: *chunking* mais fino otimiza velocidade, *chunking* mais grosso preserva contexto e consistência semântica.

5 REFERÊNCIAS

- [1] LEWIS P, PEREZ E, PIKTUS A, PETRONI F, KARPUKHIN V, GOYAL N, KÜTTLER H, LEWIS M, YIH W, ROCKTÄSCHEL T, Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *arXiv*, 2021.
- [2] LANGCHAIN, INC. *LangChain*. 2025.
- [3] LANGCHAIN, INC. *PyMuPDF4LLM Documentation*. 2025.
- [4] QDRANT, INC. *Qdrant Documentation*. 2025.
- [5] COR M, CLARKE C, BUETTCHER S. Reciprocal rank fusion outperforms condorcet and individual rank learning methods. *Proc. SIGIR*, p. 758–759, 2009.
- [6] WOLF T, DEBUT L, SANH V, CHAUMOND J, DELANGUE C, MOI A, CISTAC P, RAULT T, LOUF R, FUNTOWICZ M, HuggingFace’s Transformers: State-of-the-art Natural Language Processing. *arXiv*, 2020.
- [7] ROBERTSON S E, WALKER S, HANCOCK-BEAULIEU M, GATFORD M, PAYNE A, LI B. Automatic ad hoc, filtering, VLC, and interactive tracks. *Proc. TREC*, 1999.
- [8] TOUVRON H, LAVRIL T, IZACARD G, MARTINET X, LACHAUX M, LACROIX T, ROZIÈRE B, GOYAL N, HAMBRO E, AZHAR F, LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models. *arXiv*, 2023.
- [9] BROWN T B, MANN B, RYDER N, SUBBIAH M, KAPLAN J, DHARIWAL P, NEELAKANTAN A, SHYAM P, SESHADRI G, KHAN C, Language Models are Few-Shot Learners. *Neural Inf. Process. Syst.*, v. 33, p. 1877–1901, 2020.
- [10] LIU Y, MOOSAVI N S, LIN C. LLMs as Narcissistic Evaluators: When Ego Inflates Evaluation Scores. *arXiv*, 2024.

- [11] MINHAS B, NIGAM S. *Chonkie: A no-nonsense fast, lightweight, and efficient text chunking library*. 2025.
- [12] GÜNTHER M, MOHR I, WILLIAMS D J, WANG B, XIAO H. Late Chunking: Contextual Chunk Embeddings Using Long-Context Embedding Models. *arXiv*, 2025.
- [13] GOOGLE, INC. *Google Colaboratory*. 2025.
- [14] GROQ, INC. *Groq*. 2025
- [15] KUSH, J. et al. Introducing a new hyper-parameter for RAG: Context Window Utilization. *ArXiv*, 2024.
- [16] MEROLA, C. et al. Reconstructing Context: Evaluating Advanced Chunking Strategies for Retrieval-Augmented Generation. *ArXiv*, 2025.



ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE PÓ METÁLICO PARA MANUFATURA ADITIVA

A A ZERWAS^{1,2,5}, F C da SILVA^{3,4}, J L J RUELAS³, L ACHELIS⁵,
U FRITSCHING^{4,5}, J L de PAIVA¹, R GUARDANI¹



¹ Universidade de São Paulo, Departamento Engenharia Química, Brasil

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Brasil

³ Universidade de São Paulo, Instituto de Matemática e Ciência da Computação, Brasil

⁴ Universidade de Bremen, Departamento de Produção, Alemanha

⁵ Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien, Alemanha

E-mail para contato:
alexander.zerwas@usp.br,
f.costa.da.silva@fz-juelich.de

RESUMO – A metodologia desenvolvida neste estudo serve como um guia para otimizar os parâmetros do processo na produção de pó para manufatura aditiva usando atomização a gás. Neste artigo, focamos na análise do processo de atomização usando uma configuração de fenda anular para a atomização de H13 e analisando o efeito da pressão e temperatura da atomização a gás nas características do pó. Concluiu-se que a temperatura do gás tem um efeito significativo no aumento da fração de partículas finas (20–45 µm) e no aumento da esfericidade e da relação de aspecto das partículas. A fim de otimizar o processo de atomização (pressão e temperatura de atomização do gás) para gerar frações mais altas de pós metálicos adequados para as duas principais rotas de MA (L-PBF, DED), mantendo também bons aspectos morfológicos, foi utilizada uma otimização multiobjetiva. A otimização utilizou um algoritmo genético de classificação não dominado [NSGA-II]. Foi encontrada uma condição ideal com pressão do gás de atomização de 2,04 MPa e um nível de aquecimento intermediário de 448,0 K para o processo L-PBF e, para o processo DED, um valor ideal foi observado em pressões de atomização de gás mais baixas (0,97 MPa) e um aquecimento do gás de 406 K.

1 INTRODUÇÃO

A atomização é um processo comum utilizado para quebrar a superfície líquida e produzir gotículas/partículas de diferentes tamanhos para uma ampla gama de aplicações. Uma delas é a Manufatura Aditiva (MA), na qual um pó de liga é seletivamente derretido por um laser. Normalmente, o pó para aplicações de MA varia em tamanho de diâmetro de 10 a 150 µm [1–4], dependendo da rota de MA [Deposição Direta de Energia – DED ou Fusão a Laser em Leito de Pó – L-PBF]. Durante o processo de atomização, normalmente é produzida uma ampla distribuição do tamanho das partículas, que pode ser controlada ajustando os parâmetros do processo (pressão e temperatura do gás, superaquecimento do metal e outros) e um projeto adequado do bico.

Neste artigo, foi empregado um projeto experimental de Döehlert [5] para investigar o efeito multivariado da pressão e da temperatura do gás de atomização, discernindo estatisticamente o efeito dos parâmetros nas variáveis de resposta [6,7]. Esta investigação envolveu a aquisição de curvas de resposta que descrevem o pó produzido (AISI H13) utilizando uma configuração de fenda anular.

Além disso, um parâmetro de processo ideal (pressão e temperatura de atomização do gás) que resultou em um equilíbrio entre o rendimento do pó adequado para cada processo MA (L-PBF, DED) e as características das partículas foi obtido usando um algoritmo genético de classificação não dominado (NSGA-II) [8] em uma otimização multiobjetiva, que demonstrou robustez para o caso atual.

2 METODOLOGIA

2.1 Arranjo experimental

Para os testes de atomização usando gás aquecido e configuração de fenda anular, foi empregado um projeto Döhlert de duas variáveis. Este projeto consiste em cinco níveis nominais de pressão do gás (0,8, 1,1, 1,4, 1,7 e 2,0 MPa) e três níveis nominais de temperatura (293, 423 e 573 K), com duas repetições no ponto central realizadas para determinar a variabilidade do processo, resultando em um total de oito experimentos.

2.2 Caracterização do pó metálico

Para cada parâmetro de atomização, partículas de formato irregular (flocos) foram separadas do pó esférico AISI H13 por peneiramento com uma malha de 210 μm (malha US #18) durante 20 minutos em um vibrador mecânico, com o peso das partículas irregulares coletadas. Frações do pó total (rendimento) em cada faixa de tamanho MA foi obtida peneirando as partículas entre 20 e 44 μm para o processo L-PBF e diâmetros entre 44 e 105 μm para o processo DED.

2.3 Superfície de Resposta

A superfície de resposta de cada resposta característica do pó foi ajustada a uma função polinomial de segunda ordem, com base nos parâmetros do modelo e nos valores codificados experimentais das variáveis independentes (). A análise de variância [ANOVA] [9] foi empregada para determinar o efeito e a interação das variáveis independentes nos valores de resposta.

2.6 Otimização Multiobjetivo

Para fins de otimização, foi empregado um algoritmo genético não dominado (NSGA-II) [8], que identifica não apenas uma solução solitária, mas sim uma coleção de pontos ótimos, designados como soluções ótimas de Pareto, com vastas aplicações encontradas na literatura [10–12]. Para esta etapa, foi utilizada uma biblioteca disponível (PYMOO) para otimização mono e multi-objetivo na linguagem Python [13].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Influência de parâmetro de processo nas características das partículas

O rendimento das partículas finas (L-PBF) exibe uma influência perceptível da temperatura e da pressão do gás no aumento da fração de pó dessas pequenas partículas. Essa observação está alinhada com a interpretação física da atomização, na qual se sabe que um aumento na velocidade relativa (velocidade do som do gás) e no GMR amplifica a intensidade da fragmentação. Esse fenômeno é atribuível a um efeito sinérgico dos parâmetros testados, ou seja, pressão e temperatura. Para o rendimento na faixa de tamanho DED, observou-se uma tendência oposta em comparação com o rendimento L-PBF. Um aumento na temperatura e pressão de atomização do gás resultou em uma redução da fração de pó dentro dessa faixa de tamanho, um fenômeno que foi comprovado estatisticamente por meio da análise ANOVA.

Além disso, observou-se que a temperatura do gás exerceu um efeito mais pronunciado em comparação com a pressão do gás. Essa observação pode ser atribuída à mudança na distribuição dos tamanhos das partículas para tamanhos menores, que foi acompanhada por um aumento nas intensidades de ruptura. As curvas de resposta para o rendimento na faixa de tamanho L-PBF e DED são apresentadas na Figura 1.

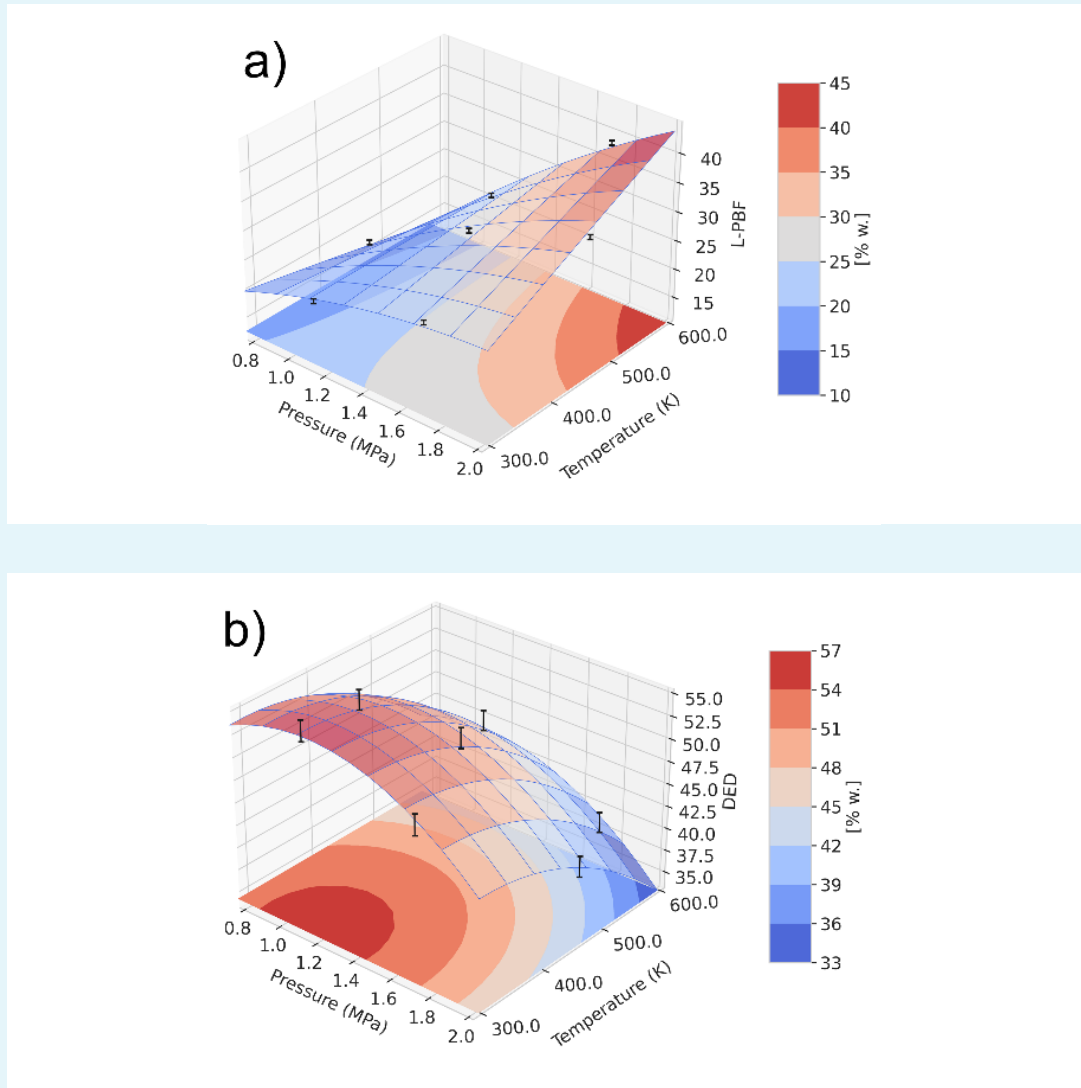


Figura 1: Gráficos de superfície das respostas: a) Rendimento de L-PBF (% p.) com $R^2 = 0,993$; b) Rendimento de DED (% p.) com $R^2 = 0,973$.

Também foi realizada uma avaliação da morfologia das partículas em relação aos parâmetros de pressão e temperatura do gás. Essa análise permitiu investigar a influência das variações desses parâmetros na circularidade, na proporção e na convexidade das partículas produzidas.

Conforme ilustrado na Tabela 1, uma compilação dos valores p obtidos da tabela ANOVA dos efeitos de primeira e segunda ordem das variáveis independentes, com valores destacados correspondentes a valores p inferiores a 0,05, indicando com um nível de confiança de 95,0% que o efeito tem uma influência significativa nos valores de resposta.

Tabela 1: Valores p obtidos a partir da ANOVA das variáveis de resposta, divididas em termos de parâmetros de tamanho e morfologia. Os valores destacados indicam valores p inferiores a 0,05, indicando com um nível de confiança de 95,0% que o parâmetro tem um efeito significativo nas respostas.

	Efeito	Pressão	Pressão ²	Temperatura	Temperatura ²	Pressão* Temperatura
	Variável independente	X_1	X_1^2	X_2	X_2^2	$X_1 X_2$
Tamanho	Flakes	0.0033	0.0073	0.0084	0.0287	0.0252
	D_{10}	0.0323	0.2855	0.3234	0.7213	0.3264
	D_{50}	0.0439	0.2549	0.5154	0.2194	0.7298
	D_{90}	0.1083	0.1315	0.1182	0.1340	0.6403
	Span	0.0082	0.0859	0.0213	0.2598	0.7986
	L – PBF	0.0045	0.2762	0.0325	0.8871	0.0385
	DED	0.0440	0.1190	0.0221	0.1572	0.8085
Morfologia	HS _{médio}	0.3086	0.2824	0.0457	0.1167	0.3841
	HS _{STD}	0.1026	0.1616	0.0072	0.1234	0.0782
	Convexidade	0.3604	0.3939	0.2207	0.6201	0.5419
	Convexidade _{STD}	0.3118	0.9103	0.1131	0.3332	0.2890
	AR _{média}	0.5219	0.0232	0.0097	0.0622	0.6363
	AR _{STD}	0.0428	0.0445	0.0026	0.0886	0.0406

3.2 Otimização multiobjetivo

Dada a presença de características variáveis do pó, que são influenciadas pelos parâmetros do processo empregados durante a atomização e, subsequentemente, afetam o processo de MA, surge um problema de otimização com múltiplos objetivos [14]. Para o caso atual, um parâmetro de processo ideal para a atomização (pressão e temperatura do gás) para o pó H13, que maximiza individualmente o rendimento produzido de duas das principais rotas de AM (L–PBF e DED) e a forma das partículas (mais esférica e razão de aspecto mais próxima da unidade) e que minimize o desvio padrão desses valores no pó (uniformidade da amostra), com base nas superfícies de resposta obtidas anteriormente.

Observa-se que o cenário ideal ocorre quando se emprega uma alta pressão de atomização de gás (2,04 MPa) e um certo nível de aquecimento do gás (448,0 K), com uma fração total de pó da ordem de 37% para o processo L–PBF, ao mesmo tempo em que se maximiza a esfericidade (0,965) e a relação de aspecto (0,936) do pó, embora sejam observados desvios padrão mais elevados para a morfologia. Além disso, expandindo o espaço de pesquisa para abranger regiões além do DOE, com pressões de atomização de gás variando de 0,83 a 2,05 MPa e temperaturas de gás de 293 a 589 K, um ponto ideal ocorre com alta pressão de atomização do gás (2,05 MPa) e níveis ainda mais altos de aquecimento do gás (525,7 K), com um rendimento de 41,2 % e alta esfericidade (0,965) e proporções (0,938).

Para o processo DED, no qual foram observados rendimentos de pó mais elevados a pressões de atomização de gás mais baixas, foi obtida uma solução ótima utilizando uma pressão de atomização de gás de 0,97 MPa e temperaturas de 406 K, resultando em um rendimento DED de 53,4% e altos valores de esfericidade (0,958) e proporções (0,929), com desvios padrão de 0,089 (HSSTD) e 0,109 (ARSTD). Observa-se que um aumento no rendimento DED resultou em valores reduzidos para esfericidade e proporções. Por outro lado, um aumento no desvio padrão das amostras medidas resultou na solução ótima permanecendo no meio dos pontos ótimos de Pareto. Ao remover as restrições do espaço DOE, valores semelhantes para as funções objetivas para a condição operacional ótima foram obtidos, com pressão do gás de atomização de 1,07 MPa e temperatura de 446,0 K, resultando em 52,3 % de rendimento DED, exibindo 0,96 de esfericidade, 0,93 de relação de aspecto e desvios padrão menores de 0,079 (HSSTD) e 0,102 (ARSTD).

4 CONCLUSÃO

Este estudo empregou uma abordagem estatística para analisar os efeitos de primeira e segunda ordem dos parâmetros de atomização nas características do pó e identificou sua relevância com base na análise de variância (ANOVA). Observou-se um efeito significativo com o aumento da pressão do gás de atomização, o que levou a uma diminuição do tamanho médio das partículas para diâmetros menores (diminuindo a fração de pó com diâmetros grandes (rendimento DED) para diâmetros menores (rendimento L-PBF)). Além disso, também foi determinado que o aumento da temperatura de atomização do gás tem um impacto significativo no aumento do rendimento do pó fino.

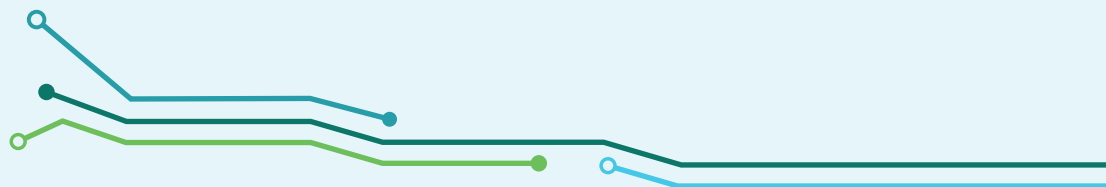
Como etapa final, foi empregada uma otimização multiobjetiva usando o NSGA-II para determinar o parâmetro de processo ideal (pressão e temperatura do gás), que maximizou individualmente o rendimento do pó nos dois processos principais de MA (L-PBF e DED), ao mesmo tempo em que melhorou aspectos morfológicos das partículas.

Essa metodologia serve como um guia para a produção eficiente de pó metálico para o mercado de MA e pode ser uma ferramenta útil para otimizar os parâmetros do processo para maximizar a eficiência, o que, por sua vez, reduz os custos e garante a produção de pó de alta qualidade. Ela também apoia o desenvolvimento de sistemas avançados de atomização, permitindo a exploração de parâmetros.

5 REFERÊNCIAS

- [1] M.A. Balbaa, A. Ghasemi, E. Fereiduni, M.A. Elbestawi, S.D. Jadhav, J.-P. Kruth, Role of powder particle size on laser powder bed fusion processability of AlSi10Mg alloy, *Addit Manuf* 37 (2021) 101630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101630>.
- [2] B. Dutta, S. Babu, B. Jared, Chapter 4 – Raw materials for metal additive manufacturing, in: B. Dutta, S. Babu, B. Jared (Eds.), *Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing*, Elsevier, 2019: pp. 77–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816634-5.00004-2>.
- [3] R. Harkin, H. Wu, S. Nikam, J. Quinn, S. McFadden, Reuse of Grade 23 Ti6Al4V Powder during the Laser-Based Powder Bed Fusion Process, *Metals (Basel)* 10 (2020) 1700. <https://doi.org/10.3390/met10121700>.
- [4] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, B. Kieback, Powders for powder bed fusion: a review, *Progress in Additive Manufacturing* 4 (2019) 383–397. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>.
- [5] D.H. Doehlert, Uniform Shell Designs, *Appl Stat* 19 (1970) 231. <https://doi.org/10.2307/2346327>.
- [6] P. Metolina, F.R. Lourenço, A.C.S.C. Teixeira, UVC- and UVC/H₂O₂-Driven nonribosomal peptide antibiotics degradation: application to zinc bacitracin as a complex emerging contaminant, *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 56 (2021) 97–112. <https://doi.org/10.1080/10934529.2020.1841499>.

- [7] P. Metolina, T.R. Ribeiro, R. Guardani, Hydrogen-based direct reduction of industrial iron ore pellets: Statistically designed experiments and computational simulation, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 29 (2022) 1908–1921. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2487-3>.
- [8] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2002) 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- [9] G.E.P. Box, J.S. Hunter, W.G. Hunter, *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*, 2nd ed., Wiley-Interscience, Hoboken, 2005.
- [10] A.M. Adham, N. Mohd-Ghazali, R. Ahmad, Optimization of an ammonia-cooled rectangular microchannel heat sink using multi-objective non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA2), *Heat and Mass Transfer* 48 (2012) 1723–1733. <https://doi.org/10.1007/s00231-012-1016-8>.
- [11] N. Alikar, S.M. Mousavi, R.A. Raja Ghazilla, M. Tavana, E.U. Olugu, Application of the NSGA-II algorithm to a multi-period inventory-redundancy allocation problem in a series-parallel system, *Reliab Eng Syst Saf* 160 (2017) 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.res.2016.10.023>.
- [12] H. Ma, Y. Zhang, S. Sun, T. Liu, Y. Shan, A comprehensive survey on NSGA-II for multi-objective optimization and applications, *Artif Intell Rev* 56 (2023) 15217–15270. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10526-z>.
- [13] J. Blank, K. Deb, Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python, *IEEE Access* 8 (2020) 89497–89509. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990567>.
- [14] H. Tamaki, H. Kita, S. Kobayashi, Multi-objective optimization by genetic algorithms: a review, in: *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE, 1996: pp. 517–522. <https://doi.org/10.1109/ICEC.1996.542653>.



AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE BANDAS ESPECTRAIS NA IDENTIFICAÇÃO DE ESTRESSE DA VEGETAÇÃO DECORRENTE DE CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS

M. BARBOSA¹, C. P. CAVALHIERI¹, L. C. SILVA^{1,2}



¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)

² Universidade Federal do Estado de São Paulo (UNIFESP)

E-mail para contato:
muselli@ipt.br

RESUMO – A avaliação de áreas contaminadas exige métodos capazes de reduzir custos e incertezas associados às análises tradicionais. Este trabalho investigou a aplicação de bandas espectrais e índices de vegetação para identificar padrões de estresse em vegetação exposta a contaminação por nafta em Mauá (SP). Foram utilizados dados adquiridos por drone multiespectral e processados em linguagem Python e GIS, com cálculo de índices de stress vegetal. Os resultados demonstraram que a vegetação em área impactada apresentou maiores valores de estresse e maior variabilidade, enquanto a vegetação fora da área contaminada apresentou respostas mais homogêneas. Os resultados preliminares indicam que a técnica é promissora para monitoramento ambiental de baixo custo e não invasivo.

1 INTRODUÇÃO

A detecção de contaminações no meio físico é um desafio relevante na avaliação de impactos ambientais, devido à heterogeneidade e anisotropia do ambiente subterrâneo. Métodos tradicionais exigem elevado número de análises, aumentando custos e incertezas. Nesse contexto, técnicas indiretas, como o sensoriamento remoto, oferecem alternativas mais rápidas e econômicas, ainda que semi-quantitativas, capazes de identificar fenômenos associados à presença de contaminantes e subsidiar decisões de intervenção.

O uso de bandas espectrais específicas do espectro eletromagnético permite a construção de índices de vegetação [1], como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que indicam vigor e saúde da vegetação [2]. Alterações fisiológicas decorrentes de contaminação podem ser detectadas por meio desses índices, uma vez que diferentes espécies apresentam estratégias distintas de tolerância a compostos tóxicos.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a resposta da vegetação a um vazamento de nafta, por meio da análise de índices espectrais e da identificação de padrões de estresse associados à contaminação do solo.

2 METODOLOGIA

A área de estudo localiza-se em uma faixa de dutos de distribuição de combustíveis em Mauá (SP), onde devido a uma derivação clandestina em 2019, houve o vazamento de nafta gerando contaminação do solo e água subterrânea. Os monitoramentos ambientais realizados em 2024, evidenciaram a presença da contaminação por hidrocarbonetos e delimitaram a pluma existente (Figura 1).

Para aquisição dos dados espectrais em campo foram delimitadas duas áreas contíguas: uma sob influência da contaminação e outra sem influência direta (área controle). Os dados das contaminações e distribuição das áreas de aquisição processada e modeladas em sistema GIS, de forma a criar as plumas de distribuição e área de abrangência dos impactos no solo e na água subterrânea.

Para a aquisição das imagens áreas utilizou-se o DJI Phantom 4 Multispectral, obtendo-se as bandas: Vermelho (*Red* = 650 ± 16 nm), Verde (*Green* = 560 ± 16 nm), Azul (*Blue* = 450 ± 16 nm), Borda Vermelha (*RedEdge* = 730 ± 16 nm) e Infravermelho Próximo (NIR = 840 ± 26 nm), com resolução espacial de 7,5 cm x 7,5 cm, com sobreposição de 60% e aquisição em um único plano de voo (Figura 2).

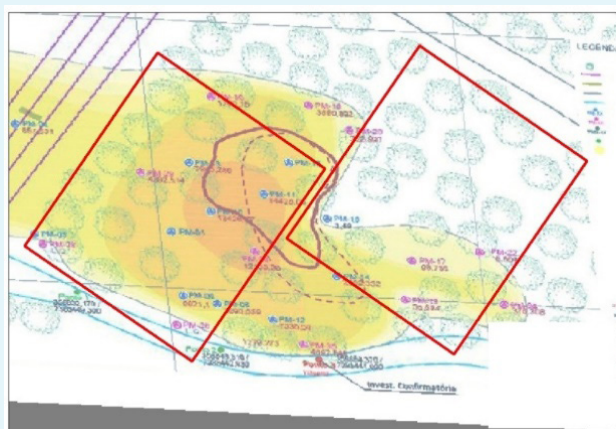


Figura 1: Delimitação da pluma de contaminação presente na água subterrânea



Figura 2: Imagem de sobrevoos de 2019 (esquerda) e de 2025 (direita).

A realização das análises dos comportamentos espectrais foi realizada com base nos índices de vegetação selecionados, sendo destes associados ao comportamento fisiológico [2, 3] (**Tabela 1**). Para avaliar as áreas mais afetadas pela presença de contaminação no solo e água subterrânea, foram calculados, normalizados e empilhados, obtendo-se um índice combinado de stress vegetal. Sendo gerada a imagem georreferenciada do índice de stress, onde quanto maior o valor, maior é o stress apresentado pela vegetação e a análise de distribuição dos valores, possibilitando avaliar numericamente os resultados.

Todo o processamento dos dados espaciais foi realizado em linguagem Python, utilizando a biblioteca RASTERIO, que utiliza o GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), é uma biblioteca tradutora para formatos de dados geoespaciais (rasters e vetores), de licença de código aberto da *Open Source Geospatial Foundation* [4]. Sendo gerada a imagem georre

Tabela 1: Índices espectrais associados a comportamento da vegetação.

Índice Espectral	Fórmula	Resultado
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Mede a densidade e vigor da vegetação, diferenciando áreas verdes de solo exposto.
GNDVI – Green Normalized Difference Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$	Indica o teor de clorofila e o estado nutricional da vegetação; sensível ao conteúdo de nitrogênio.
NDRE – Normalized Difference Red Edge Index	$(\text{NIR} - \text{RedEdge}) / (\text{NIR} + \text{RedEdge})$	Avalia o teor de clorofila em estágios mais avançados de crescimento; útil quando o NDVI satura.
RECI – Red Edge Chlorophyll Index	$(\text{NIR} / \text{RedEdge}) - 1$	Estima o teor de clorofila foliar; mais sensível a variações sutis em vegetação densa.
GCI – Green Chlorophyll Index	$(\text{NIR} / \text{Green}) - 1$	Estima o conteúdo de clorofila e a eficiência fotossintética; útil para monitorar nutrição nitrogenada.
EVI – Enhanced Vegetation Index	$2,5 \times (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6 \times \text{Red} - 7,5 \times \text{Blue} + 1)$	Melhora a sensibilidade em áreas de alta biomassa e minimiza efeitos do solo e da atmosfera.
SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index	$((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L)) \times (1 + L)$, com $L = 0,5$	Corrige a influência do solo em áreas com vegetação esparsa; melhora a precisão do NDVI.
CCCI – Canopy Chlorophyll Content Index	$(\text{NDRE} - \text{NDREmin}) / (\text{NDREmax} - \text{NDREmin}) \times (\text{NDVI} / \text{NDVImax})$	Estima o teor de clorofila e o status nutricional da copa das plantas, combinando NDRE e NDVI.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A imagem combinada do índice de stress obtida pelo RATERIO é apresentada na Figura 3, possibilitando a avaliação visual as regiões sob stress. O resultado possibilitou a diferenciação do comportamento das duas áreas, sendo observada a presença de vegetação sob stress nas bordas da área controle, indicando que os limites utilizados não foram adequados, estando parte da área controle afetada pela contaminação do aquífero.

Ao avaliar os valores do índice obtido para cada célula calculada (7,5 cm x 7,5 cm) obtidos para ambas as áreas analisadas, observou-se que a área sem a influência da pluma de contaminação apresentou valores consistentemente menores do índice de stress e maior homogeneidade nos índices (Figura 4 e Figura 5).

Em contrapartida, a área contaminada mostrou valores mais elevados e recorrência de *outliers* superiores, indicando que a contaminação por hidrocarbonetos comprometeu os processos fisiológicos da vegetação. É possível observar outliers superiores para a área não contaminada (controle), possivelmente associados a região de borda, afetada pela presença da contaminação, alterando o comportamento da vegetação desta área.

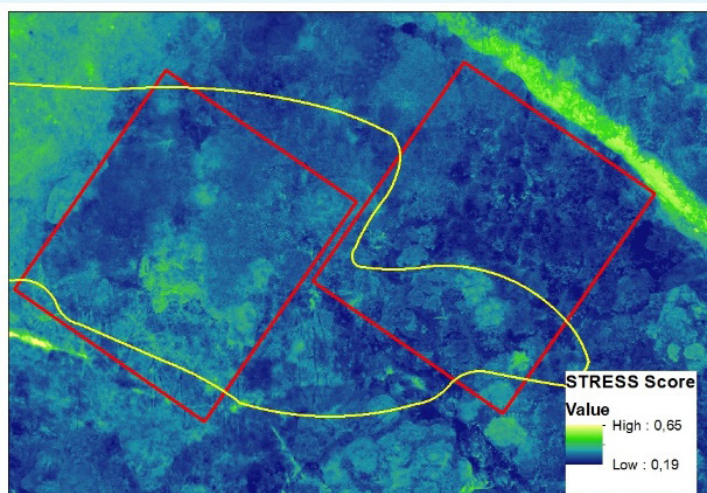


Figura 3: Distribuição dos valores do índice de stress vegetal e projeção da pluma de contaminação delimitada.

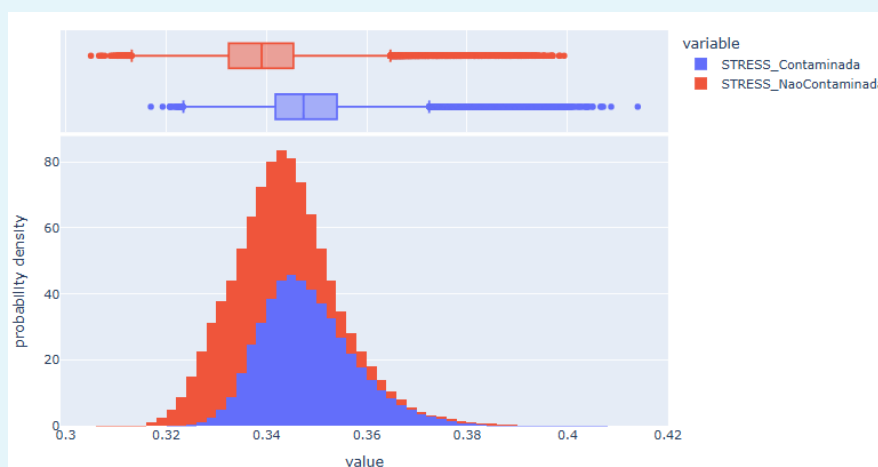
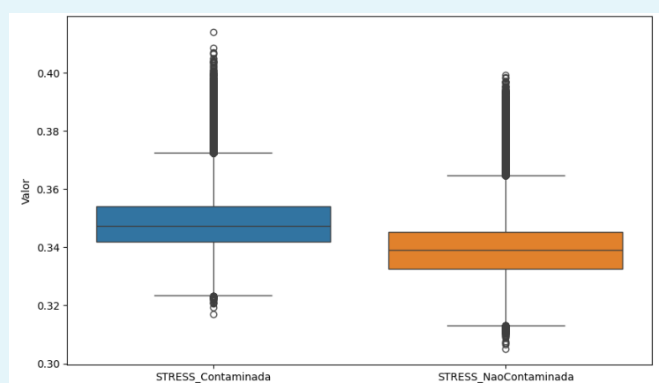


Figura 4: Histogramas para os índices stress vegetal da área contaminada e não contaminada.



Scafutto et al. [5], ao analisarem vegetação de mangue impactada por contaminação de hidrocarbonetos ocorrida a 20 anos em Bertioga-SP, verificaram que as folhas das árvores expostas ao óleo apresentaram diminuição significativa na clorofila, indicando prejuízo na capacidade fotossintética, aumento de fenóis foliares e menor produção de folhas, porém mais espessas. Corroboram com os dados observados, demonstrando que a presença de contaminações no solo e água subterrânea afetam os processos fisiológicos da vegetação.

Os resultados preliminares confirmam a aplicabilidade das bandas espectrais conjuntas na detecção de impactos ambientais como um método rápido e não invasivo, possibilitando uma avaliação indireta do comportamento subterrâneo da contaminação e sua influência sobre o meio. Por meio desta estratégia, também é possível selecionar espécimes resistentes e adaptadas à presença da contaminação, como forma ampliar a recomposição vegetal de áreas impactadas, adotando-se uma abordagem de soluções baseadas na natureza (SbN).

Entretanto, fatores como profundidade da contaminação, sistema radicular e dinâmica do aquífero influenciam diretamente a resposta vegetal, sendo necessários maiores estudos para avaliar características dos espécimes vegetais, assim como a sazonalidade pluviométrica, onde a disponibilidade de água pode afetar parâmetros relacionados à saúde vegetal, como stress hídrico e diluição das contaminações presentes no lençol freático.

4 CONCLUSÃO

A aplicação de índices espectrais de stress vegetal se mostrou eficiente para identificar alterações fisiológicas na vegetação da área de estudo associadas à contaminação por hidrocarbonetos.

A técnica representa alternativa viável, de baixo custo e não invasiva para o monitoramento ambiental, necessitando um conhecimento intermediário de plataforma GIS e de programação em linguagem Python.

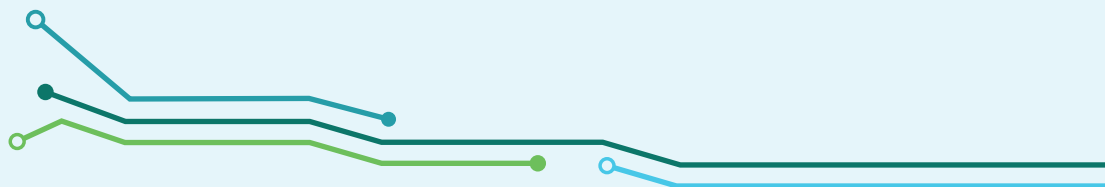
Recomenda-se a continuidade dos estudos, com enfoque em diferentes períodos sazonais, para compreender melhor a variabilidade das respostas vegetais ao longo do ano e consolidar a metodologia como ferramenta de avaliação de áreas contaminadas, assim como uma avaliação mais detalhada de cada índice de vegetação frente à presença de contaminações.

5 AGRADECIMENTOS

Ao LAMAS – Laboratório Multidisciplinar em Mineralogia, Águas e Solos da Universidade Federal de São Paulo, a TRANSPETRO Petrobrás Transporte S.A., a SIRGA – Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental do IPT e ao grupo de pesquisa SIAMÆ – Sistemas Inteligentes para Avaliação e Monitoramento Ambiental.

6 REFERÊNCIAS

- [1] JENSEN, J. R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson, 2015.
- [2] THENKABAIL, P. S; LYONS-BOY, E.; HUETE, A. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. CRC Press, 2018.
- [3] XUE, J; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *J. Sensors*, v. 2017, p. 1-17, 2017.
- [4] Open Source Geospatial Foundation. Disponível em <https://www.osgeo.org/>. Acesso 23 de outubro de 2025.
- [5] SCAFUTTO, R. D. P. M.; LASSALLE, G.; DE SOUZA FILHO, C. R. Long-term physiological and structural effects of oil contamination in tropical mangroves revealed by remote sensing and field spectroscopy. *Environmental Pollution*, v. 321, p. 123796, 2023.



AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE SOFOROLIPÍDEOS

F M SILVA¹, R A M PICCOLI¹

¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Laboratório de Biotecnologia Industrial do IPT, Núcleo de Bionanomanufatura

E-mail para contato:
felipe.msilva@usp.br

RESUMO – Este trabalho apresenta a análise técnico-econômica do processo de produção de sofrorolipídeos utilizando o software SuperPro Designer, visando comprovar o potencial de desenvolvimento de um processo competitivo. Foram compilados dados de 49 estudos sobre produtividades e rendimentos, bem como preços médios de matérias-primas e de venda do produto. A análise considerou variações de produtividade e rendimento, diferentes custos das fontes de carbono ácido oleico e glicose, escalas de capacidade produtiva e cenários de preço de venda. A combinação desses parâmetros resultou num planejamento de 243 simulações, a fim de identificar de forma sistemática o impacto econômico de cada variável isolada e de suas interações. Os resultados preliminares evidenciam que o custo das matérias-primas e o preço de venda são os fatores determinantes para a viabilidade do processo, indicando oportunidades de otimização tecnológica e estratégica para tornar os sofrorolipídeos mais competitivos no mercado.

1. INTRODUÇÃO

Ferramentas computacionais são essenciais na concepção e otimização de processos industriais, permitindo a modelagem de sistemas complexos com múltiplos parâmetros simultâneos. No contexto dos bioprocessos, essas abordagens fornecem dados estratégicos para a tomada de decisões.

O SuperPro Designer® é amplamente utilizado para essa finalidade, possibilitando a modelagem de fluxogramas, a realização de balanços materiais e energéticos e a análise do impacto de diferentes configurações operacionais (MISAILIDIS & PETRIDES, 2020). No entanto, a modelagem de bioprocessos envolve desafios adicionais, como a complexidade não linear dos sistemas biológicos e os altos custos de purificação, que dificultam sua escalabilidade industrial.

Entre os biossurfactantes, os sofrorolipídeos (SLs) se destacam devido à crescente demanda por alternativas sustentáveis aos surfactantes sintéticos (SAJNA et al, 2015). Entretanto, seu alto custo de produção ainda limita sua competitividade. Apesar do mercado global de surfactantes estar avaliado em 40 bilhões de dólares e projetado para ultrapassar 60 bilhões até 2025, a participação dos SLs ainda é insignificante em comparação aos derivados de petróleo, devido ao elevado custo por unidade de massa (DIERICKX et al, 2021).

Diante desse cenário, reduzir os custos produtivos é essencial para viabilizar a competitividade dos SLs no mercado. Este estudo utiliza a

simulação de processos a fim de avaliar os aspectos econômicos que mais impactam na viabilidade econômica da produção de SLs, a fim de oferecer direcionamento de estratégias para otimizar o bioprocessamento futuramente e torná-lo mais competitivo.

2. METODOLOGIA

Foi realizada revisão bibliográfica de 49 trabalhos sobre a produção de soforolipídeos, a partir da qual foram definidos parâmetros médios de produtividade, rendimento e preços de insumos e produto. Para as simulações no SuperPro Designer®, adotaram-se três níveis de produtividade (P1: média – 20%; P2: média; P3: média + 20%) e três de rendimento (Y1, Y2, Y3, seguindo a mesma lógica).

Considerando que as fontes de carbono ácido oleico e a glicose representam, respectivamente, 48,73% e 31,95% do consumo total de matérias-primas, levamos em consideração somente essas matérias-primas para esta avaliação. Variou-se o somatório de ambos os custos médios em $\pm 20\%$ (C1, C2, C3). Foram ainda estabelecidos três volumes de produção (V1: menor escala viável; V2: metade da capacidade máxima; V3: plena capacidade) e três valores de preço de venda do soforolipídeo (S1: mínimo; S2: médio; S3: máximo), cujas combinações geraram cenários como VIP3Y2C1S2 (total de 243 simulações).

A análise econômico-financeira concentrou-se em observar o impacto do investimento de capital fixo, custo de produção, valor presente líquido, taxa interna de retorno e tempo de payback.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados da literatura, foi elaborado um fluxograma preliminar do processo de produção de soforolipídeos, que serviu de base para as simulações no SuperPro Designer®, conforme a Figura 1.

Os parâmetros coletados foram compilados na Tabela 1 – volume de produção, produtividade, rendimento, custo da glicose e ácido oleico e preço de venda – e estruturaram os cenários testados.

Tabela 1: Parâmetros de processo de produção de soforolipídeos.

Parâmetro	Nível 1	Nível 2	Nível 3
V – Volume de produção (t/ano)	1 206	3 223	6 090
P – Produtividade ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	0,16	0,43	0,73
Y – YP/S (g/g)	0,21	0,47	0,69
C – Custo Total com Matérias-Primas (MP) (US\$/kg)	1,65	2,32	2,99
S – Preço de Venda (US\$/kg)	15	22,5	30

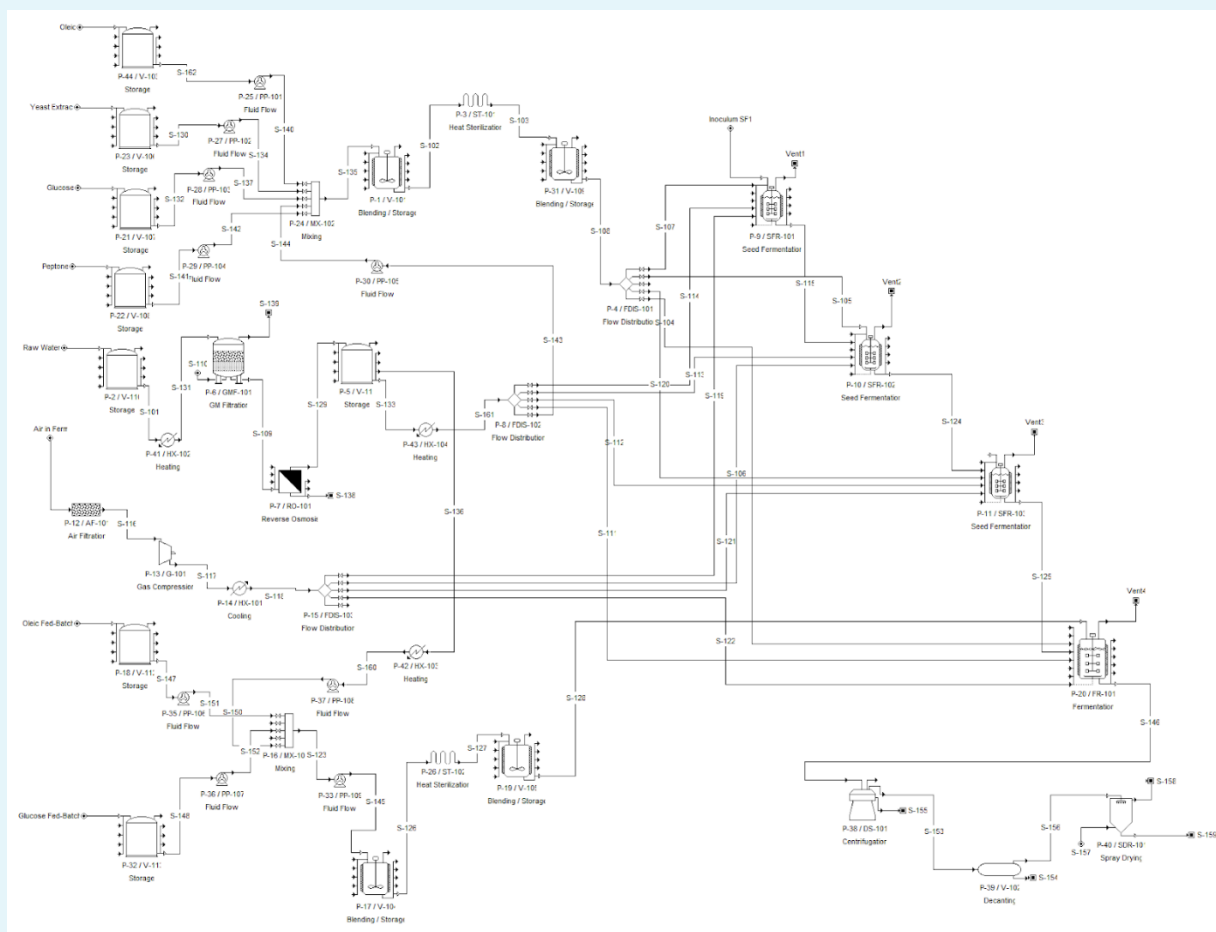


Figura 1: Fluxograma elaborado pelo autor e representado no software SuperPro Designer®.

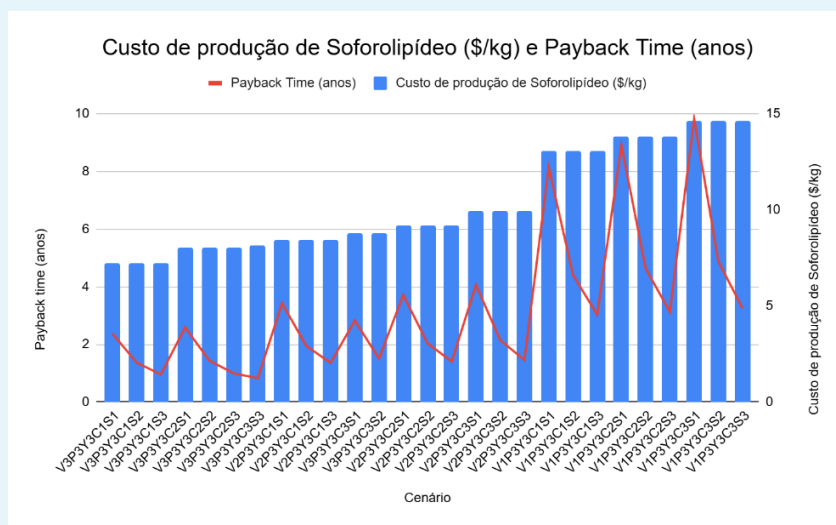


Figura 02: Relação entre custo de produção e tempo de payback para diferentes cenários produtivos. Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos até o momento, compilados na Figura 2, evidenciaram que maior escala produtiva e custos reduzidos de matérias-primas diminuem significativamente o custo de produção por kg de sofrorolipídeo, resultando em Net Present Value (NPV) positivo e Internal Rate of Return (IRR) acima de 50%. Em contrapartida, cenários com baixa escala ou matérias-primas mais caras apresentaram payback elevado, IRR inviável e NPV negativo.

4. CONCLUSÃO

Esses achados reforçam a relevância da otimização dos parâmetros operacionais e da busca por substratos alternativos mais baratos para viabilizar a produção industrial. A modelagem computacional, assim, se mostra uma ferramenta estratégica para avaliar cenários e orientar decisões de desenvolvimento tecnológico.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao IPT pelo suporte estrutural e pelo acesso à infraestrutura necessária para a realização das simulações e análises técnico-econômicas deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] MISAILIDIS, NIKIFOROS & PETRIDES, DEMETRI. Sophorolipids (Biosurfactants) Production via Fermentation – Process Modeling and Techno-Economic Assessment (TEA) using SuperPro Designer, **2020**.
- [2] SAJNA, K.V.; HÖFER, R.; SUKUMARAN, R.K.; White biotechnology in biosurfactants. Industrial Biorefineries & White Biotechnology. Amsterdam, Oxford, Waltham: **Elsevier**, 499–521, **2015**.
- [3] DIERICKX, S., CASTELEIN, M., REMMERY, J., DE CLERCQ, V., LODENS, S., BACCILE, N., SOETAERT, W. K. From bumblebee to bioeconomy: Recent developments and perspectives for sophorolipid biosynthesis. **Biotechnology Advances**, 107788, **2021**.



AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÃO EXPANSÍVEL TÉRREA ISOLADA

EH SUZUKI¹, MM RESENDE², PN YONAMINE²



¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Laboratório de Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Instalações Prediais (LCAP), Habitações e Edificações (HE)

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos (LTDC), Habitações e Edificações (HE)

E-mail para contato:
paulanaomi@ipt.br

RESUMO – A conformidade das habitações com os requisitos de desempenho é imprescindível para que apresentem um bom comportamento em uso. No caso do desempenho térmico, o método de avaliação por simulação computacional estabelece a comparação do modelo real com modelo de referência. Especificamente, para o sistema construtivo abordado neste trabalho, foi constatado o atendimento aos dois critérios mínimos de desempenho térmico da norma brasileira pertinente.

1. INTRODUÇÃO

As chuvas volumosas ocorridas em 2024 no Rio Grande do Sul resultaram em alagamentos e deslizamentos que deixaram desabrigadas famílias de diversos municípios gaúchos. Como consequência, houve grande interesse por parte de fabricantes de fornecer sistemas construtivos para utilização tanto como habitações permanentes quanto como abrigos transitórios. No entanto, independentemente do tempo de utilização previsto, a edificação deve estar em conformidade com a norma ABNT NBR 15575 [1] que estabelece os requisitos do usuário a serem atendidos e seus respectivos critérios e métodos de avaliação. Um dos aspectos a serem analisados é o desempenho térmico, que é o foco deste trabalho.

2. METODOLOGIA

O desempenho térmico da edificação foi avaliado por meio de simulação computacional, comparando um modelo real e um de referência, conforme as orientações descritas na norma ABNT NBR 15575 [1], de modo a verificar o atendimento ao critério mínimo. Foi utilizado o algoritmo de cálculo Conduction Transfer Function do software EnergyPlus, versão 24.1, que considera as condições transientes de trocas de calor.

2.1 Edificação Real e de Referência e Condições do Entorno

O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento térmico do sistema numa eventual implementação em cidades do Rio Grande do Sul após verificação de atendimento aos critérios de desempenho da ABNT NBR 15575 [1]. Como não havia um exemplar em local específico, foi adotada orientação norte para a porta externa e foi considerado terreno plano em área urbana sem obstruções que gerassem sombreamento sobre as edificações e interferência no escoamento dos ventos.

O modelo real tem paredes de painéis de chapas de aço de 0,3 mm e núcleo de EPS de 75 mm, cobertura de painéis de chapa de aço corrugada externa e lisa interna de 0,3 mm unidas por núcleo de EPS de 50 mm, piso da área central de chapas cimentícias de 18 mm e piso das áreas laterais de chapas de madeira compensada de 18 mm.

Na simulação da edificação de referência, altera-se apenas a composição de paredes, piso e cobertura, de modo que passam a ser compostos por elementos verticais e horizontais monolíticos de 10 cm de espessura. A cobertura, além da laje monolítica, apresenta, também, câmara de ar com resistência térmica de $0,21 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ e telha de 6 mm de espessura. As propriedades dos materiais, tanto do modelo real quanto do modelo de referência, são indicadas na Tabela 1. A planta corresponde à Figura 1b e a Figura 1a é uma perspectiva ilustrada dos cômodos da casa.

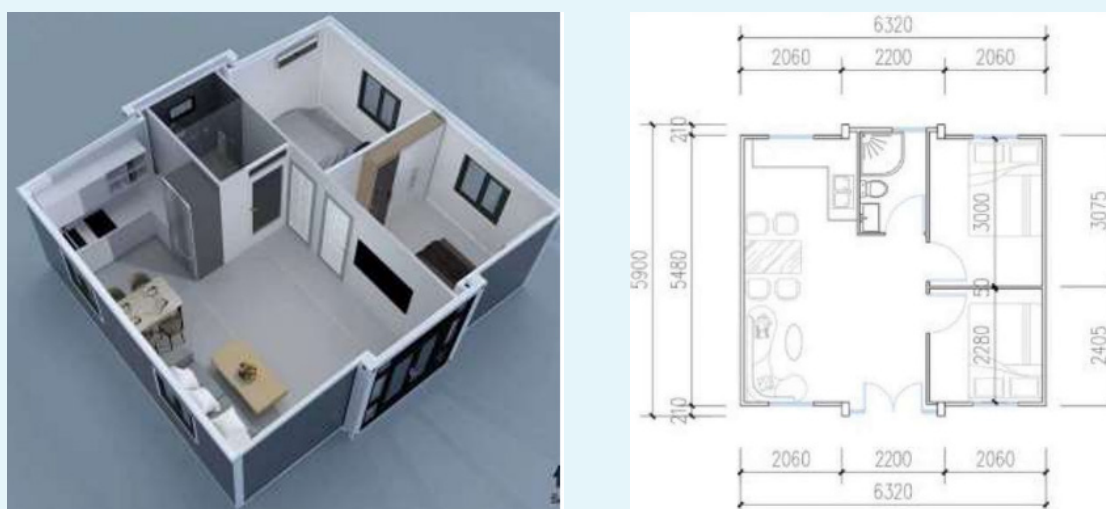


Figura 1: (a) Perspectiva ilustrada e (b) planta baixa, ambas sem escala.

Tabela 1: Características de materiais e de elementos dos modelos.

Material/ elemento	Condutividade térmica (W/(m·K))	Calor específico (kJ/(kg·K))	Absortância à radiação solar	Emissividade	Densidade (kg/m³)
Aço	52	0,46	0,6	0,9	7780
EPS	0,043	0,75	0,7	0,9	14
Madeira (compensado)	0,15	0,84	0,5	0,9	600
Placa cimentícia	1,05	0,84	0,58	0,9	1154
Parede externa	1,75	1000	0,58	0,9	2200
Parede interna	1,75	1000	0,3	0,9	2200
Laje de piso	1,75	1000	0,3	0,9	2200
Laje intermediária	1,75	1000	0,58	0,9	2200
Telha	0,65	840	0,65	0,9	1700

A ventilação e as cargas térmicas decorrentes de ocupação, iluminação e uso de demais equipamentos foram configuradas conforme o que é previsto pela norma ABNT NBR 15575 [1].

2.2 Arquivos Climáticos

As cidades contempladas nas análises são exemplares das Zonas Bioclimáticas Brasileiras 1 e 3 [2], respectivamente Bento Gonçalves e Porto Alegre, ambas no Rio Grande do Sul, estado onde se pretendia realizar a implantação do sistema. Foram adotados arquivos do tipo Typical Meteorological Year fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

2.3 Critérios de Atendimento ao Nível Mínimo

O atendimento ao nível mínimo de desempenho térmico engloba dois critérios de avaliação. O primeiro estabelece que a porcentagem média de horas durante o ano em que os ambientes de permanência prolongada da Unidade Habitacional (UH) em avaliação apresentam temperatura operativa dentro de determinadas faixas de valores, considerando somente os horários com ocupação, seja superior a 90% da porcentagem de horas obtida para a habitação do modelo de referência. Para as cidades abordadas, a faixa de temperatura operativa é de 18 a 26°C.

O segundo critério determina que a maior temperatura operativa máxima entre os ambientes de permanência prolongada do modelo real seja menor ou igual às obtidas para o ambiente correspondente no modelo de referência, considerando, neste caso, uma tolerância de 2°C. De forma semelhante, para o mesmo tipo de ambiente, a menor temperatura operativa mínima deve ser maior ou igual às obtidas no modelo de referência para o ambiente correspondente. Nesta ocasião, considera-se tolerância de 1°C.

3. RESULTADOS

A partir dos modelos computacionais, foi possível extrair a temperatura operativa horária dos ambientes de interesse e obter a máxima ($Tomáx_{APP}$) e a mínima ($Tomín_{APP}$). Em seguida, foram calculadas as porcentagens de horas no ambiente ocupado dentro da faixa de temperaturas operativas de 18 a 26°C ($PHFT_{APP}$). Ambos os resultados são apresentados na Tabela 2, para o modelo de referência (Ref.) e para o modelo real.

Tabela 2: Resultados dos modelos real e de referência.

Resultado	Zona 1			Zona 3		
	Dormitório 1	Dormitório 2	Sala	Dormitório 1	Dormitório 2	Sala
Real – $PHFT_{APP}$ (%)	67	66	67	76	76	60
Ref. – $PHFT_{APP}$ (%)	62	60	52	58	58	51
Real – $Tomáx_{APP}$ (°C)	26,6	26,5	32,3	31,0	30,9	36,2
Ref. – $Tomáx_{APP}$ (°C)	29,2	29,3	31,8	33,4	33,3	36,5
Real – $Tomín_{APP}$ (°C)	12,3	12,2	13,8	13,8	13,8	16,4
Ref. – $Tomín_{APP}$ (°C)	9,9	9,9	10,6	12,4	12,4	15,0

Para verificar se há atendimento aos critérios descritos na seção 2.3, foram calculadas as porcentagens de horas de conforto adotada para as edificações como um todo ($PHFT_{UH}$) pela média das porcentagens obtidas nos ambientes de permanência prolongada. Também foram determinadas as temperaturas operativas máximas ($Tomáx_{UH}$) e mínimas ($Tomín_{UH}$) das edificações, correspondentes aos maiores e menores valores entre todos os ambientes analisados. A Tabela 3 apresenta esses resultados e permite comparar o modelo real com o de referência, considerando, inclusive, as tolerâncias admitidas nos critérios da norma, associadas às grandezas indicadas por "limite".

Tabela 3: Valores dos modelos real e de referência para análise do atendimento aos critérios de desempenho térmico.

Resultado	Zona 1	Zona 3
Real - $PHFT_{UH}$ (%)	67	71
Ref. - $PHFT_{UH}$ (%)	58	56
Ref. - $PHFT_{UH}$ (%) limite	52	50
Real - $Tomáx_{UH}$ (°C)	32,3	36,2
Ref. - $Tomáx_{UH}$ (°C)	31,8	36,5
Ref. - $Tomáx_{UH}$ (°C) limite	33,8	38,5
Real - $Tomín_{UH}$ (°C)	12,2	13,8
Ref. - $Tomín_{UH}$ (°C)	9,9	12,4
Ref. - $Tomín_{UH}$ (°C) limite	8,9	11,4

4. CONCLUSÃO

A habitação avaliada atende aos critérios mínimos de desempenho térmico previstos na norma ABNT NBR 15575 [1] para as Zonas Bioclimáticas brasileiras 1 e 3 [2].

5. REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 15575. Edifícios Habitacionais – Desempenho: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 15220-3. Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO MECÂNICO DE UM PÉ PROTÉTICO EM COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO

M. L. C. MOREIRA¹, P. L. RAGUENEAU¹, J. P. F. DO PRADO¹,
M. H. BATALHA¹, J.P. NASCIMENTO¹, A. GUIMARÃES¹



¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Laboratório de Estruturas Leves (LEL)

E-mail para contato:
marialcm@ipt.br

RESUMO – Este trabalho apresenta uma análise numérica de um pé protético, em material compósito, avaliado conforme a norma ISO 10328:2016, sob carregamentos de classe P5 aplicados separadamente no antepé e calcanhar. O estudo, ainda em fase preliminar, identificou regiões críticas e avaliou alternativas de modificação geométrica. Como resultado, o modelo V2 apresentou redução de 72% nas tensões máximas, indicando ganhos relevantes em desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: simulação numérica; pé protético; compósito; ISO 10328;

1. INTRODUÇÃO

As amputações de membros inferiores representam um desafio significativo para a mobilidade e qualidade de vida dos indivíduos afetados, sendo causadas principalmente por diabetes, acidentes e problemas vasculares. No Brasil, a incidência varia significativamente entre as regiões, chegando em taxas de 27,15 casos por 100.000 habitantes [1], reforçando a necessidade de soluções protéticas acessíveis, seguras e eficientes.

Próteses de pé têm como objetivo restaurar a função do tornozelo e do pé, replicando a biomecânica humana e permitindo a realização de atividades diárias de forma estável e confortável. Neste contexto, a escolha de um modelo adequado depende de fatores como nível de amputação, peso, idade, ocupação e nível de atividade do usuário [2].

Simulações numéricas têm se mostrado ferramentas essenciais no desenvolvimento de próteses modernas, permitindo avaliar com precisão seu desempenho estrutural e mecânico. Estudos internacionais exploram ajustes geométricos [3], [4], materiais avançados e dispositivos ativos [5] para melhorar a marcha e adaptação do usuário. No contexto nacional, pesquisas recentes destacam a utilização de compósitos e manufatura aditiva como alternativas para aumentar o desempenho [6].

Neste cenário, o presente estudo realiza uma análise numérica de um pé protético, avaliando seu comportamento mecânico sob o carregamento P5, prescrito pela ISO 10328 [7] aplicados separadamente no antepé e calcanhar. Os resultados apresentados correspondem a uma etapa intermediária do projeto, ainda em curso, destinada à avaliação

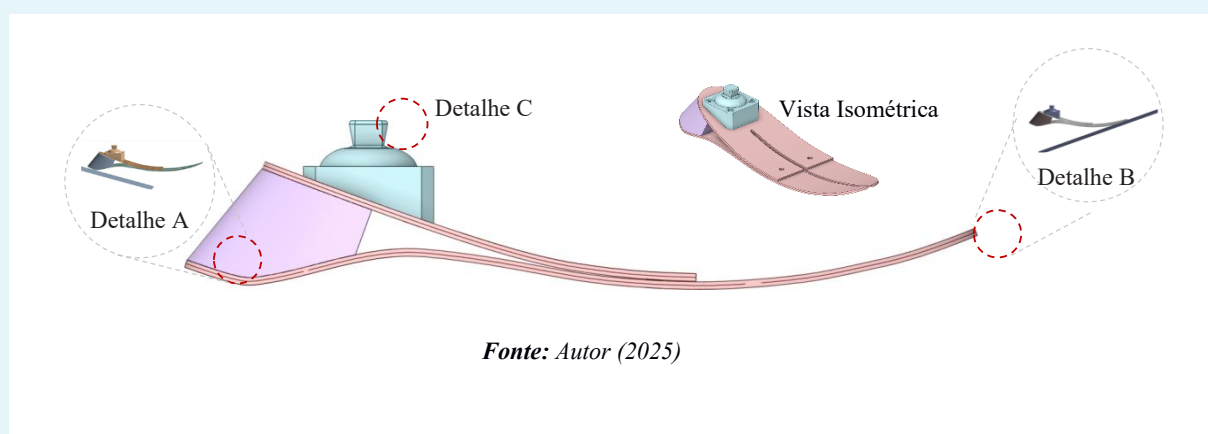
do modelo e geometria inicial, visando o desenvolvimento futuro de um produto seguro, eficiente e de custo competitivo.

2. METODOLOGIA

O método dos elementos finitos (MEF) foi escolhido para conduzir as simulações numéricas realizadas no software *Ansys Mechanical* e *ACP Ansys Composite Prepost*. Para o presente estudo, foi proposta uma geometria inicial com o objetivo de realizar uma avaliação preliminar. Com base nos resultados obtidos, eventuais modificações foram implementadas, buscando corrigir os pontos de melhoria identificados.

A geometria inicialmente analisada é composta por duas chapas de material compósito de fibra de carbono (*woven*), com 2,5 mm de espessura (10 camadas), uma pirâmide em aço e um amortecedor em poliestireno expandido (Figura 1). A conexão entre pirâmide e chapa, assim como entre as chapas, foi realizada por meio de seis parafusos M5, modelados como elementos do tipo beam deformável.

As condições de contorno foram definidas conforme a norma ISO 10328 [7], que estabelece ângulos de inclinação para a aplicação da carga: 15° no calcanhar e 20° no antepé. Para atender a esse requisito, foram modeladas chapas auxiliares de aço ($t = 5 \text{ mm}$) no calcanhar ou no antepé, restrita em cinco graus de liberdade (Detalhes A e B – Figura 1). Sobre essa superfície, aplicou-se gradualmente uma carga de 2240 N, correspondente à classe P5, em direção normal ao plano. Por fim, no topo da pirâmide, os seis graus de liberdade foram restringidos (Detalhe C – Figura 1).



Fonte: Autor (2025)

Figura 1: Detalhes relativos ao Modelo V1 desenvolvido para avaliação mecânica do pé protético.

Fonte: Autor (2025)

Para a malha, foram utilizados elementos quadráticos do tipo shell e solid, com refinamento local nas regiões críticas. O refinamento foi definido a partir de um estudo paramétrico de convergência, resultando em um total de 2304 e 902 configurações analisadas para as placas e o amortecedor, respectivamente.

Quanto aos contatos, foi adotada a formulação por penalidade (*penalty formulation*) para favorecer a convergência dos cálculos. Os contatos entre os diferentes componentes foram definidos da seguinte forma:

- *Amortecedor – Chapas de compósito*: contato colado (*bonded*), com restrição dos graus de liberdade dos nós e elementos entre as duas superfícies em contato.
- *Chapa – Placa auxiliar*: contato sem atrito (*frictionless*).

- *Pirâmide – Chapa; Chapa – Chapa*: contato com atrito (frictional), modelado conforme a lei de Coulomb (Equação 1).

$$F = \mu \cdot N \quad (1)$$

–F é a força de atrito (paralela à superfície)
 –N é a força normal
 – μ é o coeficiente de atrito

3. RESULTADOS PARCIAIS

No que tange aos resultados, as simulações realizadas apontaram para uma condição mais desfavorável à estrutura quando a carga foi aplicada no antepé. A partir da análise das tensões, deformações e deslocamentos (Figura 2), foram identificadas regiões críticas, que motivaram o desenvolvimento de um Modelo V2, com o objetivo de obter uma configuração de melhor desempenho mecânico. As chapas superior e inferior registraram tensões de elevada magnitude (1997,2 MPa e 549,6 MPa – Figura 2b e 2c), sendo a evolução dessas tensões, em função do carregamento aplicado apresentada na Figura 2d.

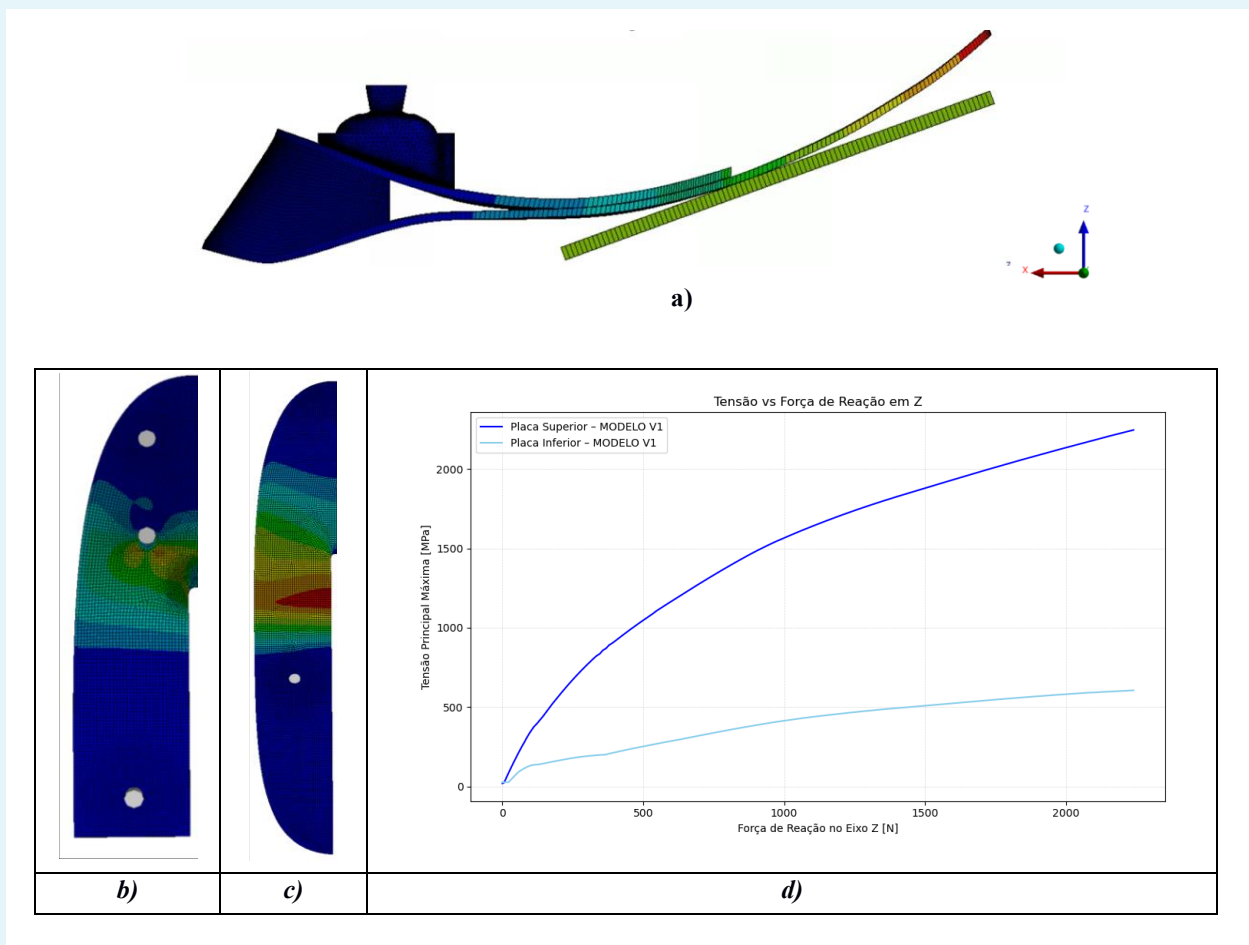


Figura 2: Resultados obtidos para o modelo V1 **a)** Deslocamento direcional máxima em z ($\Delta U_{z,max} = 76 \text{ mm}$ – Chapa inferior); **b)** Tensão principal máxima na Chapa Superior (simetria no plano XZ); **c)** Tensão principal máxima na Chapa Inferior (simetria no plano XZ); **d)** Tensão principal máxima, em função do carregamento aplicado.

Fonte: Autor (2025)

Assim, tendo em vista os resultados obtidos, foram levantadas potenciais mudanças geométricas que norteariam a elaboração do Modelo V2, conforme descrito abaixo:

Mudança geométrica da pirâmide. O componente foi redesenhado com o objetivo de reduzir a concentração de tensões observada na chapa em material compósito. Adicionalmente, a região de fixação foi modificada, adotando-se um menor número de parafusos a fim de evitar interferências com o amortecedor. Por fim, implementou-se o prolongamento da peça, visando à redução das tensões atuantes mediante o carregamento na região do calcanhar (Detalhe A – Figura 3).

Mudança na geometria do amortecedor. O amortecedor teve sua geometria modificada, buscando um distanciamento da fenda da chapa inferior, evitando a deformação excessiva dos elementos (Detalhe B).

Mudança na geometria da chapa. Em virtude da modificação do amortecedor, foi realizada uma alteração na extensão das fendas, para melhor alocação do componente. Por fim, foi constatada a necessidade do aumento da espessura das chapas, visando a integridade mecânica. A chapa superior, mais solicitada, passou a ter 6 mm, e a inferior, 4mm (Detalhe C).

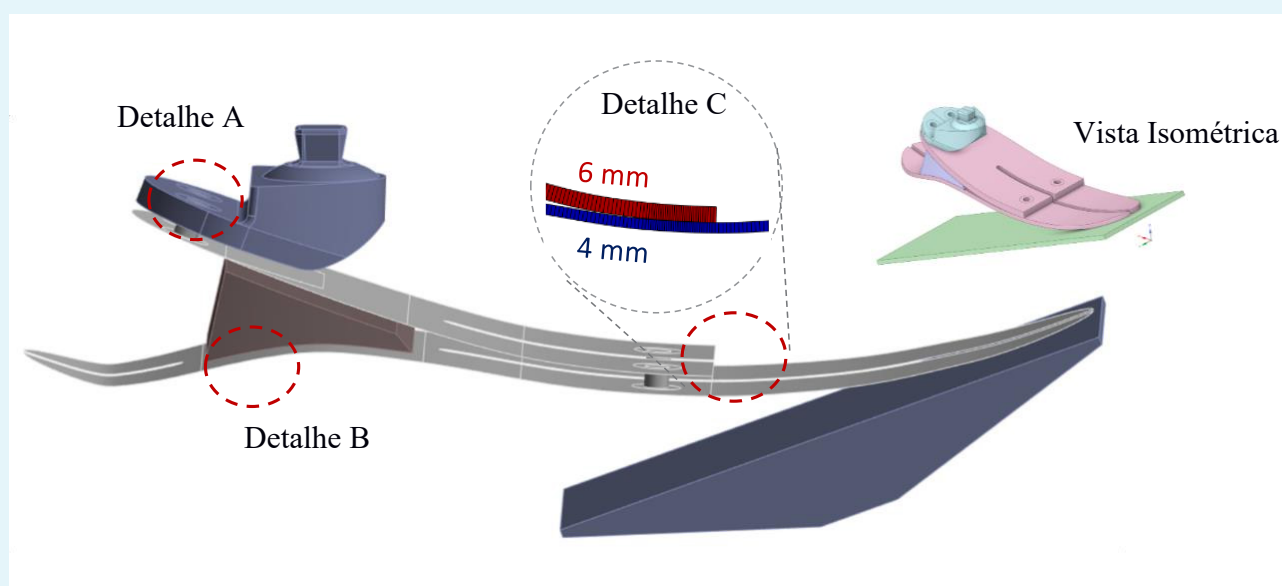


Figura 3: Detalhes relativos ao Modelo V2 desenvolvido para avaliação mecânica do pé protético.

Fonte: Autor (2025)

As mesmas condições de contorno foram aplicadas ao Modelo V2, com o objetivo de avaliar o impacto das modificações geométricas no desempenho mecânico. Em comparação com o Modelo V1, constatou-se uma redução de 72% na tensão registrada na chapa superior (Figura 4d), anteriormente causada pela concentração de tensões na região de contato com a pirâmide. Tal redução demonstra o efeito positivo das alterações realizadas.

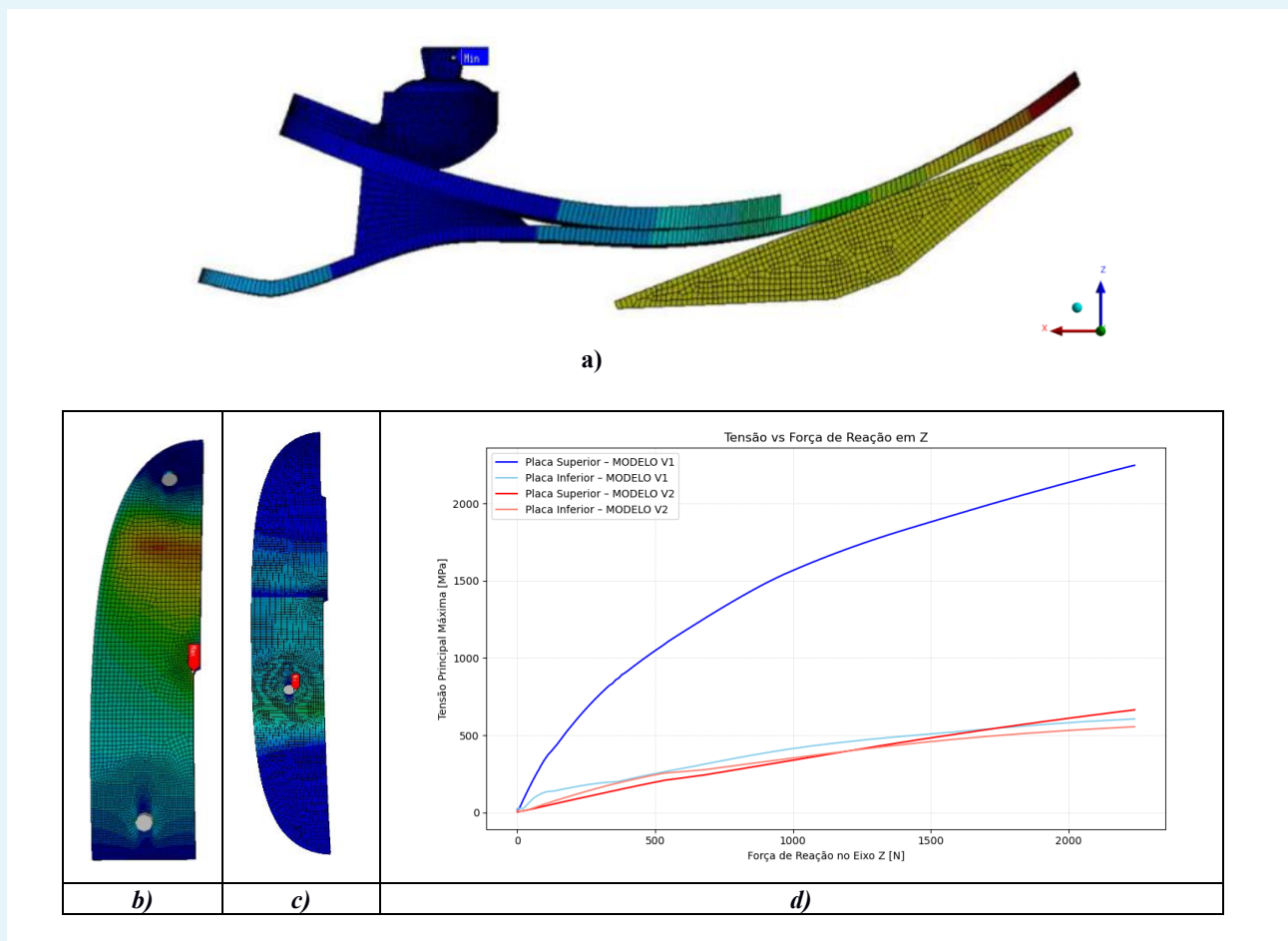


Figura 4: Resultados obtidos para o modelo V2 **a)** Deslocamento direcional máximo em z ($\Delta U_{z,max} = 40 \text{ mm}$ -Chapa inferior); **b)** Tensão principal máxima na Chapa Superior (simetria no plano XZ); **c)** Tensão principal máxima na Chapa Inferior (simetria no plano XZ); **d)** Comparação da tensão principal máxima em função do carregamento aplicado, para os Modelos V1 e V2.

Fonte: Autor (2025)

4. CONCLUSÃO

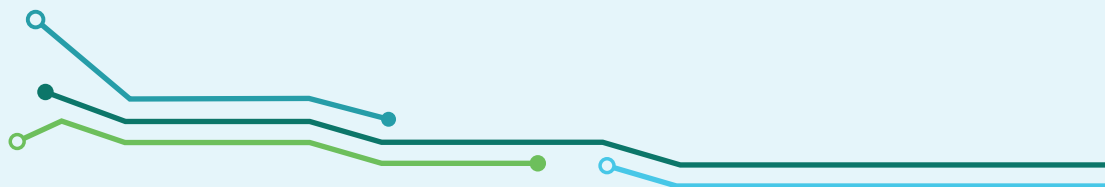
Os resultados obtidos indicam que a metodologia proposta foi eficaz para avaliar o desempenho mecânico do pé protético frente ao carregamento estabelecido pela norma ISO 10328. Nesta fase preliminar do projeto, foi realizada a avaliação do modelo numérico e da geometria proposta, permitindo identificar pontos de melhoria. A análise comparativa mostrou que o modelo V2 apresentou redução de 72% nas tensões máximas em relação ao modelo inicial, destacando o potencial da abordagem adotada. Assim, o estudo contribui para o desenvolvimento de uma solução segura, funcional e potencialmente viável em termos de custo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro concedido no âmbito do projeto nº 01.24.0142.00.

6. REFERÊNCIAS

- [1] CONFORPES, "Principais causas da amputação". Acessado: 28 de agosto de 2025. [Online]. Disponível em: blog.confordes.com.br/dr-responde/principais-causas-da-amputacao
- [2] K. K. Resan, E. A. Abbod, e T. K. Al-Hamdi, "Prosthetic feet: A systematic review of types, design, and characteristics", em *AIP Conference Proceedings*, 2023, p. 60005.
- [3] A. R. N. Al Thahabi, L. M. Martulli, A. Sorrentino, M. Lavorgna, E. Gruppioni, e A. Bernasconi, "Stiffness-driven design and optimization of a 3D-printed composite prosthetic foot: A beam finite Element-Based framework", *Compos Struct*, vol. 337, p. 118053, jun. 2024, doi: 10.1016/j.compstruct.2024.118053.
- [4] H.-J. Um, H.-S. Kim, W. Hong, H.-S. Kim, e P. Hur, "Design of 3D printable prosthetic foot to implement nonlinear stiffness behavior of human toe joint based on finite element analysis", *Sci Rep*, vol. 11, nº 1, p. 19780, out. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-98839-3.
- [5] A. R. N. Al Thahabi, L. M. Martulli, A. Sorrentino, M. Lavorgna, E. Gruppioni, e A. Bernasconi, "Stiffness-driven design and optimization of a 3D-printed composite prosthetic foot: A beam finite Element-Based framework", *Compos Struct*, vol. 337, p. 118053, jun. 2024, doi: 10.1016/j.compstruct.2024.118053.
- [6] F. E. R. Silva, A. C. Ancelotti, e G. F. Gomes, "Advancing Lower Limb Prosthetics: Custom Design, Simulation, and Experimental Evaluation", *Applied Composite Materials*, vol. 32, nº 2, p. 543–573, abr. 2025, doi: 10.1007/s10443-024-10271-8.
- [7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *ISO 10328:2016 — Prosthetics — Structural testing of lower-limb prostheses — Requirements and test methods*. Geneva, 2016.



AVANÇOS EM IA NO MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE E A LACUNA DA VULNERABILIDADE SOCIAL

J.S.C. SILVA^{1,2,3}, K.S. LIMA^{3,4}, C. P. CAVALHIERI², C. D. VIANA³



¹ Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental

³ Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências

⁴ REGEA – Geologia, Engenharia e Estudos Ambientais

E-mail para contato:
julianacs@ipt.br

RESUMO – Este trabalho teve como objetivo apresentar e discutir metodologias recentes aplicadas ao mapeamento de áreas suscetíveis a processos de movimento de massa, com foco na integração da vulnerabilidade ao fluxo de trabalho. A metodologia empregada baseou-se em uma revisão bibliográfica e comparativa de quatro estudos publicados entre 2021 e 2025 em periódicos internacionais, que utilizam métodos de machine learning e deep learning para análise de suscetibilidade. Os principais resultados qualitativos e quantitativos indicam que a aplicação de algoritmos clássicos como Floresta Aleatória, Máquina de Vetor de Suporte e Árvore de Decisão, bem como modelos avançados como Rede Neural Convolucional e Memória de Longo e Curto Prazo, tem aumentado a precisão no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos. Observou-se que os melhores resultados são obtidos quando os algoritmos são usados de forma integrada a dados geoespaciais e a conjuntos de algoritmos, superando o desempenho de modelos isolados. No entanto, a análise revelou uma lacuna significativa: a ausência de dados de entrada de vulnerabilidade física e social nos trabalhos estudados, o que limita a utilidade desses produtos para uma gestão territorial e prevenção de desastres mais completa e eficaz, uma vez que a suscetibilidade é apenas uma parte do risco geológico.

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento de áreas de risco geológico é uma ferramenta essencial para a gestão territorial e a prevenção de desastres. No Brasil, as mudanças climáticas somadas à ocupação de encostas ampliam a vulnerabilidade socioambiental, um dos fatores essenciais quando se trata da análise de riscos. A metodologia tradicional, baseada em observações empíricas e modelos geotécnicos simplificados, mostra limitações para lidar com múltiplas variáveis e suas interações. Nesse contexto, técnicas de modelagem computacional, como *machine learning* (ML) e *deep learning* (DL), têm aumentado a precisão dos produtos cartográficos ao permitir simulações mais robustas. Apesar do avanço, a maioria dos estudos permanece restrita à suscetibilidade (ou seja, a análises de probabilidade de ocorrência de deslizamento), sem integrar a vulnerabilidade social e física (isto é, a magnitude de danos potenciais), essencial para avaliar o risco. Este trabalho busca apresentar as potencialidades de

metodologias recentes de mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa, destacando a necessidade de incorporar a vulnerabilidade ao processo de modelagem, para que se chegue ao mapeamento de risco.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se em revisão bibliográfica e comparativa de quatro estudos publicados entre 2021 e 2025 em periódicos internacionais, sendo eles: *Expert Systems With Applications*; *Geoscience Frontiers*; *Land* e *Natural Hazards* (Springer Nature). Os trabalhos selecionados (Wen *et al.*, 2025; Guo *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024; e Alcântara *et al.*, 2024) apresentam diferentes técnicas na análise de suscetibilidade em cenários diversos quanto aos contextos geológicos e climáticos, sendo que todas estão baseadas em métodos de *machine learning* e *deep learning*.

Para a análise dos trabalhos, foram observados os dados de entrada escolhidos por cada autor, como inventários de escorregamento, declividade, litologia, cobertura e uso do solo. Além disso, foram levantados os algoritmos utilizados, que variam de algoritmos clássicos de ML a modelos avançados de DL.

A comparação entre os trabalhos foi possível por meio dos métodos de validação, ou seja, como os modelos foram testados (ex: AUC) e como os resultados foram organizados nos produtos finais, os mapas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O recorte do estudo demonstrou que os autores fazem uso de algoritmos clássicos de *machine learning* como Floresta Aleatória (*Random Forest – RF*), Máquina de Vetor de Suporte (*Support Vector Machine – SVM*) e Árvore de Decisão (*Decision Tree – DT*) até modelos avançados de *deep learning* como Rede Neural Convolucional (*Convolutional Neural Network – CNN*) e Memória de Longo e Curto Prazo (*Long Short-Term Memory – LSTM*).

Embora os trabalhos analisados explorem contextos geológicos e climáticos distintos, fica evidente que há uma intensa busca pela utilização de modelos computacionais na esfera do mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa. Alcântara *et al.* (2024) exploram o cenário pós-desastre, ocorrido no município de São Sebastião no ano de 2023, com um inventário de 750 cicatrizes e imagens de alta resolução espacial associado a dados de entrada do meio físico. Os autores utilizaram diversos algoritmos como RF, SVM, *Gradient Boosting*, além de Redes Neurais Artificiais. O *Gradient Boosting* destacou-se, alcançando AUC-ROC de 0,963 e acurácia próxima de 100%, o RF também apresentou desempenho robusto. O estudo evidencia que áreas de floresta apresentaram baixa suscetibilidade, ao passo que pastagens dominaram as classes de maior risco.

Wen *et al.* (2025) alcançam AUC superior a 0,90 e destacam que a precipitação ocorrida sete dias antecedentes ao evento de escorregamento foi um fator-chave na deflagração de movimentos de massa na área analisada. Essa análise foi realizada a partir do modelo *CatBoost* que é um conjunto de DT associado a interpretação da contribuição de cada variável. Já Guo *et al.*, (2021) combinaram a árvore de decisão C5.0 com o algoritmo *K-means* para definir automaticamente classes de suscetibilidade, resultando em maior objetividade cartográfica e desempenho consistente (AUC = 0,88), reduzindo falsos positivos em áreas estáveis.

Zhang *et al.*, (2024), mostram que a combinação de diversos algoritmos associados a dados de sensoriamento remoto multissensorial pode ser mais eficaz do que modelos isolados. Nesse caso, os autores utilizaram um ensemble por votação, em que os resultados de diferentes classificadores (RF, BRT, SVM e ANN) foram integrados em um único modelo final. Essa estratégia permitiu reduzir erros específicos de cada técnica, de modo que, enquanto o *Random Forest* individual obteve AUC de 0,909, o modelo acoplado superou esse desempenho, alcançando 0,923.

A partir da análise dos artigos selecionados, é possível interpretar que, de modo geral, os estudos utilizam diferentes técnicas para avaliar a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos. A metodologia dos autores demonstra que os melhores resultados são obtidos quando os algoritmos são usados de forma integrada a dados geoespaciais e a conjuntos de algoritmos, pois a análise dos dados a partir de um único algoritmo não atinge taxas de acerto tão altas quanto suas combinações.

Apesar da ampla aplicação de técnicas de modelagem computacional para a avaliação da probabilidade de ocorrência de eventos de movimentos de massa, não encontramos nos trabalhos analisados nenhum dado de entrada de vulnerabilidade social. Os estudos sobre o uso de *machine learning* e *deep learning* no mapeamento de áreas suscetíveis a esses eventos têm avançado significativamente, mas ainda apresentam uma limitação central: a falta de integração de dados sobre vulnerabilidade social. Embora os modelos computacionais utilizem variáveis ambientais detalhadas, eles negligenciam a dimensão humana do risco, o que reduz sua utilidade direta para a gestão territorial e prevenção de desastres. Assim, pesquisas futuras devem incorporar informações socioeconômicas e de saúde pública para gerar mapas verdadeiramente de risco, que sejam mais completos, e capazes de apoiar políticas públicas, alocação de recursos e estratégias de mitigação que considerem não apenas a suscetibilidade, mas também a vulnerabilidade das comunidades afetadas.

4. CONCLUSÃO

Os trabalhos analisados mostram que o uso de *machine learning* e *deep learning* tem aumentado a precisão no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos. O uso de modelos híbridos, a combinação de diferentes algoritmos e a aplicação de validações mais rigorosas vêm resultando em mapas mais consistentes e confiáveis, representando um avanço importante em relação às metodologias tradicionais.

Embora sejam claros os avanços, como já apontado por Guzzetti *et al.* (2006) e reforçado por Fell *et al.* (2008), a suscetibilidade é apenas uma parte do risco. A ausência de variáveis ligadas à vulnerabilidade social e física reduz a utilidade desses produtos para finalidades como gestão territorial e prevenção de desastres, já que a gestão de risco exige não só saber onde a área é instável, mas, também, ter como fator de análise as condições da população ali residente.

5. REFERÊNCIAS

- [1] WEN H, YAN F, HUANG J, LI Y, Interpretable machine learning models and decision-making mechanisms for landslide hazard assessment under different rainfall conditions. *Expert Syst. Appl.*, v. 270, p. 126582, 2025. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.126582
- [2] GUO Z, SHI Y, HUANG F, FAN X, HUANG J, Landslide susceptibility zonation method based on C5.0 decision tree and K-means cluster algorithms to improve the efficiency of risk management. *Geosci. Front.*, v. 12, p. 101249, 2021. DOI: 10.1016/j.gsf.2021.101249
- [3] ZHANG S, TAN S, SUN Y, DING D, YANG W, Risk mapping of geological hazards in plateau mountainous areas based on multisource remote sensing data extraction and machine learning (Fuyuan, China). *Land*, v. 13, p. 1361, 2024. DOI: 10.3390/land13091361.
- [4] ALCÂNTARA E, BAIÃO CF, GUIMARÃES YC, MANTOVANI JR, MARENGO JA, Machine learning approaches for mapping and predicting landslide-prone areas in São Sebastião (Southeast Brazil). *Nat. Hazards Res.*, 2024. DOI: 10.1016/j.nhres.2024.10.003.
- [5] GUZZETTI F, REICHENBACH P, ARDIZZONE F, CARDINALI M, GALLI M, Landslide hazard assessment, vulnerability estimation and risk evaluation: an example from the Collazzone area (Central Umbria, Italy). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, v. 32, p. 183–192, 2009.
- [6] FELL R, COROMINAS J, BONNARD C, CASCINI L, LEROI E, SAVAGE W Z, Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng. Geol.*, v. 102, n. 3–4, p. 85–98, 2008. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.03.022.

CONSTRUÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS SUPERVISIONADOS PARA O ESTUDO DE TEMPERABILIDADE DO FERRO FUNDIDO BRANCO DE ALTO CROMO

L. G. MANZUTTI^{1,2}, L. R. DANNINGER²,
F. M. S. B. CARVALHO², A. P. V. BRAGA²



¹Instituto de Física da Universidade de São Paulo, IFUSP

²Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT

E-mail para contato: luisa.manzutti@usp.br

RESUMO – O ferro fundido branco de alto teor de cromo possui diversas aplicações industriais que exigem uma boa combinação de propriedades relacionadas à resistência à abrasão e à resistência ao impacto. Seu desempenho pode ser aperfeiçoado pelo desenvolvimento de uma matriz martensítica, obtida através do tratamento térmico de têmpera, realizado sob uma determinada taxa de resfriamento. O presente estudo apoiou-se em ferramentas de aprendizado de máquina e em inteligência artificial para a obtenção dessa taxa.

1. INTRODUÇÃO

O ferro fundido branco de alto cromo é uma liga baseada no sistema Fe-C-Cr e que contém outros elementos metálicos adicionados à sua composição, como o molibdênio (Mo), manganês (Mn), cobre (Cu) e níquel (Ni). Esses elementos substitucionais são responsáveis pela modificação das características físicas do material e da cinética das transformações de fase, tal como a temperabilidade [1].

A temperabilidade relaciona-se com a facilidade do material temperar, ou seja, formar martensita a partir da decomposição da austenita no resfriamento. Neste trabalho, está associada à capacidade do material de evitar transformações de origem difusional, tal como ferrita e perlita, mesmo sob taxas de resfriamento relativamente lentas.

Devido à sua elevada dureza, a martensita é responsável por garantir uma maior resistência ao desgaste e, por esse motivo, é a microestrutura alvo para diversas aplicações do ferro fundido branco de alto cromo, como em britadores de minério, rolos de laminação, revestimento de bolas de moinhos e equipamentos de pulverização, por exemplo [2].

Para atingir tal microestrutura, é necessário estabelecer a taxa de resfriamento crítica que evite a decomposição da austenita em ferrita e em perlita. Diversos estudos foram realizados – avaliando diferentes parâmetros do tratamento térmico, tal como composição química e temperatura de austenitização – a fim de estabelecer relações matemáticas que generalizassem a obtenção dessa taxa [3, 4, 5].

Entretanto, essas equações criadas empiricamente relacionam-se apenas à composição geral de ligas específicas, sem possibilidade de extrapolação e sem o uso da composição química da matriz.

Sabe-se que a maior fração do teor de carbono e cromo (entre outros elementos) está precipitada no material, ou seja, não constitui a austenita e, conseqüentemente, não afeta a sua decomposição diretamente. Por esse motivo, nesse estudo, priorizou-se a composição química da matriz.

A fim de minimizar o gasto de recursos, a quantidade de elementos usados e otimizar a criação de novas ligas, o presente trabalho apoiou-se em ferramentas de aprendizado de máquina e em inteligência artificial para obter a taxa de resfriamento crítica necessária para o desenvolvimento de uma microestrutura martensítica, a partir da composição química da matriz.

2. METODOLOGIA

2.1 Criação do *Dataset*

Para a criação da base de dados do modelo preditivo, foram produzidas, em laboratório, ligas não comerciais com diferentes teores dos seguintes elementos: carbono (C), cromo (Cr), silício (Si), molibdênio (Mo), manganês (Mn), cobre (Cu) e níquel (Ni).

Os corpos de prova retirados das ligas foram submetidos a um ciclo térmico composto por um aquecimento, seguido por uma estabilização de 30 minutos na temperatura de austenitização e posterior resfriamento a uma taxa específica. Como a transformação de fase é caracterizada pelas inflexões de um dilatograma, preocupou-se com a derivada das curvas. Se essa inflexão não fosse observada, outro corpo de prova era submetido a outra taxa até que a crítica fosse obtida.

Após a análise por dilatometria, os corpos de prova foram analisados por metalografia para a verificação da composição química da austenita. Isso foi feito, pois, inicialmente, tem-se apenas a composição química da liga e, a partir dela, o software *Thermo-Calc* [6] realiza as operações matemáticas necessárias para determinar a composição da matriz. Logo, queria-se avaliar se a porcentagem dos elementos da austenita estava de acordo com o esperado.

Além do método experimental para compor o *dataset*, também foram considerados dois atlas: "*Transformation characteristics of Cr and Cr-Mo white irons*" [7], produzido pela empresa Climax Molybdenum, e "*Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels*" [8], produzido pela ASM International.

Esses atlas contêm diagramas do tipo CCT (*Continuous Cooling Transformation*), que apresentam curvas de resfriamento contínuo e indicam qual microconstituente será formado, a partir da austenitização do material, em função da taxa de resfriamento. Fazendo uma divisão simples a partir dos valores visualizados do intervalo de temperatura e de tempo, podemos obter a taxa crítica, em °C/min.

2.2 Aplicação dos Modelos

Neste estudo, foram desenvolvidos 4 modelos – explicados de forma reduzida na Figura 1 – de complexidades incrementais, para os 79 dados. Todos foram criados com base em 11 algoritmos de aprendizado supervisionado: *K-Nearest Neighbors*; *Linear Regressor*; *Ridge*; *Lasso*; *Support Vector Regressor*; *Linear Support Vector Regression*; *Decision Tree*; *Random Forest*; *Gradient Boosting Regressor*; e *Neural Networks* – disponíveis na biblioteca "*Scikit-Learn*" [9] – e *Light Gradient Boosting Machine*, que possui uma biblioteca própria para sua implementação [10].

O *dataset* foi dividido em conjunto de teste, com 25% das amostras, para avaliação, e em conjunto de treino, com 85% das amostras. Cada algoritmo foi treinado e fez previsões sobre o conjunto de teste, tendo sua performance avaliada pelo coeficiente de determinação, ou R^2 .

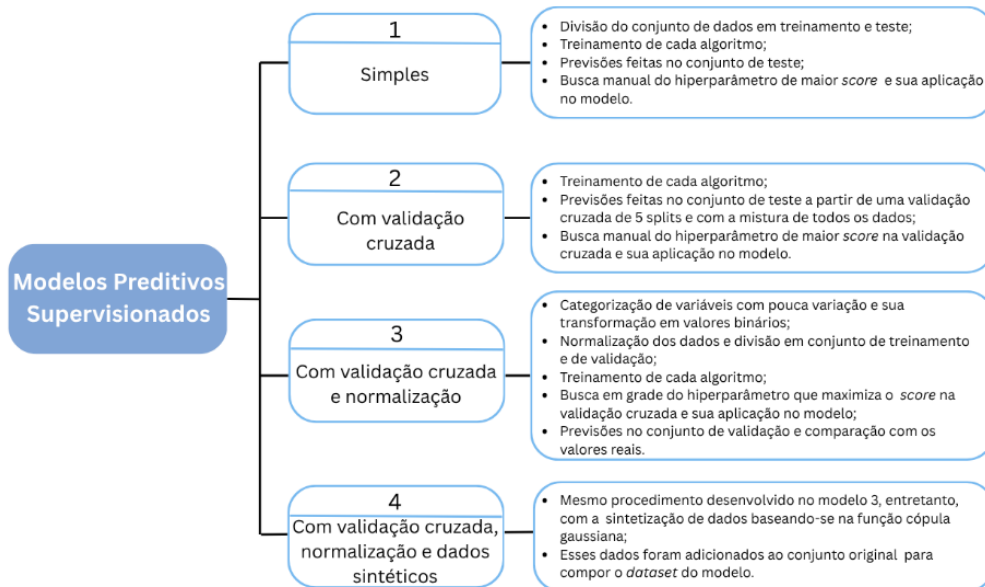


Figura 1: Mapa conceitual das variações de modelos utilizadas.

Esse coeficiente indica a quantidade da variância dos dados que é explicada por um algoritmo e varia entre 0 e 1. $R^2 = 1$ representa um ajuste perfeito, ou seja, o algoritmo foi capaz de fazer previsões equivalentes aos dados reais, mas $R^2 = 0$ revela que o algoritmo não foi capaz de aprender nenhuma relação entre os dados e tem nenhuma explicabilidade.

O modelo 1 foi o mais simples dentre os quatro: não utiliza nenhuma estratégia para a melhora de performance e aplica os algoritmos diretamente. Já o modelo 2, contém apenas uma dessas estratégias, a validação cruzada, que avalia a capacidade de generalização dos algoritmos. A partir desse modelo, aplicou-se uma “busca em grade (*GridSearch*)” pelos melhores hiperparâmetros para cada algoritmo, a fim de aumentar o *score*.

O conjunto de dados, em sua totalidade, foi dividido em 5 subconjuntos, chamados de “*folds*”. Num primeiro momento, um dos *folds* é designado aleatoriamente para constituir o conjunto de teste e o restante, o de treinamento. Então, o algoritmo é treinado e faz as previsões sobre o *fold* de teste. Esse processo é repetido de acordo com os “*k-folds*” escolhidos e o *score* final é uma média dos *scores* das *k*-iterações. Um esquema deste processo pode ser visto na Figura 2.

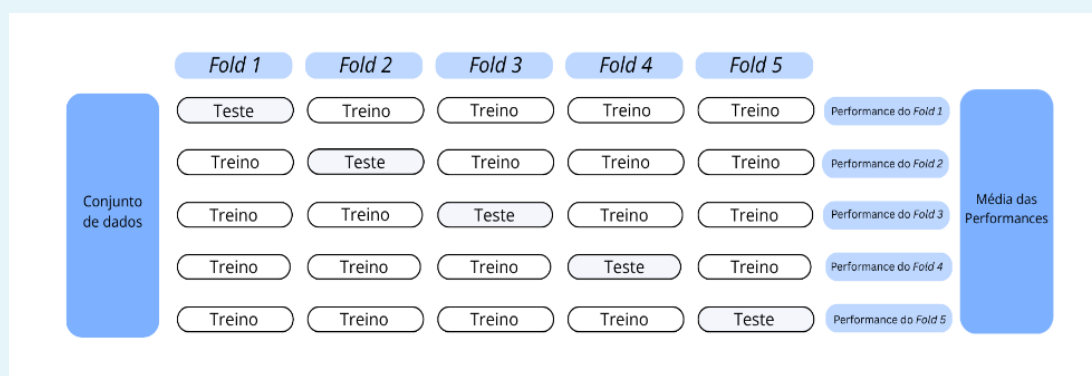


Figura 2: Esquema representativo da validação cruzada, 5 folds.

Além da validação cruzada, o modelo 3 realiza uma técnica de pré-processamento: como há uma grande variação nos valores da taxa crítica de resfriamento, normalizaram-se os dados. Já o modelo 4 é o mais complexo e conta com a validação cruzada, com a normalização e com o acréscimo de dados sintéticos ao *dataset*, por meio da biblioteca “*Synthetic Data Vault*” [11].

Esta sintetização foi feita por meio de uma função cópula gaussiana, que aprende a estrutura de dependência entre variáveis dependentes a partir da aplicação e modelagem de suas distribuições de probabilidade acumuladas utilizando uma distribuição normal. Obtendo a função densidade de probabilidade da cópula, pode-se gerar dados sintéticos que respeitem essa estrutura.

Após todos estes processos, analisaram-se os *scores* dos algoritmos e foi possível determinar qual teve o melhor desempenho, estabelecendo hipóteses para a ocorrência deste fato.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresenta-se uma tabela contendo o desempenho dos 11 algoritmos em cada um dos modelos, para uma análise comparativa.

Tabela 1: Scores de cada modelo por algoritmo.

Algoritmos	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3	MODELO 4
knn	0,7179	0,3684	0,6399	0,7049
LINEAR REGRESSION	0,5643	0,3878	0,8918	0,9151
rIDGE	0,5739	0,3865	0,8554	0,9099
LASSO	0,5898	0,3810	0,8544	0,9017
SVR	0,2151	0,1748	0,8852	0,9112
LINEAR SVR	0,2134	0,1750	0,7730	0,9034
DECISION TREE	0,4632	0,4182	0,8397	0,9210
RANDOM FOREST	0,7144	0,5076	0,8955	0,9418
GBR	0,098	0,1761	0,8734	0,8667
LIGHT GBM	0,5241	0,4292	0,8378	0,9255
NN	0,8036	0,5425	0,9024	0,9745

Como é possível observar, os maiores valores de R^2 foram obtidos pelo algoritmo de rede neural artificial, independentemente do modelo aplicado. As “redes neurais artificiais” possuem este nome, pois assemelham-se ao funcionamento do cérebro humano: existem vários “neurônios” que se interligam por “sinapses”, que, neste caso, representam as conexões aprendidas pela máquina.

Os dados são inseridos em uma “camada de entrada” e têm suas relações descritas por um valor numérico, o “peso”. Após este processo, há camadas intermediárias que computam esses pesos e geram neurônios intermediários, “ocultos” aos usuários, dos quais sairão as previsões, contidas na “camada de saída”, o que pode ser visualizado na Figura 3.

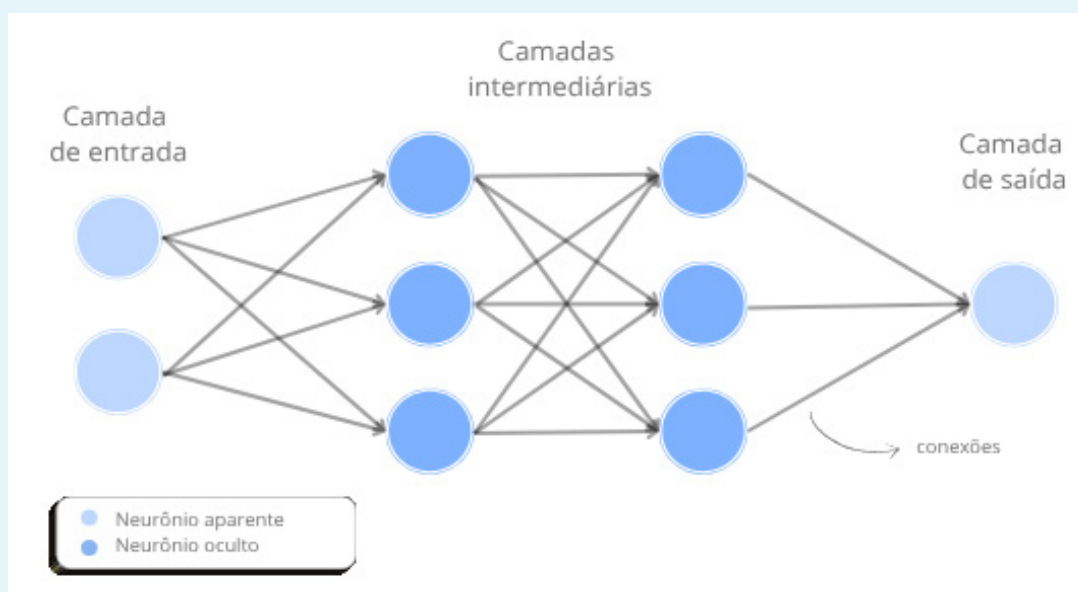


Figura 3: Esquema representativo de uma rede neural artificial

No entanto, antes de gerar as previsões, esse algoritmo aplica uma função não linear, conhecida como "função de ativação", sobre o cálculo da somatória dos dados de entrada multiplicados pelo peso. Ao realizar tal ato, o modelo consegue aprender com funções mais complexas do que apenas a linear para descrever as relações entre os dados.

Após as redes neurais, nos três últimos modelos, o melhor desempenho foi o do algoritmo "Random Forest", que aprende com várias árvores de decisão. Apresenta um bom desempenho em *datasets* pequenos, pois utiliza o "Bootstrap Sampling": cada árvore é treinada utilizando um subconjunto diferente do *input*, o que aumenta a probabilidade do modelo aprender relações significativas mesmo com poucos dados.

Já para o primeiro modelo, o *K-Nearest Neighbors* apresentou o maior score. Uma possível interpretação para este fato é: na ausência de qualquer técnica para aumento de performance ou de generalidade, o modelo avalia os dados mais próximos e retorna sua média como a previsão, que é a de maior acurácia em comparação aos outros algoritmos.

4. CONCLUSÃO

Quatro modelos diferentes, com 11 algoritmos cada, foram treinados para a previsão das taxas de resfriamento críticas de diversas ligas de ferro fundido branco com alto teor de cromo a partir da composição química da matriz.

Com este trabalho, foi possível desenvolver um método para a descrição das relações entre os dados que não se baseou apenas em uma interpolação multivariada, algo que era feito pela literatura.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, aos meus colegas de trabalho e de profissão, ao IPT, ao IFUSP e aos meus professores pelo apoio.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ANGUS, H. T. Constitution and structure of cast iron. In: ANGUS, H. T. (ed.). Cast Iron: Physical and Engineering Properties. 2. ed. London: Butterworth-Heinemann, 1976. p. 1-33. ISBN 978-0-408-70933-0.
- [2] DOGAN, Ö. N.; HAWK, J. A.; LAIRD, G. An overview on types of white cast irons and high chromium white cast irons. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 6, n. 6, p. 647-656, 1997.
- [3] DODD, J. Recent developments in abrasion resistant high chromium-molybdenum irons, low-alloy manganese steels and alloyed nodular irons of importance in the extraction and utilization of energy resources. Journal of Materials Engineering and Performance (JMES), v. 2, p. 65-76, 1980.
- [4] CIAS, W. W. Austenite transformation kinetics and hardenability of heat-treated 17.5% Cr white cast irons. AFS Transactions, v. 82, p. 317-328, 1979.
- [5] SU, Ying-long; LI, Dan; ZHANG, Xue-kun. Optimizing hardenability of high chromium white cast iron. China Foundry, Shenyang, v. 3, n. 4, p. 284-287, 2006.
- [6] THERMO-CALC, Versão 2024a. Stockholm, Sweden: Thermo-Calc Software AB, 2024.
- [7] CLIMAX MOLYBDENUM COMPANY. Transformation Characteristics of Cr and Cr-Mo White Irons. [S.l.]: Climax Molybdenum Company, [s.d.]. (Atlas)
- [8] ASM INTERNATIONAL. Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels. [S.l.]: ASM International, [s.d.]. (Atlas).
- [9] PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Versão 1.4.2. 2024. Disponível em: <https://scikit-learn.org/stable/>.
- [10] LIGHTGBM. LightGBM Documentation. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://lightgbm.readthedocs.io/>.
- [11] PATKI, Neha; WEDGE, Roy; VEERAMACHANENI, Kalyan. The Synthetic Data Vault. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA SCIENCE AND ADVANCED ANALYTICS (DSAA), 2016, Montreal. Anais [...].Montreal: IEEE, 2016.

DETECÇÃO DE FEIÇÕES GEOLÓGICAS COMBINANDO ATRIBUTOS SÍSMICOS E O MODELO SEGMENT ANYTHING 2

GT CUSTODIO¹, HF SAAR¹, TY AOYAGI¹, EM SALES¹



¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas

E-mail para contato:
gustavotorres@ipt.br

RESUMO – Este trabalho investiga o uso do modelo SAM 2 da Meta AI para segmentação de dados sísmicos, explorando diferentes combinações de atributos como entrada. Foram testadas quatro combinações de atributos além da amplitude pura, sendo que o melhor desempenho foi obtido para combinações de atributos que geraram imagens visualmente semelhantes à amplitude, que possuem menor alternância de cores. Isso sugere que combinações de atributos que geram imagens mais homogêneas podem aprimorar a segmentação automática com SAM 2.

1. INTRODUÇÃO

A interpretação manual de dados sísmicos é tradicionalmente um processo demorado e custoso. O uso de atributos sísmicos facilita essa tarefa ao realçar feições específicas, embora não capturem todas as características presentes nos dados. Por essa razão, há um crescente interesse no uso de *Machine Learning* para automatizar esse processo.

Neste trabalho, utilizamos o SAM 2 (*Segment Anything Model 2*), modelo desenvolvido pela Meta AI [1] para segmentação de imagens, treinado para segmentar qualquer instância em uma imagem com um contorno bem definido, sem necessariamente classificá-la em nenhuma categoria. Isso o torna versátil e aplicável para múltiplos problemas diferentes.

O SAM 2 requer imagens RGB (com três canais), enquanto imagens sísmicas de amplitude são imagens de intensidade monocanal, podendo ser representadas em RGB em tons de cinza, com canais redundantes. Assim, em vez dessa representação redundante, investigamos o uso de diferentes atributos sísmicos nos três canais da imagem, visando adicionar mais informação e melhorar a segmentação. Este estudo é baseado no trabalho de Custodio et al. [2], que realizou com sucesso um *fine-tuning* do SAM 2 pré-treinado e o utilizou na segmentação de dados sísmicos de amplitude.

2. METODOLOGIA

Este trabalho realizou o *fine-tuning* do modelo SAM 2 para segmentação de geocorpos e camadas sísmicas, utilizando diferentes combinações de atributos sísmicos. O processo foi dividido em três etapas: preparação dos dados, extração e combinação de atributos, e treinamento do modelo.

2.1 Preparação do Dataset

Os dados sísmicos foram coletados de três diferentes fontes públicas: F3 *offshore* da Holanda, Parihaka da Nova Zelândia [3] e Penobscot da Nova Escócia [4]. Anotações de horizontes próprias foram utilizadas no F3 e anotações públicas no Penobscot e Parihaka.

Os dados utilizados no processo de *fine-tuning* são imagens das seções sísmicas extraídas a partir dos *inlines* e *crosslines* dos datasets, que consistem de 80 seções do F3, 68 seções do Parihaka e 72 do Penobscot, totalizando 220 imagens. Cada imagem contém múltiplas camadas e geocorpos, totalizando 2892 instâncias. Os dados foram divididos em treinamento e teste, sendo que 176 imagens foram utilizadas no treinamento e 44 no teste.

2.2 Extração de atributos sísmicos

Os atributos sísmicos foram calculados utilizando a biblioteca de Python d2geo [5]. Além da amplitude, quatro atributos diferentes foram calculados: envelope, RMS (*root mean square*), filtro Gaussiano, cosseno da fase instantânea e variação relativa da amplitude. As imagens RGB foram formadas ao combinar três atributos por imagem (um por canal RGB). As combinações testadas foram:

- Amplitude, cosseno da fase instantânea e RMS;
- Envelope, cosseno da fase instantânea e amplitude;
- Amplitude, filtro Gaussiano e variação relativa da amplitude;
- Variação relativa da amplitude, cosseno da fase instantânea e RMS.

A Figura 1 mostra exemplos de imagens geradas pela combinação de atributos.

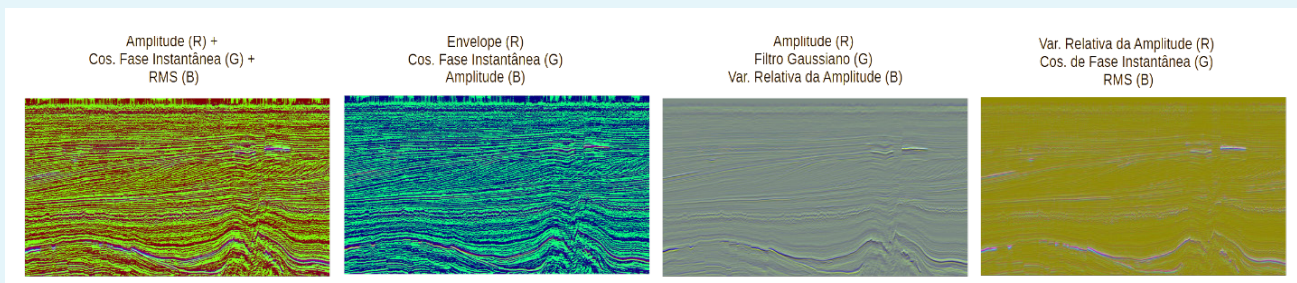


Figura 1: Exemplo de um inline do volume F3 quando diferentes atributos sísmicos são combinados nos canais de cores.

2.3 Treinamento do SAM 2

Os experimentos foram realizados utilizando modelo SAM 2 da Meta AI. O tamanho do modelo escolhido foi o *large* com 224.4 milhões de parâmetros. O processo de *fine-tuning* foi realizado durante 200 épocas em uma NVIDIA GeForce RTX 4090 com *batch size* 1. A função custo utilizada foi similar à do trabalho de Kirillov et al. [6], que combina *focal loss* e *dice loss*. Para supervisionar a evolução da métrica IoU (*intersection over union*), a função custo utilizada nesse trabalho também inclui a diferença entre o IoU predito e o IoU esperado.

Durante o treinamento, o modelo recebe pares de imagem e *prompt*. Para cada imagem um único *prompt* aleatório foi escolhido dentro da região da máscara de segmentação. O *prompt* aleatório permite maior diversidade de dados durante o treinamento. Técnicas adicionais de aumento de dados também foram aplicadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desempenho do SAM 2 *large* na tarefa de segmentação foi comparado para diferentes combinações de atributos. A Figura 2 mostra exemplos de resultados visuais da segmentação utilizando diferentes combinações de atributos. O processo de *fine-tuning* produziu uma diferença considerável no resultado da segmentação, apresentando resultados superiores à variação *zero shot* (modelo original do SAM 2).

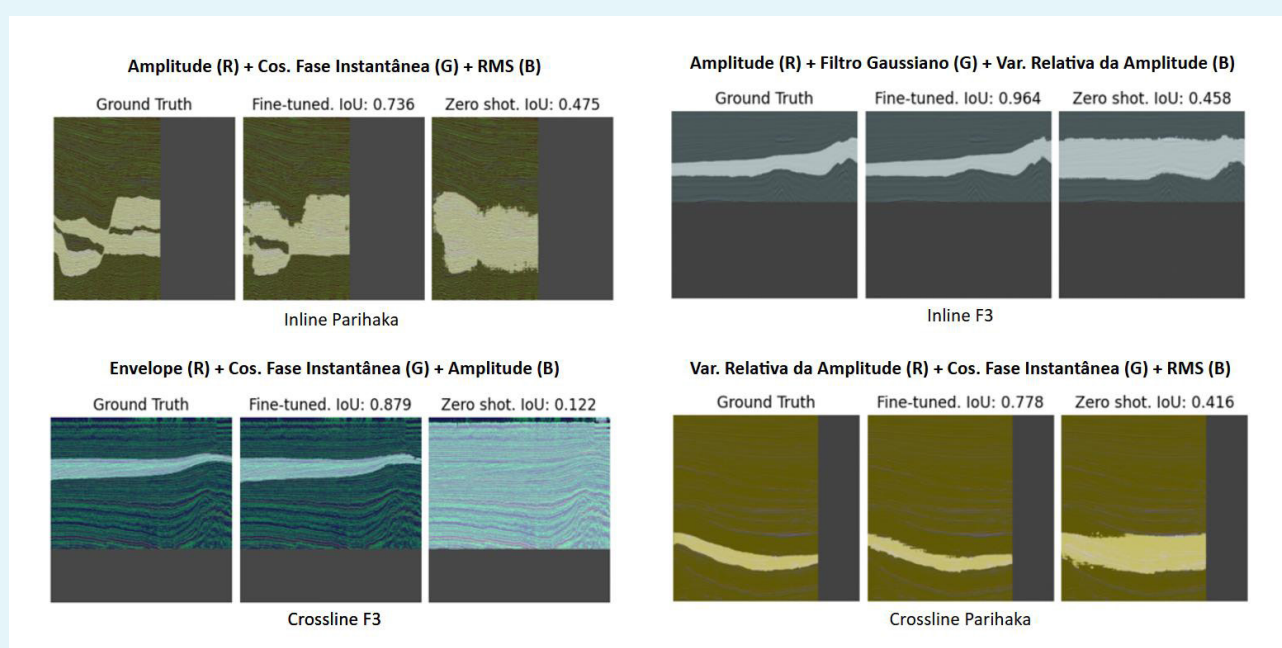


Figura 2: Resultados visuais da segmentação com SAM 2. Quatro combinações diferentes de atributos são utilizadas para diferentes exemplos de inlines e crosslines dos volumes F3 e Parihaka. A figura também mostra o IoU calculado para cada segmentação.

A Tabela 1 mostra os valores das métricas de avaliação para cada combinação de três atributos. As métricas foram calculadas utilizando uma média de 50 épocas no conjunto de teste. Em cada época, foi selecionado um conjunto diferente de amostras, acompanhado de um *prompt* aleatório.

A maioria das combinações de atributos apresentaram resultados inferiores ao uso da amplitude pura, exceto pela combinação 5. Entre todas as combinações testadas, os melhores desempenhos do SAM 2 foram obtidos com as combinações 4 e 5, cujas imagens geradas se assemelham visualmente às imagens de amplitude. Observa-se que as combinações de atributos que resultaram em imagens com menor alternância de cores tenderam a apresentar melhor desempenho. Isso sugere que a alternância de cores induz o modelo a segmentar incorretamente objetos.

Tabela 1: Desempenho do SAM 2 Large para diferentes conjuntos de atributos nos dados de teste. Os valores representam a média de 50 execuções. Os atributos CFI, Gauss e Var. Amp. correspondem, respectivamente, ao cosseno da fase instantânea, ao filtro Gaussiano e à variação relativa da amplitude.

Combinação	Atributos (RGB)	Precisão	Recall	F1	IoU
1	Amplitude 3 canais	0,9216	0,9094	0,9096	0,8549
2	Amplitude + CFI + RMS	0,8878	0,8715	0,8705	0,7972
3	Envelope + CFI + Amplitude	0,9155	0,8964	0,8993	0,8398
4	Var. Amp. + CFI + RMS	0,9135	0,9028	0,9016	0,8436
5	Amplitude + Gauss + Var. Amp.	0,9302	0,9167	0,9184	0,8694

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um processo de *fine-tuning* em um modelo SAM 2 utilizando imagens geradas pela combinação de atributos sísmicos. Os resultados dos testes de segmentação demonstram que o desempenho do SAM 2 é fortemente influenciado pela escolha dos atributos utilizados como entrada. Embora as imagens de amplitude apresentem bons resultados, algumas combinações específicas de atributos apresentaram desempenho comparável ou superior, especialmente em casos de imagens sísmicas com maior homogeneidade de cores. Uma possível explicação é que nas combinações com desempenho inferior, a alternância de cores pode induzir o SAM 2 a segmentar apenas parcialmente regiões desejadas. Para trabalhos futuros, é possível testar novas combinações de atributos que produzam imagens de baixa e alta alternância de cores e verificar o desempenho do SAM 2 em cada caso.

5. REFERÊNCIAS

- [1] RAVI, N.; GABEUR, V.; HU, Y.-T.; HU, R.; RYALI, C.; MA, T.; KHEDR, H.; RÄDLE, R.; ROLLAND, C.; GUSTAFSON, L.; et al. Sam 2: Segment anything in images and videos. *arXiv preprint*, arXiv:2408.00714, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2408.00714>. Acesso em: 5 set. 2025.
- [2] CUSTODIO, G. T.; AOYAGI, T. Y.; SAAR, H. F.; SILVA, C. F. da; GUERRA, N. F.; HELENO, A.; GAMBA, C. T.; SILVA, C. L. da; VIRISSIMO, D. B.; SALES, E. M.; SILLES, F. S.; NETTO, L. G.; GANDOLFO, O. C.; RUBO, R. A. Detecting geological features in seismic data using Segment Anything Model 2 across multiple datasets. *IMAGE '25 (2025 SEG/AAPG)*, Houston, Texas, USA, ago. 2025. Disponível em: <https://imageevent.aapg.org/portals/26/abstracts/2025/4315035.pdf>. Acesso em: 5 set. 2025.
- [3] SEAM AI via Alcrowd. Seismic Facies Identification Challenge. 2020. *Uma competição de aprendizado de máquina hospedada na plataforma Alcrowd; organizada pela SEAM (subsidiária da SEG)*. Disponível em: <https://www.aicrowd.com/challenges/seismic-facies-identification-challenge>.
- [4] DGB EARTH SCIENCES. Project Penobscot. *OpenTect seismic dataset provided via TerraNubis under Creative Commons 3.0 license*. Disponível em: <https://terranubis.com/datainfo/Penobscot>.
- [5] FITZ-GERALD, B. D2geo: A framework for computing seismic attributes with Python. 2018. Disponível em: <https://github.com/dfitzgerald3>. Acesso em: 5 set. 2025.
- [6] KIRILLOV, A.; MINTUN, E.; RAVI, N.; MAO, H.; ROLLAND, C.; GUSTAFSON, L.; XIAO, T.; WHITEHEAD, S.; BERG, A. C.; LO, W.-Y.; et al. Segment anything. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, p. 4015–4026, 2023.

ESTUDO DE VENTILAÇÃO PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ABERTURAS NO SANTUÁRIO NACIONAL DE APARECIDA

EH SUZUKI¹, F VITTORINO¹



¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Laboratório de Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Instalações Prediais (LCAP) – Habitações e Edificações (HE)

E-mail para contato:
elisuzuki@ipt.br

RESUMO – Este estudo avaliou a ventilação natural no Santuário Nacional de Aparecida para substituir os elementos vazados (cobogós) das paredes laterais por vitrais. Analisaram-se diversas geometrias de janelas utilizando simulações computacionais e medições de campo. Os resultados mostraram que a configuração com vitrais com básculas inclinadas a 40° e cobogós na parte inferior oferece taxas de renovação de ar semelhantes às atuais. O estudo concluiu que essa solução mantém as mesmas condições de conforto térmico atuais, provando a viabilidade da mudança.

1. INTRODUÇÃO

Garantir o conforto térmico em espaços em que há uma elevada ocupação em um intervalo de tempo específico, é um desafio operacional para o sistema de climatização. No caso de locais onde são realizados cultos, como o Santuário Nacional de Nossa Senhora da Conceição Aparecida, cuja capacidade é de até 45.000 pessoas [1], este desafio é particularmente maior.

O objetivo do trabalho foi avaliar diferentes geometrias de abertura para as janelas laterais do térreo da basílica, considerando a necessidade de trocar os atuais cobogós por vitrais e manter taxas de ventilação natural suficientes para garantir condições adequadas, mesmo em momentos com uma alta densidade de pessoas em seu interior.

2. METODOLOGIA

O trabalho consistiu na realização de medições in loco e na realização de simulações computacionais para o dimensionamento das aberturas para ventilação e na verificação de seu impacto sobre a temperatura do ar na zona ocupada pelos fieis durante a realização de missas.

3. Caso de estudo

O Santuário de Nossa Senhora Aparecida é constituído de um andar de subsolo que possui lojas e área de alimentação, um andar térreo onde se localizam o altar central, sacristia e capelas, e um mezanino com áreas técnicas. Para simulação, foram considerados os modelos da janela atual, com cobogós, e as variações de geometria considerando vitrais com básculas inclinadas, bem como a verificação da temperatura do ar no interior da basílica em diferentes condições de ocupação.

2.2 Medições in loco

As medições foram realizadas em setembro de 2024, em que a temperatura máxima do ar externo atingiu 32° C e a ocupação de pessoas era baixa. Foram coletados, no período da tarde, parâmetros de velocidade do ar, para calibrar os diferenciais de pressão; temperatura do ar e temperatura de superfície, para uma pré-avaliação das condições de conforto no interior da edificação.

2.3 Modelagem e simulações computacionais

Para o estudo da ventilação, foi realizada a modelagem somente da seção da janela, utilizando o programa Fire Dynamic Simulation (FDS) v.6 [2] e a visualização no programa SmokeView (SMV). Para o estudo de conforto térmico, realizou-se uma modelagem tridimensional da nave oeste da edificação no programa SketchUp 2023 (Figura 1b) e a simulação térmica no programa EnergyPlus v.24.1 [3], que considera regime transiente de trocas térmicas, para determinação de temperatura operativa nas zonas ocupadas. A Figura 1a destaca as malhas adotadas no modelo do FDS-SMV, sendo considerada uma malha fina no centro do volume, onde está localizada a janela, e uma malha mais grossa em regiões distantes desta. A Figura 1c apresenta o cobogó existente nas janelas laterais, com altura total aproximada de 6,0 m.

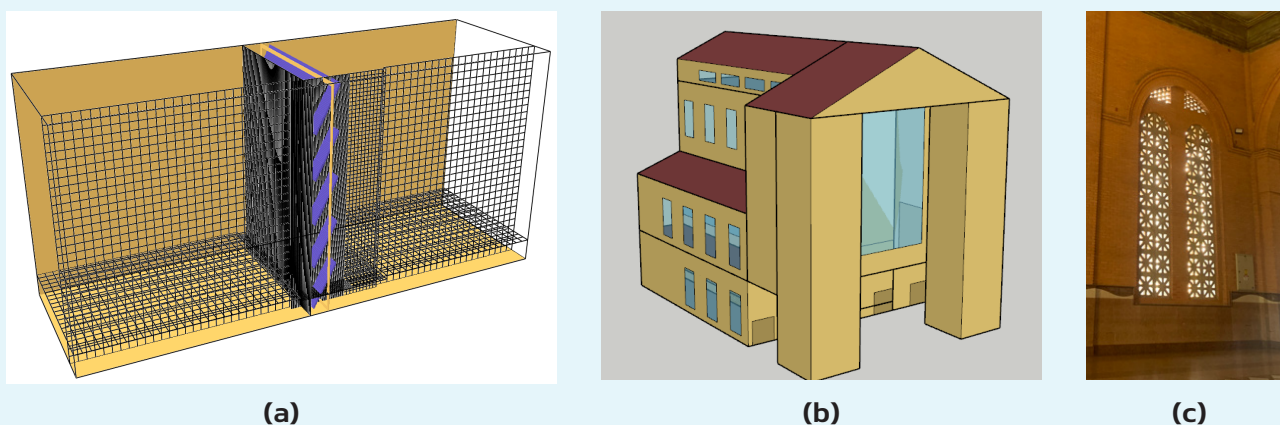


Figura 1: (a) Modelo do FDS-SMV com detalhe para as malhas, (b) modelo do SketchUp para o EnergyPlus e (c) configuração atual dos cobogós

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados de escoamento de ar através da janela considerando tanto a geometria atual, quanto as geometrias propostas, a partir da visualização do *slice* de velocidade do ar. O lado esquerdo das imagens representa a área externa, e o lado direito, o interior da edificação. Em todos os casos, a velocidade variou de 0,4 a aproximadamente 4 m/s. As variações de vitrais incluíram diferentes ângulos de inclinação para abertura permanente, de forma que fosse protegido de chuva na fachada e a posição das básculas proporcionasse continuidade visual em possíveis desenhos de vitrais.

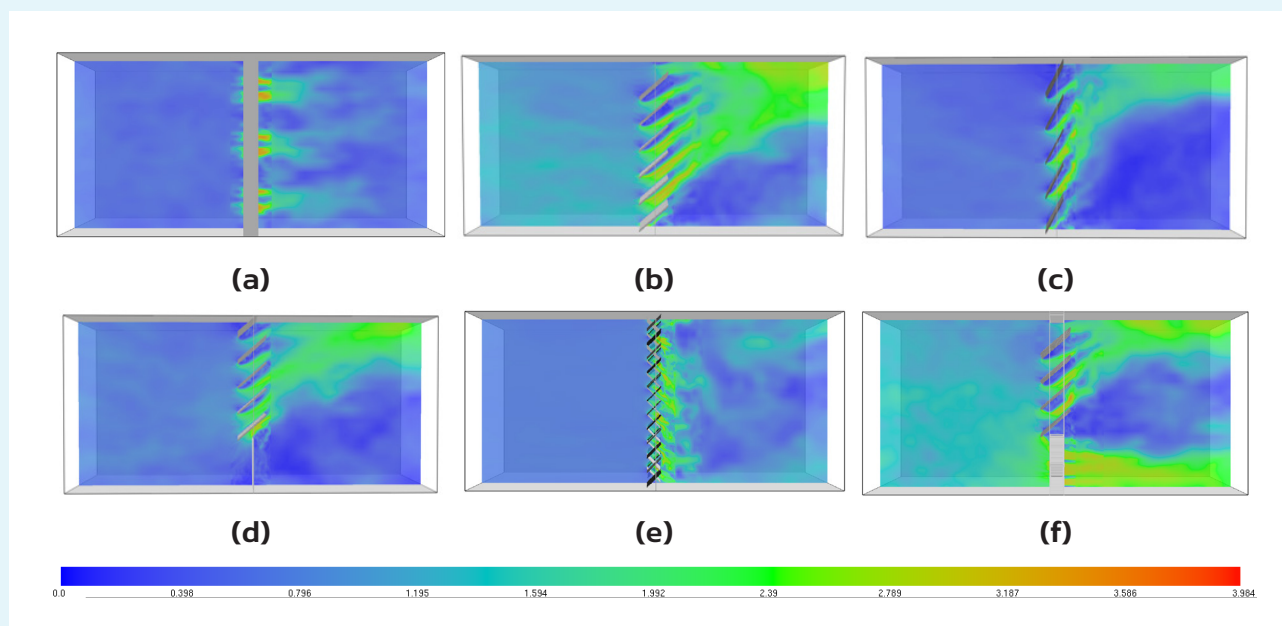


Figura 2: Velocidade do ar (m/s) para: (a) cobogós, (b) lâminas paralelas a 40°, (c) lâminas paralelas a 60°, (d) lâminas a 40° com bandeira fixa, (e) lâminas intercaladas a 45° e (f) lâminas a 40° e cobogó na parte inferior.

Observa-se que nos casos em que há básculas de vitrais paralelas, o ar é direcionado para a parte superior do ambiente, não atingindo a zona ocupada por pessoas, onde se necessitaria maior movimentação do ar

A Figura 3 mostra os correspondentes resultados de vazão de ar, sendo que nos primeiros instantes, os valores representam a evolução do processo de convergência numérica.

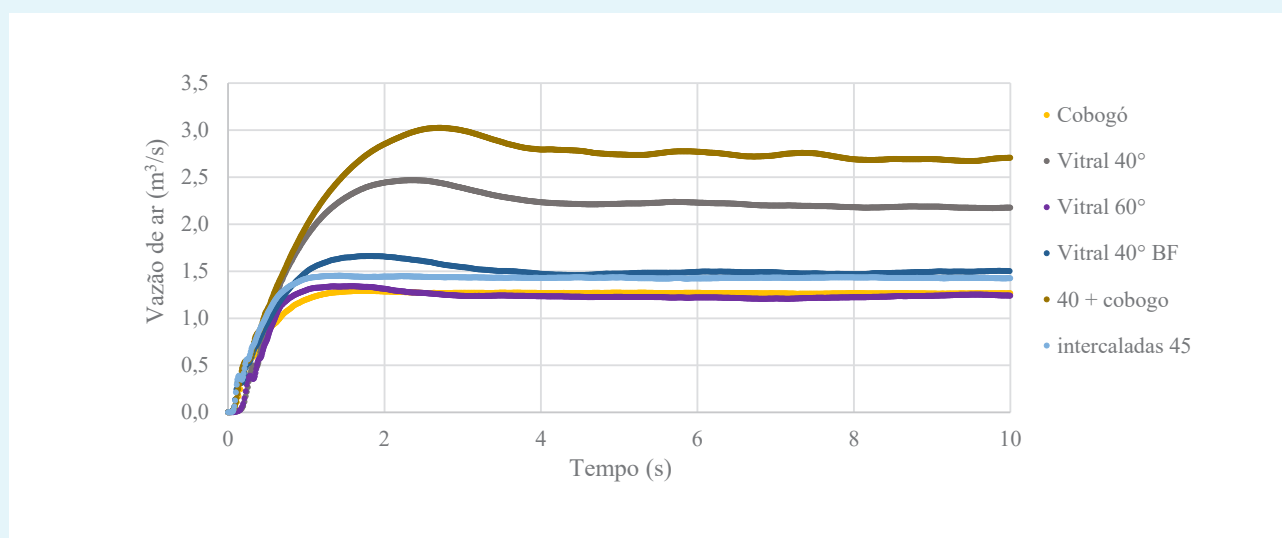


Figura 3: Vazão de ar das diferentes geometrias de janela

A configuração com maior vazão de ar é a Vitral 40° + cobogó, correspondente ao escoamento da Figura 2f. Em seguida, o segundo maior resultado de vazão média é o Vitral 40°.

Para a avaliação do conforto térmico, foram consideradas as janelas atuais e a janela com a configuração de vitral com lâminas a 40° e cobogó na parte inferior (Figura 2f), para três cenários de ocupação, sendo:

- Parcial: densidade de 16 m²/pessoa, correspondendo à situação normal de visitação, em dia de semana;
- Central: densidade de 2 pessoas/m², correspondendo à ocupação plena de pessoas sentadas;
- Full: densidade de 2 pessoas/m² na área central e 4 pessoas/m² nas laterais, correspondendo a ocupação plena de pessoas sentadas na área central e de pessoas em pé nas laterais.

A Figura 4 mostra os resultados de temperatura do ar na zona ocupada, em que se observa pouca diferença de temperatura entre estes dois tipos de janela para uma mesma densidade de ocupação.

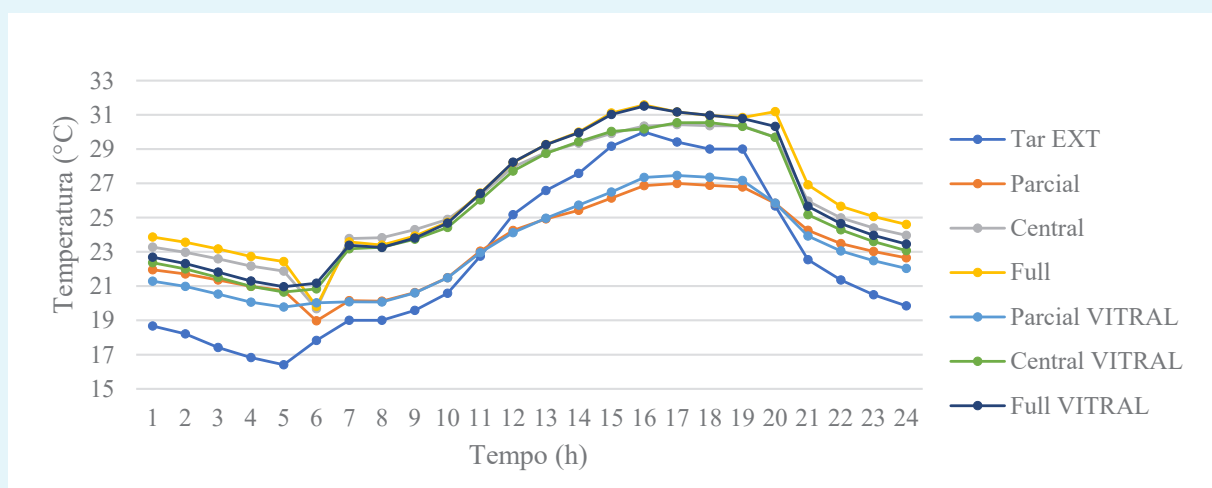


Figura 4: Temperatura do ar interior considerando janela com cobogó e a janela com vitral a 40° + cobogó, para diferentes níveis de ocupação

4. CONCLUSÃO

Verificou-se que o uso de uma solução com vitrais inclinados a 40° combinados com cobogós na região mais baixa da janela produzem taxas de renovação e circulação de ar sobre o corpo dos ocupantes similares ao que se tem hoje, com as fachadas totalmente usando apenas o cobogó. Nessa alternativa, de vitral, as condições de conforto térmico futuras serão equivalentes à situação atual, o que não seria conseguido com as outras alternativas analisadas.

Destaca-se que nesses edifícios pouco convencionais, o uso de mais de uma ferramenta de simulação permite a realização de análises mais detalhadas e abrangentes, uma vez que nas simulações térmicas obtiveram-se os parâmetros de conforto térmico no centro das zonas ocupadas, enquanto que nas simulações fluidodinâmicas computacionais os resultados indicaram a distribuição do ar em termos de velocidade do ar e direção.

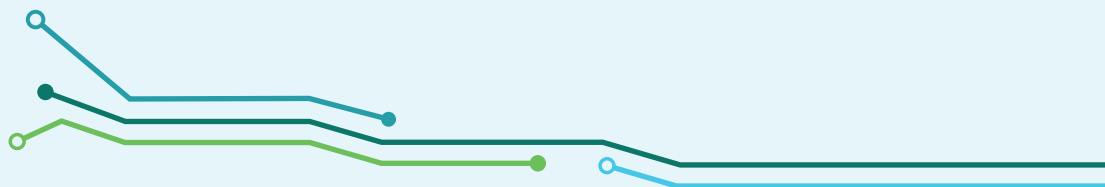
5. AGRADECIMENTOS

Verificou-se que o uso de uma solução com vitrais inclinados a 40° combinados com cobogós na região mais baixa da janela produzem taxas de renovação e circulação de ar sobre o corpo dos ocupantes similares ao que se tem hoje com as fachadas totalmente usando apenas o cobogó. Nessa alternativa, de vitral, as condições de conforto térmico futuras serão equivalentes à situação atual, o que não seria conseguido com as outras alternativas analisadas.

Destaca-se que nesses edifícios pouco convencionais, o uso de mais de uma ferramenta de simulação permite a realização de análises mais detalhadas e abrangentes.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Prefeitura de Aparecida. Santuário Nacional. Disponível em: <https://www.aparecida.sp.gov.br/portal/turismo/0/9/2696/santuario-nacional>. Acesso em set. 2025.
- [2] MCGRATTAN K, MCDERMOTT R, WEINSCHENK C, FORNEY G, Fire Dynamic Simulator User's guide, Sixth Edition, Special Publication. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2024. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1019>
- [3] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Input Output Reference, EnergyPlus Version 24.1.0 Documentation. Washington: US DOE, 2024.



ESTUDO DO ESCOAMENTO SECUNDÁRIO EM TUBO HELICOIDAL NO PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS LÍQUIDOS: HOMOGENEIZAÇÃO DE TEMPERATURA E INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

GMB HIPÓLITO¹, JAW GUT^{1,2}



¹Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química

²Universidade de São Paulo, FoRC – Food Center Research

E-mail para contato:
jorgewgut@usp.br

RESUMO – No tratamento térmico de alimentos líquidos em regime laminar e fluxo contínuo, a baixa eficiência na transferência de calor e a limitada uniformidade térmica em trocadores tubulares são desafios relevantes. Este estudo teve como objetivo avaliar, por meio de simulações numéricas de escoamento acoplado à transferência de calor, o impacto do escoamento secundário gerado em um tubo helicoidal (geometria de um aplicador de micro-ondas), em que a homogeneização térmica é fundamental. Verificou-se que o aumento da taxa de transferência de calor atingiu cerca de 32 %, em comparação ao escoamento em tubo reto, e o desvio padrão da temperatura na saída reduziu-se de 6 para 1 °C. Esses resultados confirmam, de forma quantitativa, a eficiência da configuração helicoidal na uniformização térmica e na intensificação da troca de calor.

1. INTRODUÇÃO

O processamento térmico de alimentos líquidos em fluxo contínuo é geralmente realizado em regime laminar, devido à maior viscosidade dos produtos, enfrentando, assim, limitações associadas ao baixo coeficiente convectivo e à baixa uniformidade térmica. Em trocadores a placas e tubos corrugados, a mistura é induzida pelas ondulações, sendo alternativas que podem atender a um padrão sanitário. Outra opção é utilizar, como elemento de mistura, um tubo de geometria helicoidal, que gera escoamento secundário e intensifica a transferência de calor^[1,2].

Assim, neste estudo, analisou-se, por meio de modelagem e simulação numérica, o aquecimento de um alimento modelo em um tubo helicoidal projetado para um aplicador de micro-ondas^[3]. Como o padrão de aquecimento por micro-ondas é não-homogêneo, adotou-se a geometria espiralada para favorecer a mistura do fluido, a distribuição de calor e a uniformização térmica^[4]. Para quantificar o efeito de mistura neste tubo, realizou-se uma comparação com um tubo reto, para uma condição de troca de calor convectiva padronizada.

2. METODOLOGIA

Foi modelado o escoamento laminar em regime estacionário em um tubo helicoidal, considerando a troca de calor convectiva com o meio externo. A geometria do aplicador consistiu em uma hélice com cinco voltas e meia, passo de 40 mm, raio de curvatura de 125 mm e diâmetro interno de 10,7 mm, além de dois trechos retos, de 300 mm cada, na entrada e na saída da hélice, para estabilização do escoamento^[3], como mostra a Figura 1.

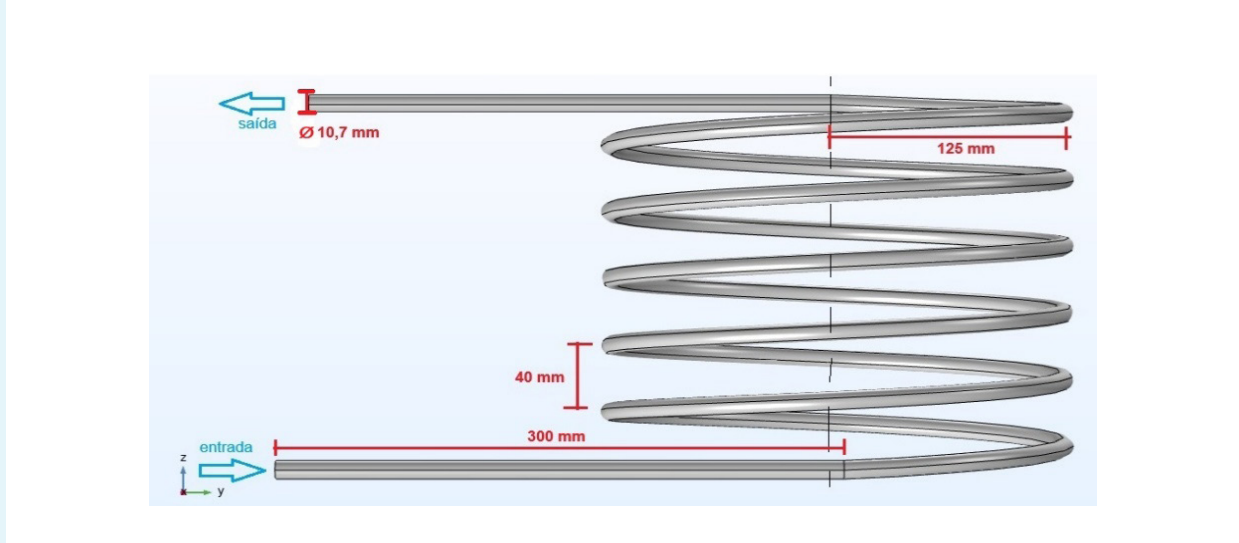


Figura 1: Geometria do tubo helicoidal utilizado.

Para avaliar a influência da curvatura na homogeneidade térmica, também foram realizadas simulações em um tubo reto vertical, com escoamento ascendente na direção z , sob as mesmas condições de contorno, utilizando a mesma malha, além de diâmetro e comprimento linear (4,9 m) equivalentes aos do tubo helicoidal. A descrição dos fenômenos de escoamento e transferência de calor em ambas as geometrias se baseou nas equações de conservação de energia (Equação (1)) e de Navier–Stokes (Equações (2) e (3)).

$$\nabla \cdot (\rho \hat{C}_p \vec{v} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

em que $\hat{C}_p$ ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) é o calor específico do fluido; ρ (kg.m^{-3}) é a massa específica do fluido; k ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) é a condutividade térmica do fluido; $\vec{v}$ (m.s^{-1}) é a velocidade vetorial do fluido; p (Pa) é a pressão do sistema; t (s) é o tempo; $\vec{\tau}$ é o tensor da tensão; $\vec{g}$ é o vetor gravidade.

O modelo foi resolvido pelo método de elementos finitos no *software COMSOL Multiphysics*® 6.3, utilizando um alimento modelo não-newtoniano pseudoplástico (solução de sacarose, NaCl e carboximetilcelulose) como fluido de processo nas vazões de 0,5, 1,0 e 1,5 L/min, com temperatura de entrada de 25 °C. Adotou-se um coeficiente de troca de calor global de 300 $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ referente a um meio externo a 80 °C. Para a malha, foram utilizados elementos hexaédricos que

acompanham o sentido do escoamento, por extrusão (comando *swept*). A independência de malha (na vazão máxima de 1,5 L/min) foi estudada verificando a vazão mássica e a temperatura média de mistura calculadas na saída do tubo, para determinação do tamanho máximo dos elementos. Para comparação dos escoamentos, foram avaliados a taxa de troca de calor e o desvio padrão de temperatura na saída de cada tubo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de independência de malha (Figura 2), para a vazão de 1,5 L/min, observou-se a influência do número de elementos na vazão mássica e na temperatura média na saída do tubo helicoidal. A malha escolhida, indicada pela seta azul na Figura 2, apresentou 385.679 elementos (tamanho máximo de 0,5 mm) e tempo de simulação de 1,05 hora.

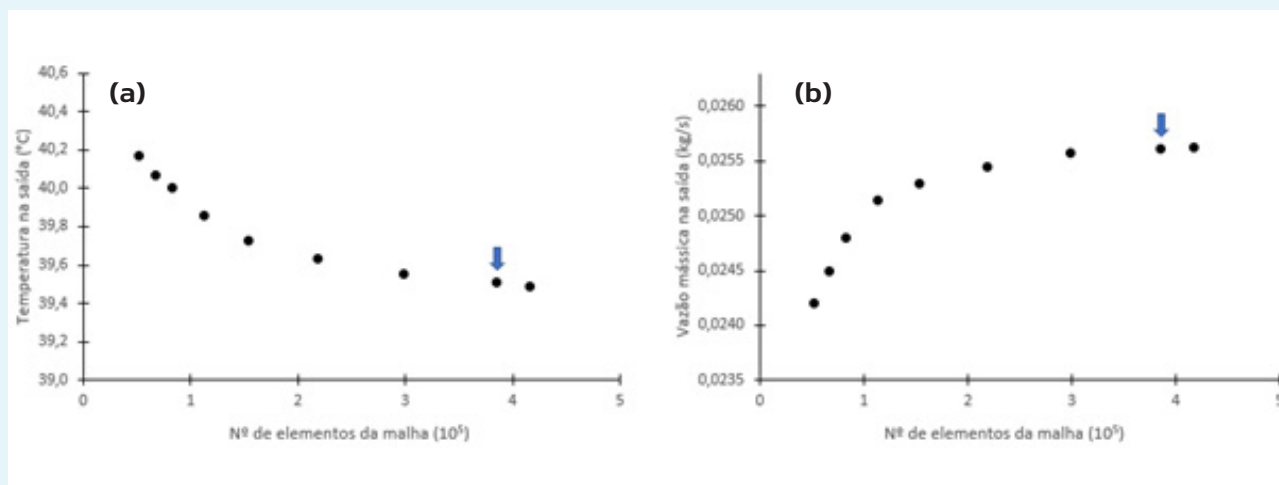


Figura 2: Influência do número de elementos da malha na temperatura média (a) e na vazão mássica (b) na saída do tubo helicoidal.

Quanto ao perfil de velocidade, no tubo reto sabe-se que o perfil laminar é parabólico, com a velocidade máxima localizada no centro. No entanto, no tubo helicoidal, o ponto de maior velocidade desloca-se do centro em direção à parte externa da hélice, efeito causado pela ação da força centrífuga. Essa força empurra o fluido para fora da curva, originando um escoamento secundário responsável pela formação dos vórtices de Dean e pela mistura do fluido. O componente v (eixo y) predomina nas regiões de entrada e saída, pois está associado à direção axial do escoamento, perpendicular à seção transversal do tubo (plano $x-z$). A Figura 3 ilustra as contribuições dos componentes u e w (velocidades radiais nas direções x e z , respectivamente) do vetor velocidade resultante, no plano de saída da hélice. Nota-se que, em menores vazões, o escoamento secundário apresenta baixa intensidade, enquanto o aumento da vazão intensifica os componentes u e w , comportamento típico de escoamentos em tubos helicoidais. O formato dos perfis de velocidade segue o padrão teórico dos vórtices de Dean^[5], característicos de tubos curvos, considerando que o centro de curvatura da hélice está à direita do tubo na Figura 3. Entretanto, o perfil não é simétrico em relação aos eixos x e y , uma vez que o escoamento ocorre de forma ascendente na direção z .

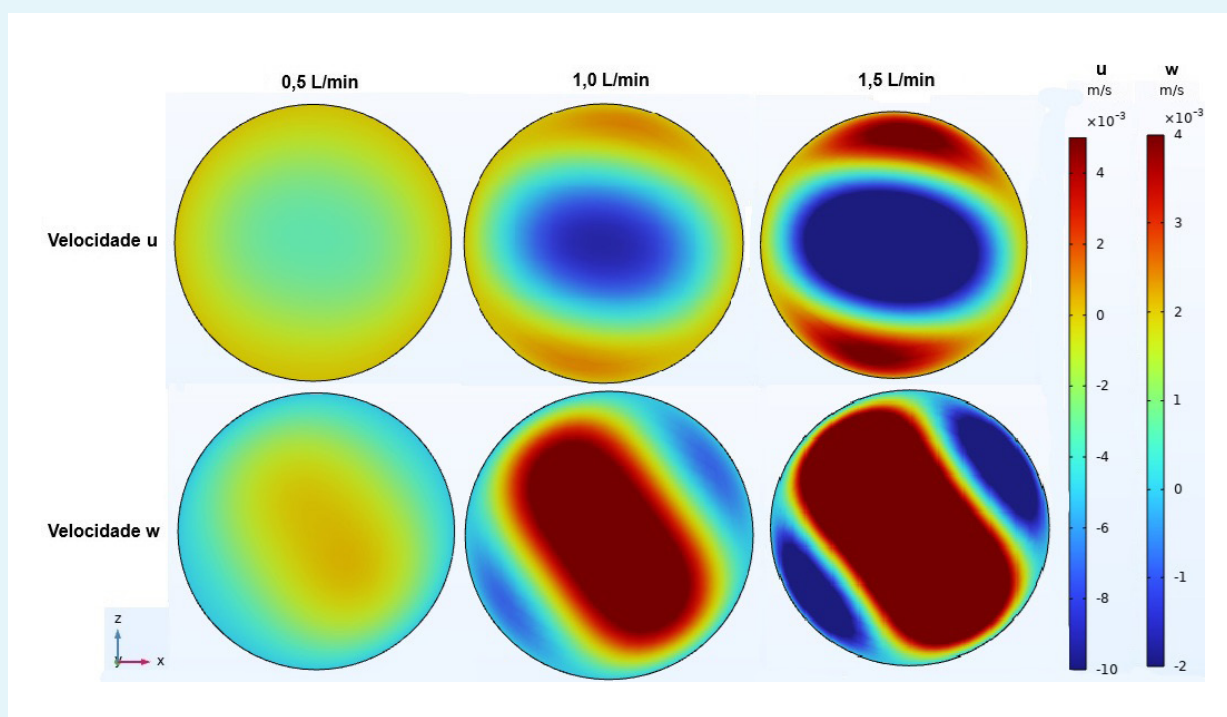


Figura 3: Componentes u e w da velocidade na saída da hélice.

A Figura 4a apresenta a distribuição de temperatura no tubo reto. Observa-se que, para todas as vazões analisadas, o perfil radial manteve-se simétrico nas seções transversais, evidenciando a ausência de mistura significativa. Como consequência, a amplitude térmica (diferença entre as temperaturas máxima e mínima nas seções) é maior. Já na Figura 4b, que ilustra os perfis de temperatura no tubo helicoidal, em planos x - z , nota-se que o escoamento secundário induzido pela geometria favorece a mistura do fluido, resultando em maior homogeneização térmica na saída da última volta, comportamento não verificado no tubo reto.

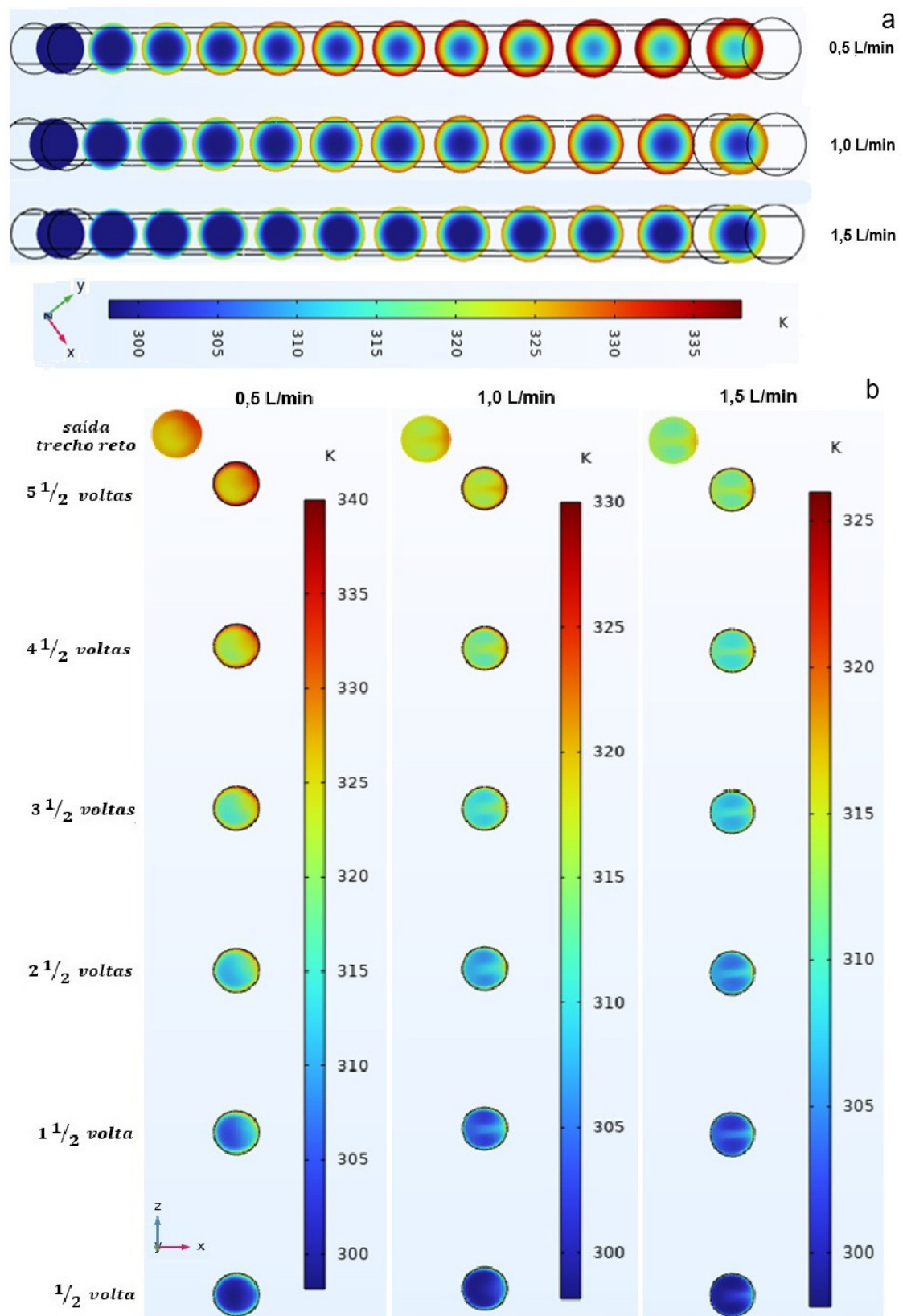


Figura 4: Distribuição de temperaturas ao longo do tubo reto (a) e tubo helicoidal (b).

A partir dos dados da Tabela 1, nota-se que vazões menores resultam em temperaturas médias de saída (T_s) mais elevadas. Em ambos os tipos de escoamento, com o aumento da vazão, aumenta-se também a taxa de calor trocado (q) durante o escoamento. Observa-se que a troca de calor foi mais elevada no tubo helicoidal em comparação ao tubo reto, para todas as vazões, devido às curvas que promovem escoamento secundário e ampliam as interações térmicas no fluido. O aumento percentual na taxa de calor trocado do tubo helicoidal em relação ao tubo reto foi mais significativo na vazão mais alta. Além disso, os valores do desvio padrão de temperatura (DP) na saída do tubo helicoidal foram menores que os do tubo reto, confirmando quantitativamente a maior uniformidade térmica alcançada nesse caso.

Tabela 1: Resultado dos valores calculados de número de Reynolds, T_s , q e DP .

Vazão volumétrica (L/min)	Re	T _{tubo reto} / °C	T _{tubo helicoidal} / °C	q _{tubo reto} / kW	q _{tubo helicoidal} / kW	Aumento de q / %	DP _{tubo reto} / °C	DP _{tubo helicoidal} / °C
0,5	26	49,6	54,7	0,878	1,06	21,1	4,68	1,98
1,0	62	40,0	44,4	1,07	1,39	29,2	6,20	1,33
1,5	106	36,0	39,5	1,18	1,56	31,7	6,33	1,17

4. CONCLUSÃO

As simulações comparativas entre o tubo reto e o tubo helicoidal demonstraram a formação de escoamento secundário (vórtices de Dean) na geometria helicoidal, o que resultou em maior eficiência de transferência de calor. O aumento da taxa de troca térmica variou de 21 a 32 %, com efeito positivo da vazão, além de melhorar a uniformidade de temperatura na saída: o desvio padrão reduziu-se de cerca de 6 °C (tubo reto) para 1 °C (tubo helicoidal). Essa uniformização é relevante no processamento de alimentos, pois a presença de pontos frios pode comprometer a segurança do produto. Assim, confirma-se que a geometria proposta^[3] favorece a mistura em regime laminar e pode ser adequada para aquecimento por micro-ondas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] LEWIS M, HEPPELL N, *Continuous thermal processing of foods: Pasteurization and UHT sterilization*. Gaithersburg: Aspen Publishers, 2000.
- [2] LIGRANI PM, CHOI S, SCHALLERT AR, SKOGERBOE P, Effects of Dean vortex pairs on surface heat transfer in curved channel flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, v. 39, n. 1, p. 27–37, 1996.
- [3] CASSARES M, POUZADA EVS, CASTRO ER, TADINI CC, GUT JAW, Projeto de uma cavidade de micro-ondas para processamento de alimentos líquidos. *Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. 2023.

[4] YANG H, YAN B, CHEN W, FAN D, Prediction and innovation of sustainable continuous flow microwave processing based on numerical simulations: A systematic review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, v. 175, 2023.

[5] VASHISTH S, KUMAR V, NIGAM KDP, A review on the potential applications of curved geometries in process industry. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 47, n. 10, p. 3291–3337, 2008.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP 2013/07914–8, 2023/13161–4, 2024/01519–4), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES 88887.966016/2024–00) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 409472/2021–2 e 316388/2021–1), assim como o apoio do Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia.

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA REFORMA DO ETANOL ACOPLADA A CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO (MS-SOFC) PARA APLICAÇÕES EMBARCADAS EM VEÍCULOS

P METOLINA¹, B B N S BRANDÃO¹, F C ANTUNES¹,
T DIAS¹, G DOUBEK¹, D NORILER¹



¹ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

E-mail para contato:
pmetoli@gmail.com

RESUMO – O estudo avaliou a integração do sistema reformador de etanol, célula MS-SOFC e queimador para aplicações automotivas sustentáveis, usando modelagem computacional no software Aspen Plus. Foram comparados cenários com e sem reciclo dos gases provenientes da MS-SOFC, analisando eficiência da célula e do sistema. O reciclo mostrou ganhos significativos, elevando a eficiência global do sistema e promoveu a autosuficiência térmica do reformador. Esses achados consolidam a viabilidade termodinâmica do sistema integrado como estratégia promissora para autossuprimento e incremento de eficiência em aplicações embarcadas.

1. INTRODUÇÃO

A transição para sistemas de transporte com tecnologias de baixo carbono é uma prioridade global, impulsionada pela necessidade de mitigar mudanças climáticas e reduzir emissões de gases de efeito estufa. A eletrificação veicular, embora promissora, apresenta desafios significativos relacionados às emissões do ciclo de vida das baterias e à matriz elétrica ainda predominantemente fóssil em muitos países. Nesse contexto, células a combustível de óxido sólido suportadas em metal (Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells – MS-SOFCs) surgem como uma alternativa viável e sustentável, particularmente em regiões com abundância de biomassa, como o Brasil.

As MS-SOFCs destacam-se pela capacidade de processar gás de síntese derivado de biocombustíveis, sem exigir hidrogênio de alta pureza, viabilizando a integração de reformadores embarcados para maximizar a autonomia e segurança dos veículos automotores [1,2]. Essas células oferecem vantagens como alta eficiência energética, flexibilidade no uso de combustíveis e robustez em condições operacionais adversas, características que ampliam seu potencial para aplicações automotivas [3,4].

Entretanto, a complexidade intrínseca dos sistemas de células a combustível de óxido sólido (SOFCs), sobretudo quando integrados a reformadores, torna indispensável o uso de modelagem e simulação computacional para a compreensão, avaliação e otimização de seu desempenho. A utilização de ferramentas de simulação computacional, tem papel fundamental para compreender o comportamento do sistema e explorar

cenários com diferentes graus de complexidade, sem os altos custos associados à experimentação direta. Essas simulações são fundamentais para a compreensão e otimização do processo e realizar projeções e predições do desempenho do sistema em diferentes condições operacionais.

2. METODOLOGIA

A modelagem do sistema modelagem do sistema integrado reformador a vapor de etanol-MS-SOFC-queimador (*burner*), foi realizada usando o software Aspen Plus®. Para possibilitar a integração energética, foi estruturado um fluxograma modular completo, com balanços de massa e energia, contemplando reformador, ânodo e cátodo da SOFC, queimador pós-ânodo, trocadores de calor para as correntes de vapor/etanol e de ar, divisores/misturadores, reciclos e especificações de projeto para fechar automaticamente as variáveis de processo. No reformador foram consideradas as reações endotérmicas das reações de reforma a vapor do etanol, enquanto a SOFC foi representada por conversões eletroquímicas acopladas ao balanço global do ânodo, permitindo calcular a potência elétrica a partir do "H₂ equivalente" (H₂ + CO disponíveis na entrada de célula), definindo valores de voltagem de célula e valores de fator de utilização de combustível e de utilização de ar. Foram implementadas rotinas interativas para calcular a demanda de combustível, potência e restrições operacionais (incluindo as temperatura de operação do reformador e da SOFC compostas pelo ânodo e cátodo), além de estratégias de convergência com correntes de corte em reciclos e especificações sequenciais.

Duas rotas de integração energética foram comparadas dentro de uma mesma base de dados termodinâmica: (i) recuperação de calor do queimador para pré-aquecimento de vapor/etanol e ar, reduzindo a exigência de calor externo; e (ii) reciclo parcial proveniente do ânodo ao reformador, possibilitando o reaproveitamento de H₂, CO e vapor remanescentes e alterando favoravelmente a composição de alimentação da SOFC. Uma análise de sensibilidade sistemática mapeou o efeito da razão vapor/etanol, do fator de utilização de combustível e da temperatura da SOFC no desempenho tanto da SOFC quanto do sistema integrado. Para os cenários de integração energética simulados (com e sem reciclo) foram adotados como base de projeto os parâmetros listados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros adotados na simulação do sistema Reformador + SOFC + Burner com integração energética.

Parâmetro	Nomenclatura	Valor
Potência	Power	1 kW
Fator de utilização do ar	U_a	0.20
Fator de utilização de combustível	U_f	0.80
Temperatura do Reformador	$T_{reforma}$	700 °C
Temperatura da SOFC	T_{SOFC}	800 °C

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro cenário, a integração energética foi realizada sem reciclo da corrente de saída do ânodo. A alimentação adotou razão vapor/metano de 4:1. A temperatura de operação da SOFC foi fixada em 800 °C, obtida pelo ajuste da temperatura do ar de entrada até que $T_{SOFC} = 800$ °C fosse alcançada. A configuração do sistema está apresentada na Figura 1. Observou-se que a recuperação de calor nos trocadores RECUP-1 e RECUP-2 foi insuficiente para manter a temperatura necessária à reforma a vapor do metano. Como consequência, a temperatura do reator adiabático caiu para 509 °C, reduzindo a conversão e, portanto, o fornecimento de H_2 e CO para a SOFC. Para que a reforma seja conduzida à temperatura adequada de 700 °C, torna-se necessário o aporte de uma fonte externa de energia de 273 W, permitindo a operação do reator em regime isotérmico à 700 °C.

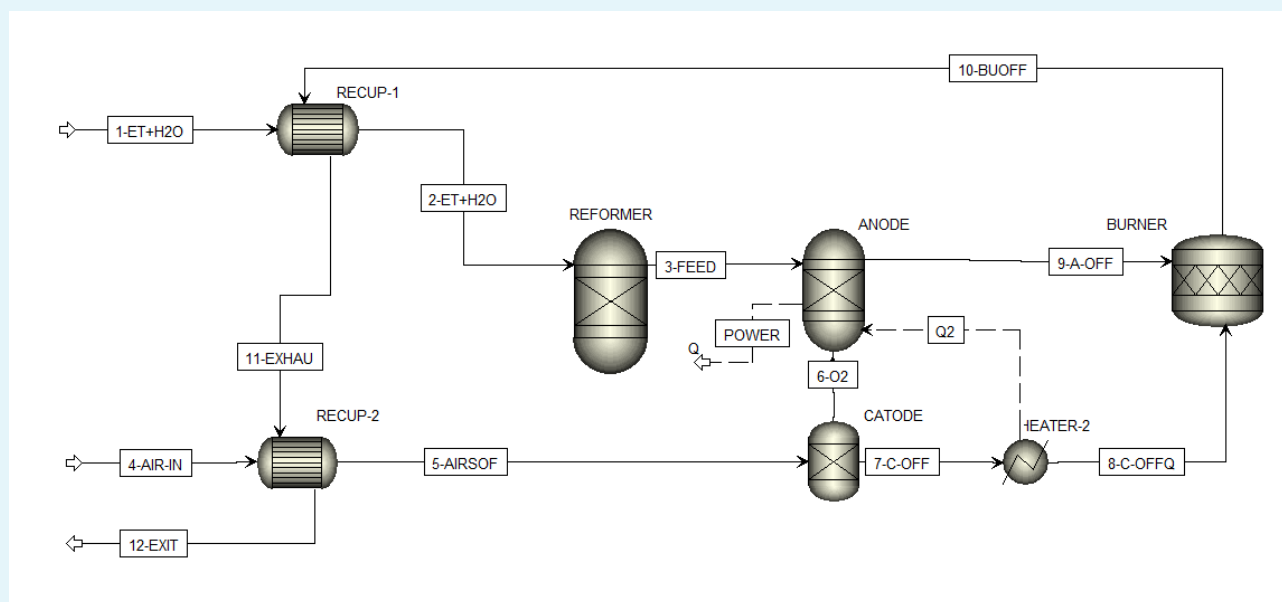


Figura 1: Sistema do processo de reforma do etanol integrado à SOFC e "burner" no Aspen Plus com integração energética sem reciclo para produção de 1 kW de potência.

A Figura 2 apresenta a configuração do cenário com reciclo parcial dos gases provenientes do ânodo para o reformador demonstrou um aumento substancial na conversão de etanol, em razão da presença de espécies reativas como hidrogênio, monóxido de carbono e vapor d'água nos gases reciclados. Esses compostos, ao serem reintroduzidos no reformador, aumentaram a eficiência das reações de reforma do etanol contribuindo para o aumento da produção de hidrogênio e, conseqüentemente, da geração de energia elétrica na célula. O reciclo também contribuiu de forma relevante para o suprimento de calor ao reformador, promovendo ganhos em eficiência térmica e simplificando o controle operacional. Para viabilizar a operação do reator adiabático de reforma a 700 °C, a fração de reciclo foi ajustada adequadamente. Essa estratégia assegurou a autosuficiência energética do sistema, eliminando a necessidade de aporte externo de calor e elevando a eficiência global. Além disso, a integração térmica garantiu maior estabilidade de temperatura ao longo do processo, aspecto essencial para preservar a integridade dos materiais cerâmicos e metálicos empregados nos stacks de MS-SOFCs.

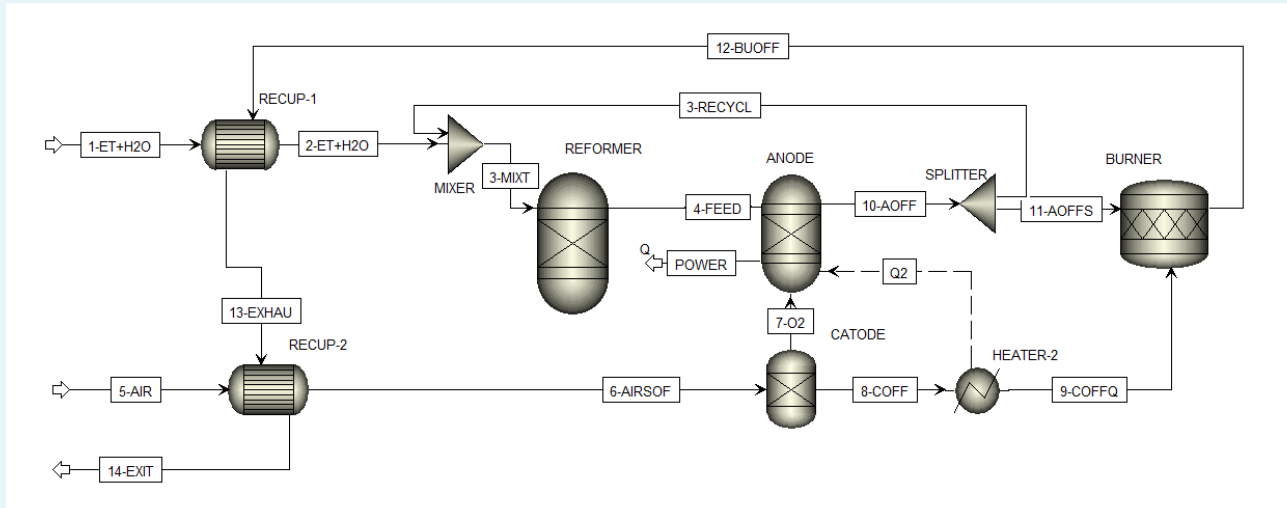


Figura 2: Sistema do processo de reforma do etanol integrado à SOFC e “after burner” no Aspen Plus. Cenários com integração energética com reciclo para produção de 1 kW e potência.

Em termos de desempenho, os resultados mostraram que, no sistema sem reciclo, a eficiência da célula SOFC, para uma voltagem de 0,7 V, foi de 43,1 %, enquanto a eficiência global do sistema atingiu 53 %. Já no sistema com reciclo, a eficiência da célula SOFC foi praticamente similar, de 42,1 %, porém a eficiência global aumentou significativamente, alcançando 61,4 %. Esses resultados evidenciam que o reciclo parcial dos gases provenientes da SOFC para o reformador exerce impacto direto e positivo na conversão do etanol, refletindo em um ganho expressivo na eficiência global do sistema.

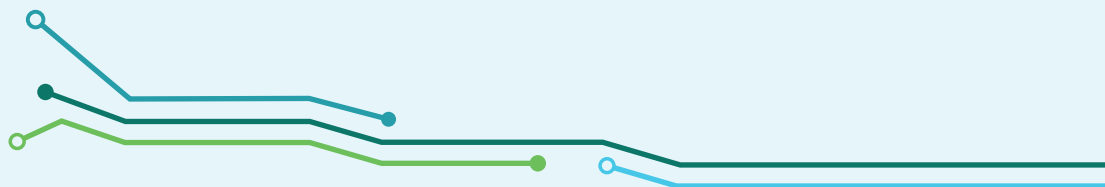
Nas análises de sensibilidade multivariada do cenário com reciclo, verificou-se que a eficiência da SOFC depende principalmente da utilização de combustível (U_f), enquanto a razão vapor/etanol e a temperatura têm pouca influência devido à limitação do modelo fixado em 0,7 V. Já a eficiência global do sistema mostrou-se sensível às três variáveis, sendo favorecida por maior utilização de combustível, menores temperaturas e menores razões vapor/etanol. Contudo, as simulações não consideraram perdas térmicas nem eficiências reais dos componentes, indicando a necessidade de análises mais completas e validação experimental para garantir a confiabilidade e escalabilidade dos resultados.

4. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a integração energética entre reformador a vapor de etanol, célula MS-SOFC e queimador é viável e pode alcançar elevados níveis de eficiência. A estratégia com reciclo parcial dos gases do ânodo mostrou-se superior, promovendo maior conversão do etanol, autosuficiência térmica do reformador e aumento expressivo da eficiência global do sistema. Embora a eficiência da SOFC tenha se mantido próxima em ambos os cenários, a análise de sensibilidade evidenciou que o desempenho global depende de forma significativa da utilização de combustível, da razão vapor/etanol e da temperatura de operação.

5. REFERÊNCIAS

- [1] MINH, NQ, TAKAHASHI T, *Science and Technology of Ceramic Fuel Cells*. Elsevier, 1995
- [2] SINGHAL S C, KENDALL K. *High-Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*. Elsevier, 2003
- [3] EGUCHI K, KOJO H, TAKEGUCHI T, KIKUCHI R, SASAKI K, Fuel flexibility in solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics*, v.152-153, p. 411-416, 2002.
- [4] LAGUNA-BERCERO MA, Recent advances in high-temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*, v. 203, p. 4-16, 2012.



IMAGEAMENTO DO SUBSOLO NO ENTORNO DO IPT UTILIZANDO MÉTODOS INDIRETOS DE INVESTIGAÇÃO

GOTÁVIO COARACY BRASIL GANDOLFO



¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT

E-mail para contato:
gandolfo@ipt.br

RESUMO – A investigação do subsolo por métodos indiretos é algo sempre complexo. O resultado de um trabalho desta natureza consiste na elaboração de modelos de subsuperfície que estejam em concordância com os dados coletados em campo. A experiência do intérprete destes modelos, neste caso, é determinante para que seja elaborado um modelo coerente com a realidade. Este trabalho apresenta os resultados de dois ensaios geofísicos (Eletrorresistividade e MASW) utilizados para investigar o subsolo nas proximidades do IPT. Ficou bem identificada uma camada de argila mole, existente abaixo do aterro superficial e acima de solo mais arenoso em profundidade. O mapeamento da ocorrência desta argila mole em subsuperfície pode ser útil para o entendimento de problemas de recalques e subsidências que afetam as construções assentadas sobre estes terrenos.

1 INTRODUÇÃO

No entorno do IPT, nas áreas topograficamente mais baixas, ocorre no subsolo uma camada de argila orgânica, de baixa capacidade de suporte, que pode eventualmente causar problemas em construções assentadas sobre o terreno onde ela ocorre. A identificação e o mapeamento desta argila mole, a determinação de sua espessura e de outros parâmetros relacionados à sua rigidez, pode ser útil para o entendimento de subsidências e recalques que estão ocorrendo no local.

A investigação do subsolo pode ser realizada por sondagens e por métodos indiretos, fornecendo informações que se complementam. A sondagem fornece uma informação pontual e precisa enquanto os métodos indiretos (geofísicos) propiciam uma visão das condições em subsuperfície de modo não invasivo e com uma cobertura mais ampla. Foram realizados dois ensaios geofísicos, a Eletrorresistividade (ER) o MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). A interpretação dos resultados utilizou, para a caracterização efetiva das camadas de solo existentes em subsuperfície, os dados de uma sondagem realizada nas proximidades. Os dados de ER e de MASW foram adquiridos ao longo de uma linha de 69 m de extensão, situada em frente à entrada principal do prédio da Poli Civil-USP, próximo ao edifício Adriano Marchini do IPT (Figura 1).

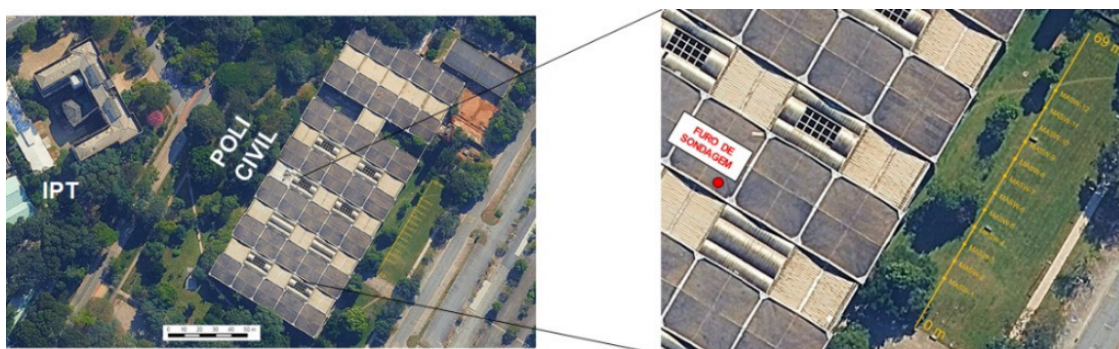


Figura 1: Linha onde foram realizados os ensaios geofísicos (ER e MASW) e a localização do furo de sondagem (realizado no interior do prédio da Poli Civil).

2. ENSAIOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS

2.1 Eletorresistividade (ER)

O método da Eletorresistividade (ER) utiliza a injeção de uma corrente elétrica (I) no subsolo por meio de dois eletrodos (A e B) e mede a diferença de potencial (DV) relacionada à passagem desta corrente, por meio de outros dois eletrodos (M e N). O parâmetro medido é a resistividade elétrica (r) dada pela equação (1), onde K representa um fator geométrico conhecido, relacionado à disposição dos quatro eletrodos no terreno no momento da medição.

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

São realizadas inúmeras medidas utilizando o quadripolo ABMN, tanto lateralmente, como em profundidade (Figura 2), que resultam em uma seção de dados que será posteriormente processada para gerar um modelo 2D com a distribuição do parâmetro r em subsuperfície. No ensaio de ER foram dispostos na linha 24 eletrodos espaçados de 3 m.

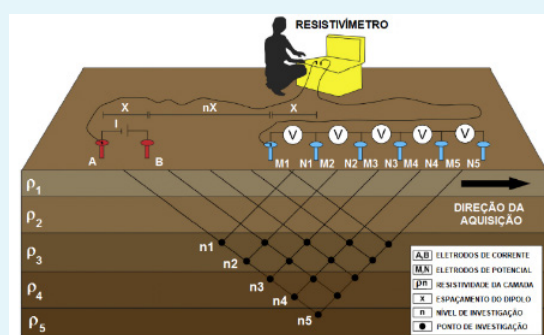


Figura 2: Ensaio geofísico de Eletorresistividade (ER) [1].

2.2 MASW

O MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) é um método sísmico que utiliza a propagação de uma onda de superfície (onda Rayleigh) para obter informações da distribuição (1D) da velocidade da onda de cisalhamento (V_s) ao longo de uma vertical em profundidade, em um ponto do terreno. A realização de diversos ensaios (informações 1D) ao longo de uma linha permitem a construção de uma seção 2D com a distribuição do parâmetro V_s em subsuperfície. A equação 2 mostra a relação de V_s com um importante parâmetro da geotecnia que é o módulo de rigidez ou de cisalhamento (G), onde ρ é a massa específica.

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

O ensaio é realizado posicionando 24 geofones espaçados de 1 m ao longo de uma linha. A onda sísmica é gerada por meio do impacto de uma marreta de 5 kg contra uma pequena placa metálica sobre o terreno (Figura 3). A onda gerada é captada pelos geofones e o sinal (sismograma) é registrado pelo sismógrafo.

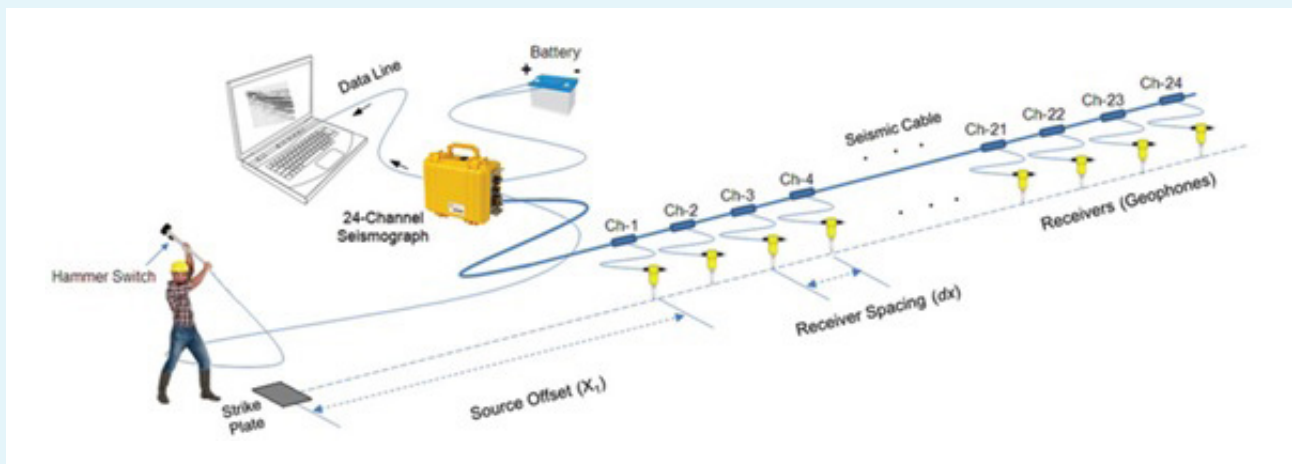


Figura 3: Ensaio sísmico MASW [2].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Processamento dos dados

De modo automatizado, cada quadripolo realizou uma medida (dois emitindo a corrente e outros dois medindo a diferença de potencial), totalizando 169 medições que gerou uma seção de resistividade elétrica aparente. Os dados foram processados por um software denominado Res2Dinv que utiliza um algoritmo fundamentado em uma técnica de otimização não linear por mínimos quadrados com vínculo de suavidade [3] e resulta, por processo de inversão de dados, em um modelo 2D de resistividade elétrica da subsuperfície (Figura 4).

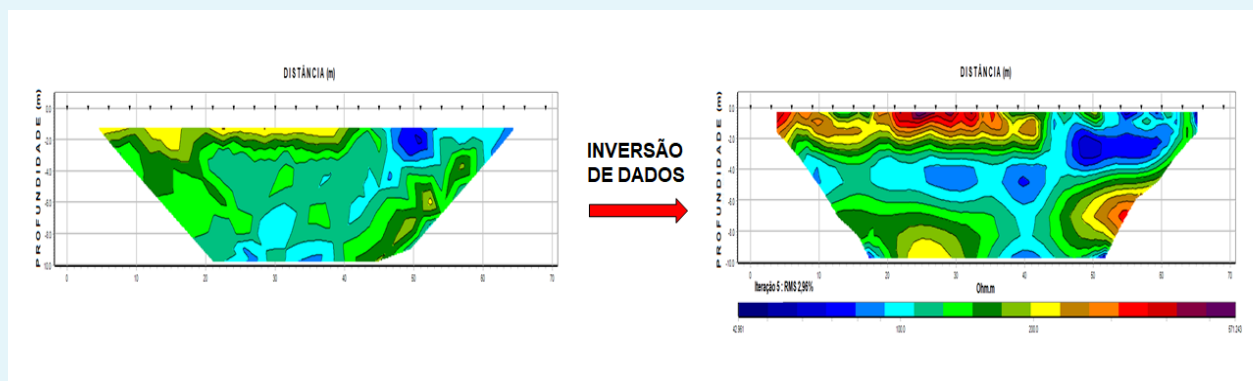


Figura 4: Seção de resistividade elétrica aparente (dado de campo) à esquerda e seção modelada 2D de resistividade elétrica, à direita.

O ensaio MASW é processado conforme os seguintes passos. Do sismograma obtido em campo (contendo os traços sísmicos em um domínio tempo x distância) é obtida por dupla transformada de Fourier uma imagem de dispersão (domínio velocidade x frequência) da qual é extraída uma curva. Por processos matemáticos de inversão, esta curva de dispersão resulta em um modelo 1D dos valores de V_s em função da profundidade ao longo de uma vertical (Figura 5).

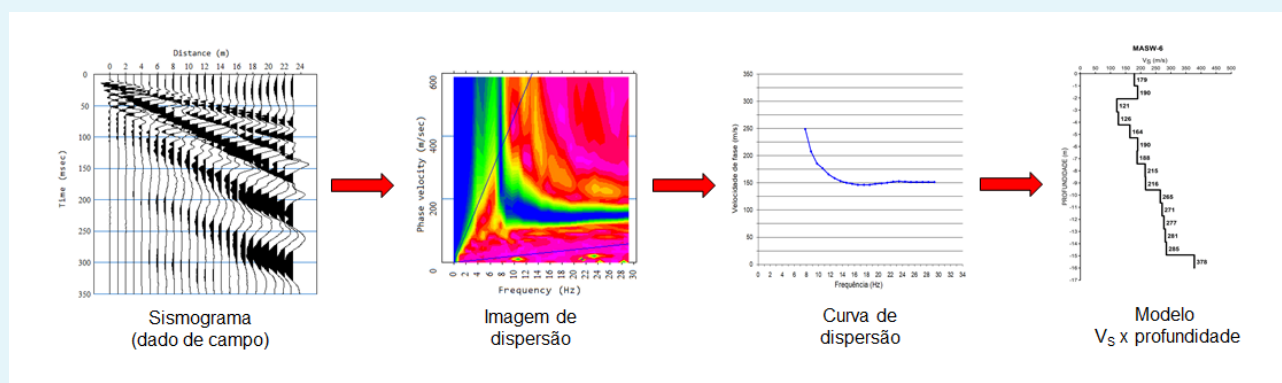


Figura 5: Etapas de processamento de um dado de MASW.

Na linha de 69 m de extensão foram realizados 12 ensaios MASW 1D espaçados de 4 m, o que possibilitou a elaboração de uma seção 2D com a distribuição de V_s em subsuperfície (Figura 6).

Os métodos indiretos fornecem modelos não únicos (diversos modelos podem explicar um único conjunto de dados de campo) e, assim sendo, são inerentemente ambíguos. Esta não unicidade da solução do problema pode ser, em parte, resolvida, caso esteja disponível algum tipo de informação direta do subsolo, como por exemplo os dados provenientes de um furo de sondagem.

No prédio da Poli Civil, por conta dos trabalhos de investigação em andamento, decorrente do aparecimento de diversas patologias nas estruturas de concreto, foi realizada uma sondagem à percussão, cuja descrição dos materiais atravessados e o resultado do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) é apresentada na Figura 7. Esta sondagem estava a aproximadamente 50 m de distância da linha onde foram realizados os ensaios geofísicos.

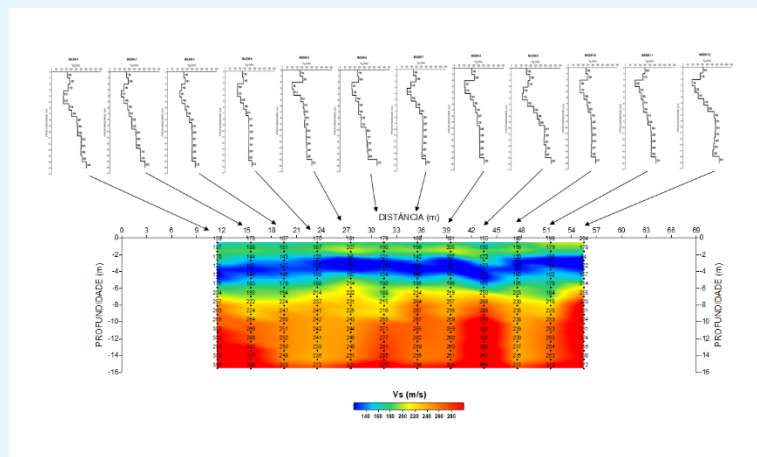


Figura 6: Seção MASW 2D.



Figura 7 – Descrição do furo de sondagem com dados do ensaio SPT realizado nas proximidades da linha geofísica.

3.2 Elaboração dos modelos de subsuperfície e interpretação dos dados

A Figura 8 apresenta os resultados dos ensaios geofísicos de ER e MASW e o modelo interpretado mostrando as camadas identificadas no subsolo. A posição do nível d'água (N.A.) está representada nas seções modeladas.

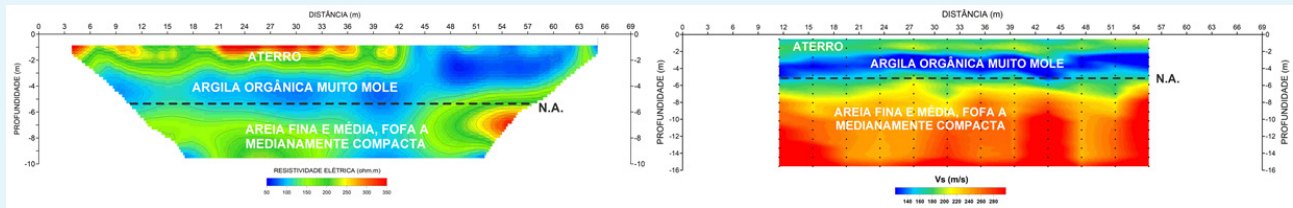


Figura 8 – Seções interpretadas de ER (esquerda) e de MASW (direita)

Existem correlações empíricas entre o parâmetro geofísico V_s e o N_{SPT} , um importante parâmetro geotécnico que avalia a resistência de um material geológico em subsuperfície. Estas relações possuem, em geral, o formato expresso pela equação 3.

$$V_s = A \cdot N_{SPT}^B \quad (3)$$

Para elaboração de uma “seção geotécnica” (com o parâmetro N_{SPT}) obtida a partir da “seção geofísica” (com o parâmetro V_s), considerou-se relações empíricas existentes na literatura para os materiais do subsolo identificados pela sondagem: aterro, argila mole e areia. Estas correlações são apresentadas nas equações 4, 5 e 6.

$$\text{Aterro: } V_s = 155,1 \cdot N_{SPT}^{0,17} \quad (\text{Pitikilas et al., 1992}) \quad (4)$$

$$\text{Argila mole: } V_s = 165,7 \cdot N_{SPT}^{0,19} \quad (\text{Pitikilas et al., 1992}) \quad (5)$$

$$\text{Areia: } V_s = 79,0 \cdot N_{SPT}^{0,434} \quad (\text{Hanumantharao e Ramana, 2008}) \quad (6)$$

A Figura 9 apresenta a seção de N_{SPT} gerada pelas correlações empíricas.

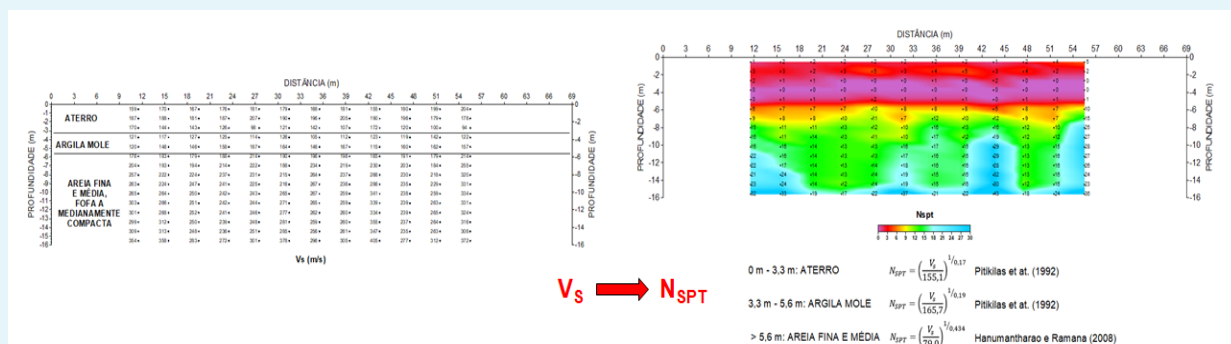


Figura 9 – Seção com valores do NSPT convertida a partir dos valores de VS.

Por fim, para validação dos resultados obtidos de um ensaio indireto (geofísico) com as informações diretas obtidas pela sondagem, foram comparados os valores de N_{SPT} convertidos dos 12 ensaios MASW com os valores do N_{SPT} obtido da sondagem (Figura 10).

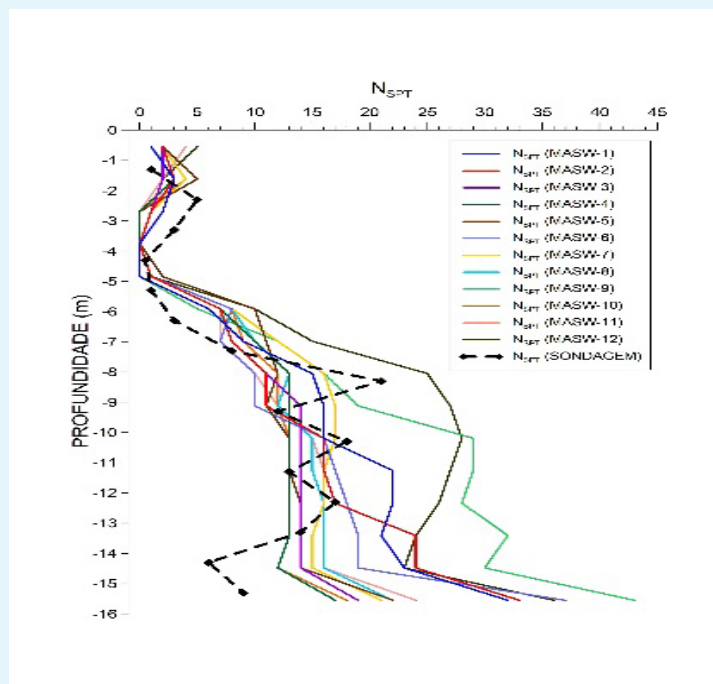


Figura 10 – Comparação dos valores do N_{SPT} convertidos a partir de V_s (ensaio MASW) com os valores obtidos da sondagem.

CONCLUSÃO

Os ensaios geofísicos (ER e MASW), por meio dos modelos de subsuperfície obtidos do processamento dos dados, juntamente com os dados diretos de uma sondagem, possibilitaram uma boa caracterização do subsolo no entorno do IPT identificando as camadas de aterro (superior), argila mole (intermediária) e de areia fina a média (subjacente). A comparação dos valores do N_{SPT} , um índice de resistência dos solos (obtidos pela sondagem), com os valores do N_{SPT} convertidos a partir dos valores de V_s (obtidos do ensaio sísmico MASW), apresentaram uma boa aderência, mostrando que os ensaios indiretos e não invasivos, produzem dados que, devidamente processados e interpretados, podem fornecer uma bom modelo do imageamento da subsuperfície e com informações relativamente quantificadas e com um bom grau de precisão.

4. REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA, L.A.P., GANDOLFO, O.C.B. Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente: manual de boas práticas. São Paulo: ABGE, 2021.
- [2] Park, C., Richter, J., Rodrigues, R., & Cirone, A. MASW applications for road construction and maintenance. The Leading Edge, 37(10), 724–730, 2018.
- [3] Res2Dinv (v.5.0) – Rapid 2D Resistivity & IP inversion, 2023.

METODOLOGIA INTEGRADA PARA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA APOIADA POR GPT

AF HELENO¹, AC de BRITO¹, HF SAAR¹, TY AOYAGI¹,
FS SILLES¹, EM SALES¹, CMF da SILVA¹



¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

E-mail para contato:
aheleno@itp.br

RESUMO – As revisões bibliográficas sistemáticas demandam elevado rigor metodológico e esforço de execução. Este artigo propõe uma metodologia que integra ferramentas digitais como Parsifal, Bibliometrix e GPT-4, aliadas a scripts em Python e R para automação e rastreabilidade das revisões bibliográficas. Uma aplicação do método realizada possibilitou a redução de 1.247 registros para 118 artigos priorizados, reduzindo o trabalho manual em cerca de 90%. A extração assistida por GPT-4 alcançou acurácia entre 70% e 91%, enquanto o método ELECTRE TRI proporcionou a adoção de critérios objetivos de priorização. Os resultados evidenciam ganhos significativos de eficiência no processamento de artigos, extração estruturada de informações e redução do tempo de análise sem comprometer a representatividade do conjunto de artigos analisado.

1 INTRODUÇÃO

As revisões bibliográficas sistemáticas são mais eficientes do que métodos tradicionais, pois proporcionam maior rigor metodológico para localizar, selecionar e analisar evidências científicas relevantes para responder uma determinada pergunta de pesquisa. Além disso, reduzem vieses e garantem análises mais abrangentes do estado da arte [1]. O processo, contudo, apresenta várias etapas, incluindo planejamento e documentação, demandando esforço significativo no cumprimento do protocolo de busca. Para otimizar e aumentar a eficiência do processo, este trabalho propõe um método que adapta os princípios gerais propostos em [1] integrando ferramentas digitais, como Parsifal [1], Bibliometrix [2] e Grandes Modelos de Linguagem (LLMs) [3]. Aliadas a scripts em Python e R, essas ferramentas proporcionaram automação de procedimentos, com rastreabilidade e padronização dos resultados, estruturando a revisão em três etapas principais: Planejamento, Execução e Elaboração de Relatório contendo a indicação dos principais resultados obtidos a partir dos artigos selecionados.

2 METODOLOGIA

A metodologia possui três etapas principais, conforme ilustrado na Figura 1: (i) Planejamento, que define o protocolo de busca e critérios de inclusão ou exclusão de artigos (item 2.1); (ii) Execução, que abrange a busca, a triagem e a extração assistida por LLM (item 2.2); e (iii) Elaboração de relatório, para a consolidação dos resultados e das análises bibliométricas (item 2.3).

2.1 Planejamento

Na fase inicial de planejamento, a revisão bibliográfica é conduzida segundo a metodologia proposta em [1], que orienta a elaboração de um protocolo com a definição das questões de pesquisa, a formulação de palavras-chave e comandos de busca, a seleção das bases de dados mais relevantes e os critérios de elegibilidade. Esse processo delimitou o escopo da revisão e contou com o uso do Parsifal para apoiar a construção colaborativa do protocolo, assegurando transparência, rastreabilidade e registro sistemático das decisões (Figura 1).

2.2 Execução

Nessa etapa são feitas a busca, a filtragem, a classificação e extração de informações. O comando de busca é aplicado às bibliotecas digitais escolhidas para a realização das buscas por estudos. Os registros importados em formato BibTeX para o Parsifal, passam por uma filtragem inicial denominada Fase 1 (atividade 4 da Figura 1), que incluiu análise de título, palavras-chave, resumos e remoção de artigos duplicados. Todo o processo ocorre de forma colaborativa, assegurando rastreabilidade das exclusões e justificativas, conforme critérios estabelecidos no planejamento.

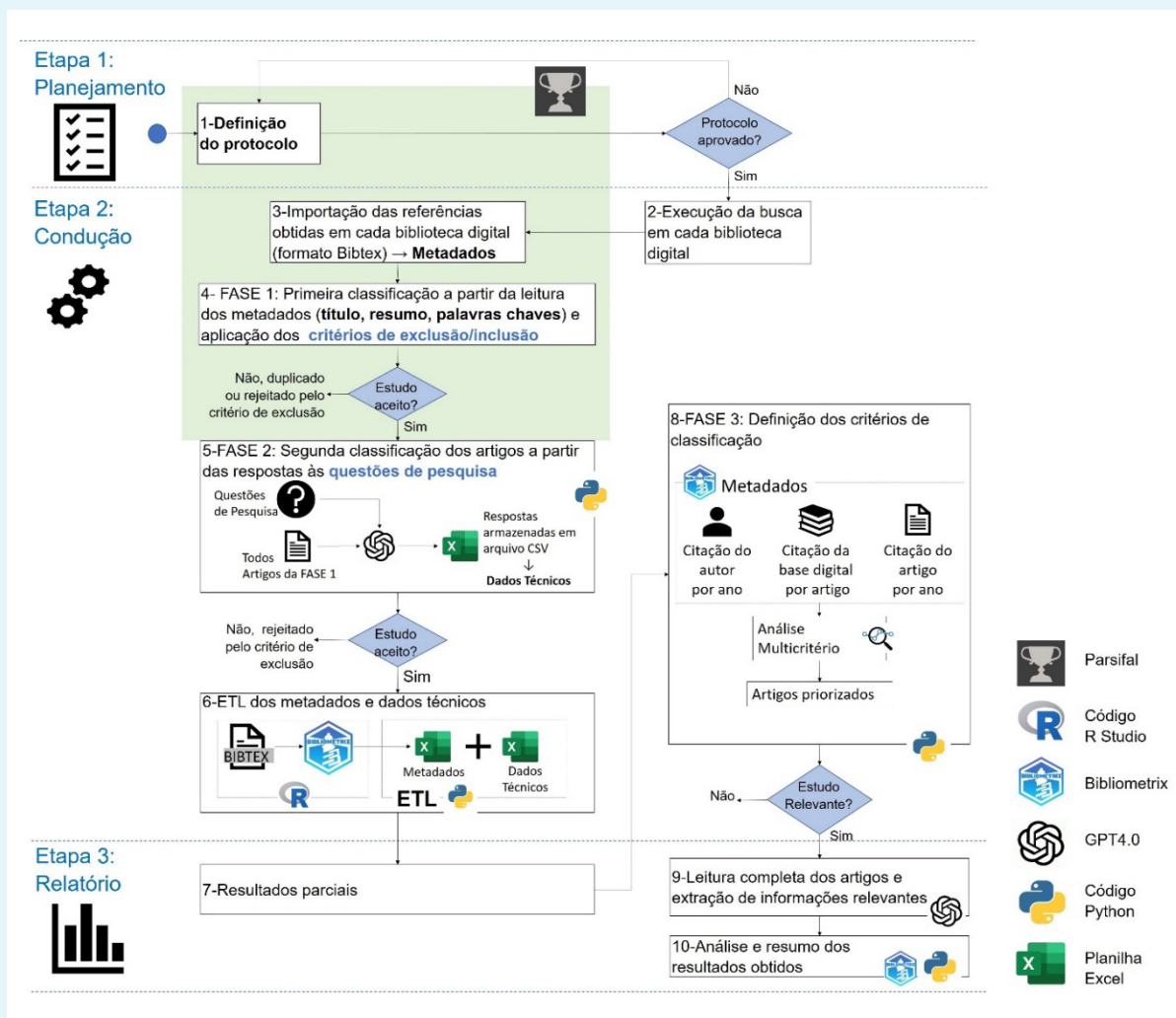


Figura 1: Fluxograma do processo de revisão e integração das ferramentas digitais.

A Fase 2, segunda etapa de filtragem (atividade 5 da Figura 1), consiste na extração assistida pelo GPT-4 com *prompts* derivados das questões de pesquisa. Um conjunto de artigos, que foram previamente analisados, **é usado para refinar os prompts** e padronizar as repostas geradas pelo GPT-4, garantindo consistência antes da aplicação em todo o conjunto de artigos selecionados na Fase 1. Os resultados são estruturados em dicionários de dados, armazenados em CSV e organizados em um *dataset* contendo dados técnicos.

Na sequência, a atividade 6 compreende a etapa de extração, transformação e carregamento (ETL) dos dados dos artigos selecionados. Combinam-se os dados técnicos obtidos via GPT-4 com os metadados (autores, instituições, palavras-chave, citações e indicadores de produção científica) extraídos pela ferramenta Bibliometrix da lista de artigos em formato BibTeX, viabilizando as análises bibliométricas iniciais.

Ainda na fase de execução, realiza-se a Fase 3 de filtragem (atividade 8, Figura 1), destinada a classificar os artigos mais representativos para leitura completa e extração de informações detalhadas. Emprega-se uma análise multicritério (MCDA) pelo método ELECTRE TRI [4], fundamentada em critérios normalizados e pesos para indicadores bibliográficos. Utilizam-se três parâmetros: (i) número de citações do artigo por ano, (ii) número de citações da base por artigo e (iii) número de citações do autor por ano. O resultado consiste na divisão em duas classes de artigos: priorizado e não priorizado.

Por fim, todo o processo é automatizado por meio de *scripts* em Python e R, responsáveis pela importação de dados, chamadas à API do GPT-4, normalização terminológica e integração dos resultados técnicos e bibliométricos. A rastreabilidade é garantida por *logs* de execução, *checkpoints* em planilhas (CSV/Excel) e controle de versão.

2.3 Relatório

A etapa de elaboração do relatório é estruturada em dois níveis: (i) um panorama técnico-bibliométrico, produzido logo após a etapa de ETL com um número significativo de artigos; e (ii) análises aprofundadas dos artigos priorizados após a terceira fase de filtragem. Nesse segundo nível, extraem-se informações adicionais a partir de fichas de leitura padronizadas (informações técnicas adicionais, resultados, aplicações futuras e desafios), combinando extração assistida pelo GPT-4 com a leitura completa dos artigos. As visualizações e tabelas são geradas a partir do *dataset* integrado (utilizando-se Python e R) e consolidadas em planilhas para apoiar a interpretação dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método proposto foi aplicado em uma revisão sistemática sobre a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) para detecção de características geológicas em dados sísmicos, cujos resultados parciais foram publicados em [5]. A busca inicial nas bases Scopus, Web of Science e IEEE Xplore, realizada em março de 2024, retornou 1.247 registros. Após remoção de artigos duplicados e aplicação dos critérios de exclusão na Fase 1 (triagem por título/resumo no Parsifal), foram selecionados 275 artigos para extração de **informações técnicas**. A Tabela 1 apresenta a evolução quantitativa dos artigos ao longo das três fases de filtragem, demonstrando a efetividade do *pipeline* proposto em concentrar esforços nos artigos mais relevantes.

Tabela 1: Evolução quantitativa dos artigos ao longo do processo de revisão bibliográfica.

Fase	Etapa	Artigos	Critério Principal	Ferramenta
-	Busca inicial	1.247	Comandos de busca	Bibliotecas digitais
1	Triagem colaborativa	275	Título/resumo/ duplicados	Parsifal
2	Extração estruturada	237	Informações técnicas	GPT-4 + Python
3	Priorização multicritério	118	Relevância bibliométrica	ELECTRE TRI
-	Leitura completa	118	Análise aprofundada	Extração manual + GPT-4

Para a Fase 2, desenvolveu-se um *prompt* estruturado derivado das questões de pesquisa. O GPT-4 foi instruído a extrair, de cada artigo, as seguintes informações em formato de dicionário de dados:

- Técnicas de *Deep Learning* e *Machine Learning* utilizadas no artigo;
- Atributos sísmicos utilizados para testar ou validar os modelos de *Deep learning* e *Machine Learning*;
- Dados sísmicos de campo ou sintéticos e em qual etapa foi utilizado (treinamento, teste ou validação);
- Ambiente deposicional contendo o tipo de rocha e o tipo de ambiente;
- Tipos de feições geológicas extraídas a partir da aplicação das técnicas de *Deep Learning* e *Machine Learning*.

Para validar a qualidade das extrações automáticas realizadas, foi conduzido um processo de verificação humana utilizando como métrica a acurácia. Foram analisados inicialmente 275 artigos, nos quais, para cada questão do protocolo de extração, contabilizou-se a ocorrência de erros. Respostas com erros foram consideradas incorretas, independentemente da severidade ou amplitude dos erros. Foram identificados diferentes tipos de erros, tais como falhas de interpretação semântica, omissões de informações essenciais e extrações incorretas de trechos de texto, e erros sistemáticos na obtenção de endereços na internet (*url*) relativos a conjuntos de dados sísmicos disponíveis. A Tabela 2 apresenta os valores da acurácia obtidos após esta etapa de validação.

Tabela 2: Métricas de validação da extração assistida por GPT-4.

Informação Extraída	Acurácia (%)
Técnicas de IA	80.0
Atributos sísmicos	91.3
Dados sísmicos de campo	70.2
Dados sísmicos sintéticos	76.0
Ambiente deposicional	70.9
Tipos de feições	74.2

A partir dos critérios de exclusão previamente definidos no protocolo de revisão sistemática e descritos em resultados parciais publicados em [5], foram eliminados do conjunto de análise os artigos que se mostraram fora do escopo temático da pesquisa, resultando em um conjunto final de 237 artigos utilizados nas atividades subsequentes.

A Fase 3 aplicou o método ELECTRE TRI para classificar esses artigos em duas categorias: priorizados, cuja leitura completa era obrigatória, e não priorizados, indicados apenas para consulta complementar. Com base nos critérios bibliométricos previamente definidos, 105 artigos (44,3%) foram classificados como priorizados. A distribuição anual dos artigos priorizados evidencia uma tendência crescente de interesse no tema ao longo da última década. Observou-se produção pontual em anos anteriores, como 2002, 2009 e 2015 (cada um com 0,95% dos artigos), e um aumento gradual entre 2016 (1,90%) e 2017 (2,86%). A partir de 2018, nota-se uma intensificação significativa das publicações, com 9,52% em 2018, seguido de um pico em 2019 e 2022 (ambos com 20%), além de contribuições expressivas em 2020 (14,28%), 2021 (13,33%) e 2023 (12,38%). Em 2024, embora apenas 2,85% dos artigos tenham sido inicialmente priorizados, destaca-se que critérios puramente bibliométricos tendem a penalizar artigos recentes, que ainda não acumulam tempo suficiente para receber citações e consolidar impacto científico. Para mitigar essa limitação metodológica e evitar o viés temporal, todos os artigos publicados em 2024 foram incluídos na etapa de leitura completa independentemente da classificação gerada pelo ELECTRE TRI. Assim, o total de estudos selecionados para a próxima etapa aumentou de 105 para 118 artigos, garantindo a relevância temática atual.

A aplicação do método ELECTRE TRI permitiu uma seleção criteriosa dos artigos, reduzindo de forma substancial o conjunto inicial de 237 publicações para 118 a serem submetidas à leitura completa. Essa redução resultou em um ganho significativo de eficiência, uma vez que diminuiu o tempo necessário para a etapa de avaliação integral sem comprometer a representatividade do conjunto de artigos analisado. Adicionalmente, empregou-se o modelo GPT-4 como ferramenta de apoio metodológico para a extração padronizada de informações dos artigos priorizados, incluindo desafios identificados pelos autores e direções para pesquisas futuras. Essa abordagem híbrida, combinando análise bibliométrica e técnicas de inteligência artificial, contribuiu para aumentar a consistência dos dados extraídos e favorecer a organização sistemática dos resultados.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método integrado para revisões bibliográficas sistemáticas que combina ferramentas digitais (Parsifal e Bibliometrix), inteligência artificial (GPT-4) e *scripts* de automação em Python e R, demonstrando eficácia na otimização do processo sem comprometer o rigor metodológico.

A aplicação prática em uma revisão sobre técnicas de IA empregadas para detecção de características geológicas em dados sísmicos evidenciou resultados expressivos: o *pipeline* estruturado reduziu de 1.247 registros para 118 artigos priorizados (redução de aproximadamente 90% no trabalho manual), com acurácia de extração automática entre 70% e 91%. A integração com análise bibliométrica (ELECTRE TRI) proporcionou critérios objetivos de priorização, enquanto a rastreabilidade assegurou transparência e reprodutibilidade.

Como limitações, reconhece-se a dependência do refinamento de *prompts* e validação técnica especializada, além do viés temporal das métricas bibliométricas. Para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de estratégias de validação mais robustas, incluindo métricas objetivas para classificação de erros quanto à natureza e severidade, técnicas de *ensemble* com múltiplos modelos e mecanismos de verificação cruzada automática, consolidando a integração entre ferramentas tradicionais e tecnologias emergentes para modernização das práticas de revisão bibliográfica sistemática.

5 REFERÊNCIAS

- [1] KITCHENHAM B. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. EBSE Technical Report EBSE-2007-01, Version 2.3, Keele University and University of Durham, 2007.
- [2] ARIA M, CUCCURULLO C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017. doi:10.1016/j.joi.2017.08.007.
- [3] OpenAI. (2023, March 14). *GPT-4*. Retrieved October 1, 2025, from <https://openai.com/pt-BR/index/gpt-4-research/>.
- [4] GOVINDAN K, JEPSEN MB. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, v. 250, n. 1, p. 1-29, 2016. doi:10.1016/j.ejor.2015.07.019.
- [5] SILVA CMFD, HELENO AF, SALES EM, SAAR HF, CUSTODIO GT, AOYAGI TY, SILLES FS, SILVA CLAD, NETTO LG, GUERRA NFDS, GANDOLFO OCB, GAMBA CTDC, VIRISSIMO DB, RUBO RA. Identifying AI Techniques for Detecting Geological Features in Seismic Data: Literature Review Method with GPT-4. *European Association of Geoscientists & Engineers, 86th EAGE Annual Conference & Exhibition*, v. 2025, p. 1-5, 2025. doi:10.3997/2214-4609.2025101296.

MODELAGEM DE CADEIAS DE SUPRIMENTO DE GÁS LIQUEFEITO RENOVÁVEL NO BRASIL VIA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA E ESTIMATIVA DE CRÉDITOS DE DESCARBONIZAÇÃO

LT BRUSCHI¹, L KULAY¹, M TELES DOS SANTOS¹



¹ Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: larissabruschi@usp.br

RESUMO – Este trabalho propõe uma metodologia integrada para otimizar a cadeia de suprimentos de gás liquefeito renovável (GLR) no Brasil, considerando objetivos econômicos e métricas ambientais. O modelo utiliza programação linear inteira mista para determinar a localização e capacidade de unidades de conversão, centros de armazenamento e rotas logísticas, sob restrições de oferta de biomassa, demanda de GLR e imposições financeiras. A intensidade de carbono do GLR e os créditos de descarbonização (CBIOS) comercializados são estimados pelo método Renovacalc, integrado ao modelo de otimização. Como estudo de caso, a produção de GLR a partir de resíduos é avaliada por meio das rotas glicerol e gaseificação. Os resultados indicam que a rota de glicerol é selecionada como ótima, mas exige preço de venda do GLR 80% superior ao do GLP para alcançar valor presente líquido do projeto positivo. A gaseificação de bagaço de cana tornase competitiva quando o rendimento de conversão aumenta, beneficiando-se de menor intensidade de carbono e maior receita de CBIOS. A análise destaca a importância de integrar modelagem de cadeia de suprimentos, simulação de processos e avaliação ambiental para orientar a implantação de combustíveis renováveis.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de cadeias de suprimento de combustíveis renováveis requer a integração de modelos de otimização, simulações de processo e avaliação de ciclo de vida para orientar decisões estratégicas em ambientes incertos. No caso do gás liquefeito renovável (GLR), substituto direto do gás liquefeito de petróleo (GLP), a configuração ideal da rede depende de múltiplos fatores: localização das matérias-primas, tecnologias de conversão, rotas de distribuição, políticas de créditos de carbono e variações de mercado. Estudos prévios mostram que a modelagem matemática combinada com dados de simulação e indicadores de sustentabilidade permite captar *trade-offs*, evidenciando que o desenho da rede influencia tanto a viabilidade econômica quanto as emissões de carbono [1,2].

Motivado por esse contexto, este trabalho desenvolve um modelo de programação linear inteira mista (MILP) acoplado à estimativa de créditos

de descarbonização gerados (CBIOS) [3] para projetar a cadeia de suprimento de GLR no Brasil. O estudo de caso considera a produção de GLR a partir de resíduos industriais e agrícolas, com destaque para o glicerol, coproduto da indústria de biodiesel, e para resíduos lignocelulósicos como bagaço de cana-de-açúcar, palhada de soja e casca de arroz, amplamente disponíveis no Brasil. O bagaço de cana se destaca pela abundância e infraestrutura já existente, sendo gerado em larga escala pela indústria sucroenergética nacional; a palhada de soja é um subproduto agrícola de elevado potencial, dada a posição do país como maior produtor mundial de soja; e a casca de arroz representa um resíduo expressivo do beneficiamento do grão, ainda com aproveitamento limitado.

2 METODOLOGIA

O estudo propõe um modelo MILP (programação linear inteira mista) para o projeto ótimo de cadeias de suprimento de GLR no Brasil. A rede é representada por uma superestrutura de quatro níveis de decisão: suprimento de biomassa ($o \in O$), unidades de produção ($p \in P$), centros de armazenamento ($s \in S$) e mercados finais ($m \in M$). Cada biomassa $b \in B$ está disponível em um nó de origem o , sendo transferido para uma planta p que utiliza uma tecnologia de conversão $z \in Z$. O modelo é multi-período ($t \in T$) e define variáveis de fluxo para a compra de biomassa, envio de produto para armazenamento e distribuição ao mercado, além de variáveis binárias que determinam a instalação e o tipo de tecnologia em cada local. A formulação inclui balanços de massa para cada material, restrições de capacidade, limite de oferta de biomassa, e linearização de custos de investimento dependentes da capacidade. Os custos considerados abrangem aquisição de matériaprima, utilidades e insumos, transporte, armazenamento, tributos e investimento de capital [3]. Para integrar desempenho ambiental, implementouse um módulo de avaliação do ciclo de vida baseado na metodologia *Renovacalc* [4], que quantifica a intensidade de carbono de cada rota. Os CBIOS gerados pela substituição de LPG são determinados pela diferença entre as emissões fósseis e renováveis e comercializados no mercado. O objetivo da otimização é maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) ao longo do horizonte de 20 anos, considerando receitas de GLR, coprodutos, venda de CBIOS e custos totais descontados pela taxa de juros. Para o estudo de caso foram consideradas as rotas de conversão de glicerol e gaseificação, descritas no trabalho de simulação de Ramirez, 2023 [5]. As matérias-primas usadas foram glicerol, palhada de soja, bagaço de cana e casca de arroz. O mercado a ser atendido compreende uma parcela do mercado empresarial de consumo de GLP, a ser substituído 50% por GLR. O modelo foi implementado em linguagem Python e resolvido pelo solver Gurobi, envolvendo 486.123 equações, 688.303 variáveis contínuas e 29.930 variáveis binárias. As soluções ótimas foram obtidas com um gap de 0,01%, em uma CPU Intel® Core™ i7-1165G7 de 11ª geração de 2,80 GHz com 12 GB de RAM.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do modelo apontam que a rota de glicerol foi selecionada, embora a viabilidade econômica dependa do preço de venda do GLR 80% superior ao do GLP. Mesmo ao aumentar a substituição do mercado de GLP de 50% para 100%, o preço mínimo de venda continuou exigindo um acréscimo de 80%, evidenciando que esse preço é determinante para a atratividade da tecnologia. Entretanto, a ampliação do mercado atendido elevou o VPL, pois os mercados de GLR mais próximos ao centro de produção foram atendidos completamente, reduzindo os custos de transporte. Para a substituição total, o VPL calculado no modelo foi três vezes superior ao obtido para 50% de penetração de mercado. A rota com glicerol mostrou-se mais vantajosa, apesar de usar um resíduo com maior valor agregado, devido ao rendimento maior (29% massa) em comparação com a rota de gaseificação, cujo rendimento está entre 1% e 2% massa. A rota de gaseificação só se torna competitiva e escolhida pela otimização quando o rendimento atinge 10% em massa na análise de sensibilidade, valores reportados na literatura [6]. Embora os resíduos lignocelulósicos usados na gaseificação tenham custo de aquisição menor do que o glicerol, essa rota apresentou maior consumo de eletricidade e utilidades, elevando os custos operacionais, como apresentado na Figura 1.

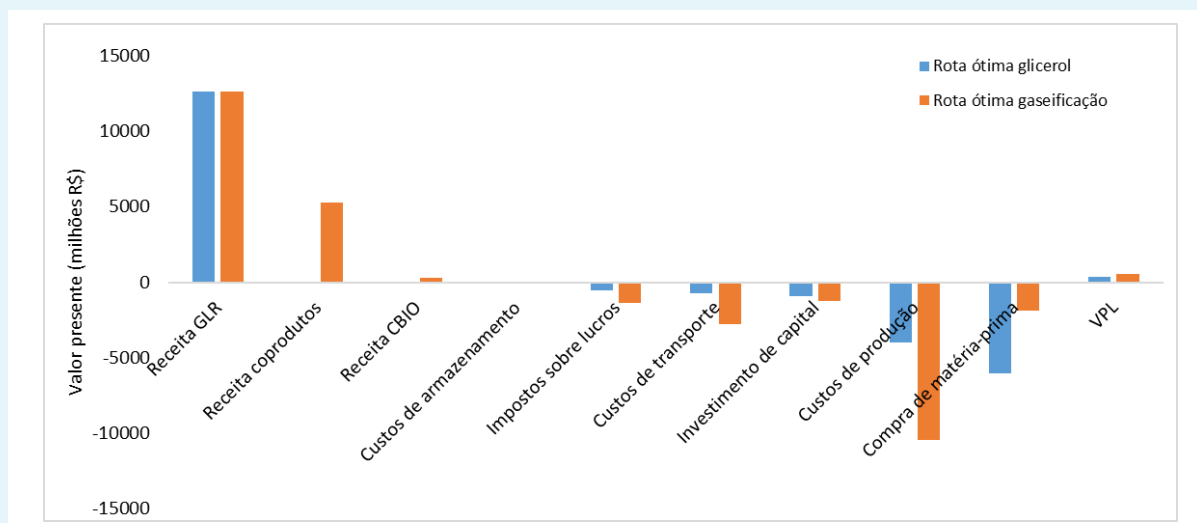


Figura 1: Comparação da composição do valor presente líquido para topologia ótima na exploração de GLR para substituição de 50 % de demanda de GLP para os cenários de rota glicerol e rota gaseificação (conversão mássica 10 %)

Na rota de glicerol, os custos de aquisição da matériaprima são o principal componente negativo, enquanto, na rota de gaseificação, os investimentos em capital e os custos operacionais são os maiores custos. Esses resultados reforçam a importância de considerar simultaneamente preços de venda, rendimento tecnológico e custos logísticos na avaliação de cadeias de suprimentos de biocombustíveis.

Na rota de gaseificação analisada, a biomassa selecionada foi o bagaço de cana-de-açúcar, resíduo abundante no Brasil. Além da receita proveniente do GLR, a rota de gaseificação inclui receita associada à venda de um coproduto, representado por uma corrente de hidrocarbonetos pesados. Outro aspecto positivo é a menor intensidade de carbono do GLR obtido via gaseificação (Tabela 1), o que aumenta a quantidade de CBIOs emitidos e gera receita adicional. Essa diferença de emissões está relacionada ao uso de hidrogênio: na rota de glicerol, a transformação de glicerol em propano exige gás hidrogênio para remover os átomos de oxigênio, produzido a partir de fontes fósseis, elevando a pegada de carbono do produto.

Tabela 1: Indicadores econômicos e ambientais para as topologias otimizadas considerando preço de venda de GLR 80% superior em relação ao GLP, para conversão base na rota Glicerol e conversão mínima competitiva para rota Gaseificação de bagaço de cana

Rota otimizada	Glicerol	Gaseificação
VPL (milhões R\$)	342	551
Custo Investimento (milhões R\$)	897	2.750
Taxa Interna de Retorno (%)	9	6
Ano de retorno dos investimentos	13°	15°
Intensidade de carbono do GLR (gCO ₂ eq/MJ)	83,5	4,4

A Tabela 1 mostra que a rota de gaseificação apresenta um VPL maior do que a rota de glicerol, consequência das receitas de coprodutos e CBIOS. No entanto, o investimento de capital da gaseificação é três vezes maior, resultando numa taxa interna de retorno inferior e num prazo de retorno dos investimentos mais longo. Esse contraste mostra que, embora a gaseificação possa gerar maior lucro líquido ao longo da vida útil do projeto, ela demanda um desembolso inicial superior e retorna o capital mais lentamente. A rota de glicerol, por outro lado, oferece uma taxa interna mais atrativa e menor período de retorno.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que o modelo MILP integrado à avaliação de ciclo de vida e à monetização de CBIOS é uma ferramenta robusta para apoiar a expansão do GLR no Brasil. A rota de glicerol apresentou melhor desempenho econômico devido ao alto rendimento de conversão e menor capital inicial, exigindo preços de venda cerca de 80 % superiores aos do GLP. A gaseificação de bagaço de cana mostrou-se competitiva apenas quando o rendimento de conversão é aumentado, mas apresenta menor intensidade de carbono e maior geração de CBIOS. Conclui-se que modelos integrados, como o proposto, são úteis para avaliar esses cenários e orientar investimentos, pois capturam interações complexas entre logística, tecnologia, mercado e ambiente.

5 AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores também agradecem à Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP) (Projeto nº 3781) pelo apoio financeiro.

6 REFERÊNCIAS

- [1] THEOZZO B, TELES DOS SANTOS M, A MILP framework for optimal biorefinery design that accounts for forest biomass dynamics. *Comput. Chem. Eng.*, v. 146, 107201, 2021.
- [2] MACHADO RL, ABREU MR, Multi-objective optimization of the first and second-generation ethanol supply chain in Brazil using the water-energy-food-land nexus approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, v. 193, 114299, 2024.
- [3] BRUSCHI LT, KULAY L, TELES DOS SANTOS M, Supply chain optimization for biopropane production in Brazil. *Comput. Aided Chem. Eng.*, v. 53, 3361–3366, 2024.
- [4] MATSUURA M, SCACHETTI M, CHAGAS M, SEABRA J, MOREIRA M, BONOMI A, BAYMA G, PICOLI J, MORANDI M, RAMOS N, et al., Nota técnica – RenovaCalcMD: Método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no Programa RenovaBio. Relatório Técnico, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2018.
- [5] RAMIREZ BB, Modelagem de processos de produção de BioGLP. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.
- [6] JOHNSON E, Process Technologies and Projects for BioLPG. *Energies*, v. 12, n. 2, 250, 2019.

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA CONVERSÃO CATALÍTICA DE CO₂ EM METANOL EM REATORES TUBULARES

GM FERRARI^{1,2}, ABM CANSIAN², P VIDINHA²



¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química (PQI)

² Universidade de São Paulo, Instituto de Química (IQ)

E-mail para contato:
pvidinha@iq.usp.br

RESUMO – Este trabalho aborda a conversão catalítica de CO₂ em metanol como estratégia para mitigar mudanças climáticas e promover uma economia sustentável. Por meio do Aspen Plus V12, modelou-se um reator tubular considerando as reações de hidrogenação de CO₂ e RWGS. A simulação evidenciou o consumo de CO₂ e H₂ com a formação de metanol e H₂O ao longo do reator. A análise do aumento no número de tubos mostrou maior conversão de CO₂, ressaltando a importância da otimização da configuração do reator para elevar a eficiência do processo. O estudo reforça a viabilidade da síntese de metanol e a relevância da simulação computacional na descarbonização.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram-se como um dos maiores desafios do século XXI, impulsionadas principalmente pelo aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), dentre os quais o dióxido de carbono se destaca como principal contribuinte. A emissão intensiva de gases por atividades humanas, especialmente o uso de combustíveis fósseis, têm agravado esse cenário, elevando os níveis de CO₂ e outros poluentes a patamares históricos. Diante disso, torna-se urgente a adoção de fontes alternativas de energia renovável e a implementação de estratégias capazes de mitigar a poluição ambiental e preservar os ecossistemas globais. Nesse contexto, uma das abordagens mais promissoras para reduzir a concentração de CO₂ atmosférico é a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) [1].

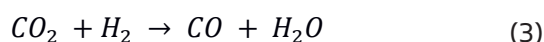
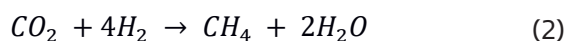
Entre as alternativas tecnológicas estudadas, a conversão de CO₂ em produtos de maior valor agregado, como o metanol, apresenta-se como estratégia relevante para o fechamento do ciclo do carbono e a promoção de uma economia sustentável. O metanol é um composto versátil, com aplicações em combustíveis, produtos químicos e materiais, cuja produção a partir de CO₂ e hidrogênio verde oferece uma rota promissora para reduzir a dependência de matérias-primas fósseis e descarbonizar cadeias industriais [2].

Diversos estudos têm investigado os desafios da conversão catalítica de CO₂ em metanol, abordando aspectos termodinâmicos e cinéticos [3–4]. O sucesso desse processo depende da compreensão detalhada da cinética e das condições operacionais, sendo a simulação computacional essencial para otimizar e validar a reação. Softwares como o Aspen

Plus permitem analisar cenários operacionais, dimensionar equipamentos e avaliar a viabilidade econômica e ambiental antes da aplicação em escala piloto, fornecendo subsídios para melhorar a seletividade e eficiência. A integração de modelagem e simulação, assim, configura-se como ferramenta estratégica para avançar em soluções práticas de descarbonização.

2 METODOLOGIA

O estudo do processo químico foi conduzido utilizando o software Aspen Plus V12, integrando a modelagem da reação catalítica com a otimização dos parâmetros operacionais, considerando os componentes principais das reações envolvidas (CO_2 , H_2 , CH_3OH , H_2O e CO), utilizando um modelo termodinâmico baseado na equação de estado de Peng-Robinson, reconhecida por sua precisão na descrição das propriedades físicas e químicas desses componentes. As reações químicas consideradas estão representadas nas Equações (1) a (3):



Considerou-se um reator do tipo fluxo pistão (PFR) para representar a cinética real das reações, com base no sistema proposto Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson (LHHW), mostrada nas Equações (4) e (5), que leva em consideração os efeitos das interações competitivas entre as espécies pelos sítios ativos do catalisador em reações heterogêneas.

As taxas das reações consideradas estão a seguir, com os parâmetros cinéticos utilizados conforme a literatura [3]:

$$r_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{k_1 P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2} - k_6 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CH}_3\text{OH}} P_{\text{H}_2}^{-2}}{(1 + k_2 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{H}_2}^{-1} + k_3 P_{\text{H}_2}^{0.5} + k_4 P_{\text{H}_2\text{O}})^3} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{cat}} \text{s}} \quad (1)$$

$$r_{\text{RWGS}} = \frac{k_5 P_{\text{CO}_2} - k_7 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2}^{-1}}{1 + k_2 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{H}_2}^{-1} + k_3 P_{\text{H}_2}^{0.5} + k_4 P_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{kg}_{\text{cat}} \text{s}} \quad (2)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a composição molar dos componentes reacionais ao longo do comprimento do reator em tubo único. Para os reagentes, observa-se a redução gradual de CO_2 e H_2 , indicando seu consumo progressivo pela reação catalítica. Embora a variação seja relativamente pequena no comprimento estudado, o comportamento confirma a direção esperada da conversão química. Quanto aos produtos, nota-se que H_2O é o principal produto gerado, seguida pela formação de metanol (CH_3OH) e, em menor proporção, de CO . Devido à reação paralela (2), há uma redução parcial da seletividade da rota para metanol.

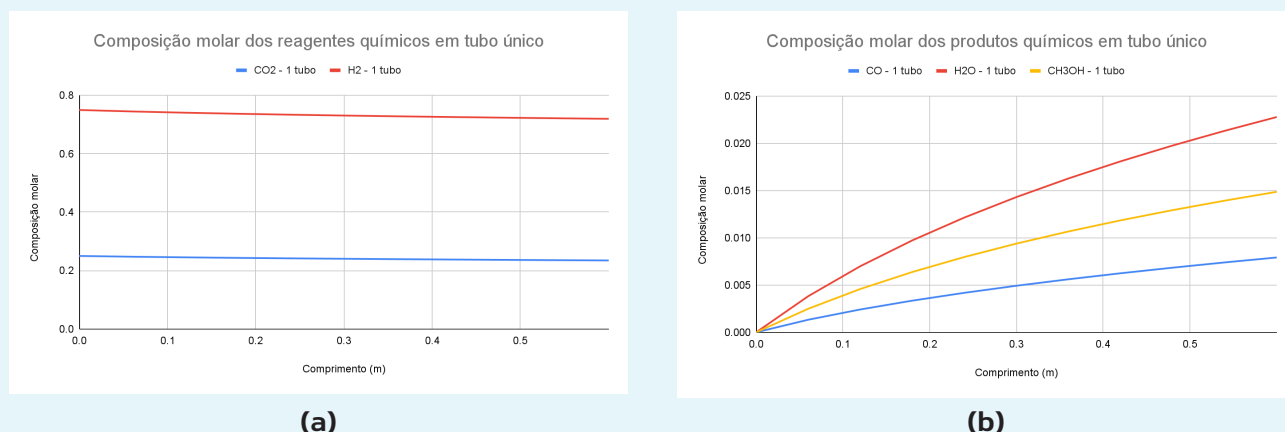


Figura 1: Desempenho reacional ao longo do comprimento (em metros) do reator de um tubo (A) de CO₂ e H₂; (B) de CO, CH₃OH e H₂O.

A Figura 2 apresenta a variação da composição molar de CO₂, como exemplificação, considerando diferentes números de tubos no reator. Verifica-se que, à medida que o número de tubos aumenta, a conversão de CO₂ se intensifica, refletindo maior área catalítica disponível e maior eficiência de utilização do reagente. O efeito é mais pronunciado nos primeiros metros de comprimento do reator, indicando que a cinética reacional é mais significativa no início do escoamento.

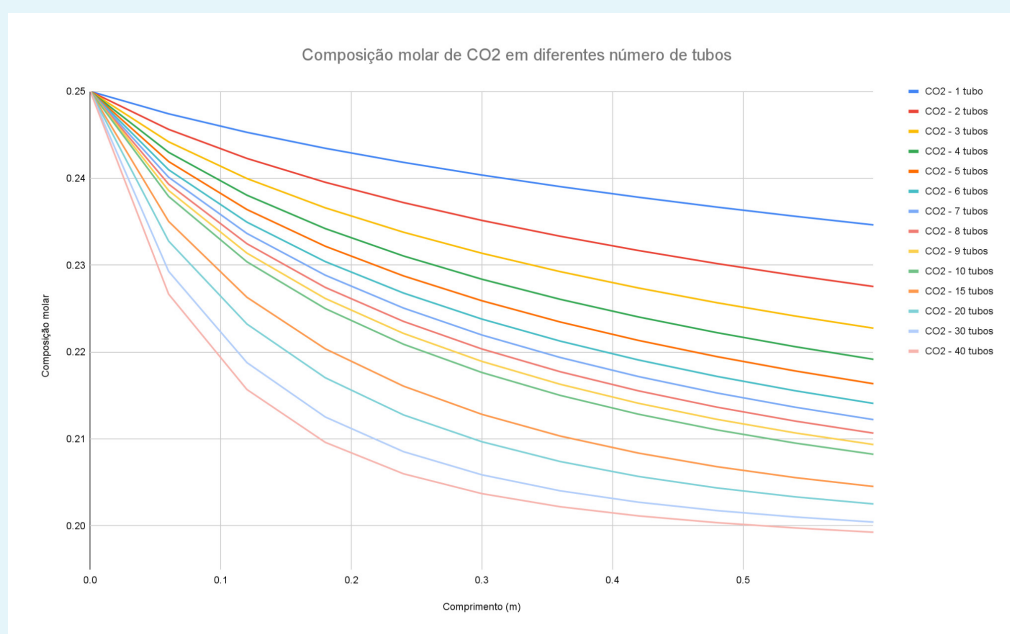


Figura 2: Composição molar de CO2 e entre 1 a 40 tubos.

A Figura 3 apresenta o comportamento da conversão e seletividade dos componentes químicos em função do diâmetro do tubo, considerando-se reator de tubo único e o comprimento do tubo constante. Observa-se que, para diâmetros menores, a taxa de conversão de CO_2 e H_2 é pouco mais elevada, devido à maior razão entre a área superficial e o volume, o que favorece a difusão e o contato entre reagentes e catalisador. À medida que o diâmetro aumenta, o desempenho tende à estabilização, indicando que o regime reacional passa a ser limitado predominantemente por fatores cinéticos e não mais por efeitos de transferência de massa. A produção de metanol (CH_3OH) atinge um platô elevado, enquanto as concentrações de CO_2 e H_2 também se estabilizam em níveis consistentes. O CO , por sua vez, demonstra um comportamento inverso, com uma concentração relativamente baixa e estável após o pico inicial, evidenciando que a reação de deslocamento reverso (RWGS) é menos favorecida em condições de maior eficiência catalítica. Isso implica a existência de um diâmetro ótimo para o projeto do reator, que equilibre a eficiência da reação com a otimização do volume do reator e os custos de fabricação.

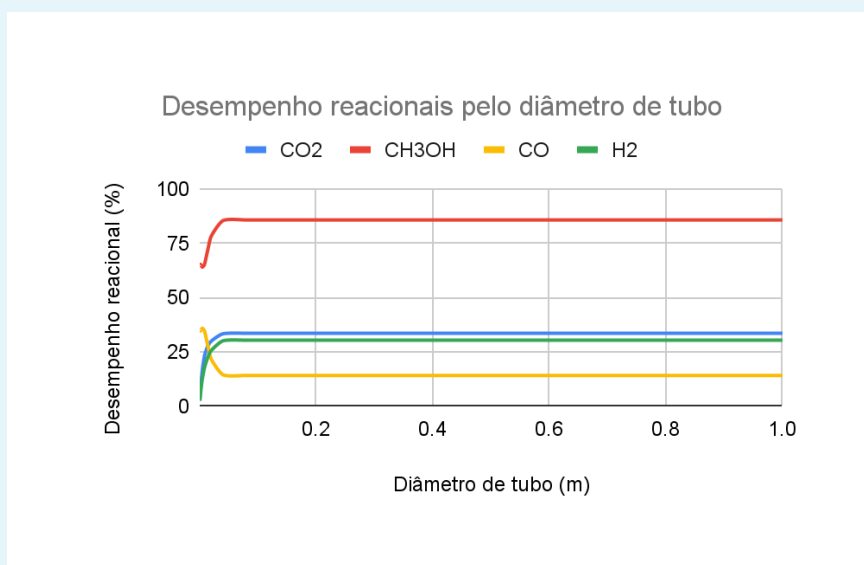


Figura 3: Conversão e seletividade associadas ao diâmetro do tubo de até 1 metro.

A Figura 4 mostra o desempenho reacional (conversão dos reagentes e seletividade dos produtos) dos componentes em função do número de tubos no reator mantendo o valor do comprimento constante. Verifica-se que o aumento no número de tubos promove aumento contínuo na conversão de CO_2 e H_2 , acompanhado de elevação progressiva na produção de metanol. Esse comportamento confirma que a ampliação da área de contato total contribui diretamente para o aproveitamento dos reagentes e para o aumento do rendimento do produto desejado. Por outro lado, observa-se uma redução na fração de CO , o que indica que, com a intensificação do processo e a maior disponibilidade de sítios ativos, a reação de hidrogenação de CO_2 se torna mais favorecida em relação à RWGS. Os resultados apresentados estão de acordo com estudos realizados na literatura [5,6].

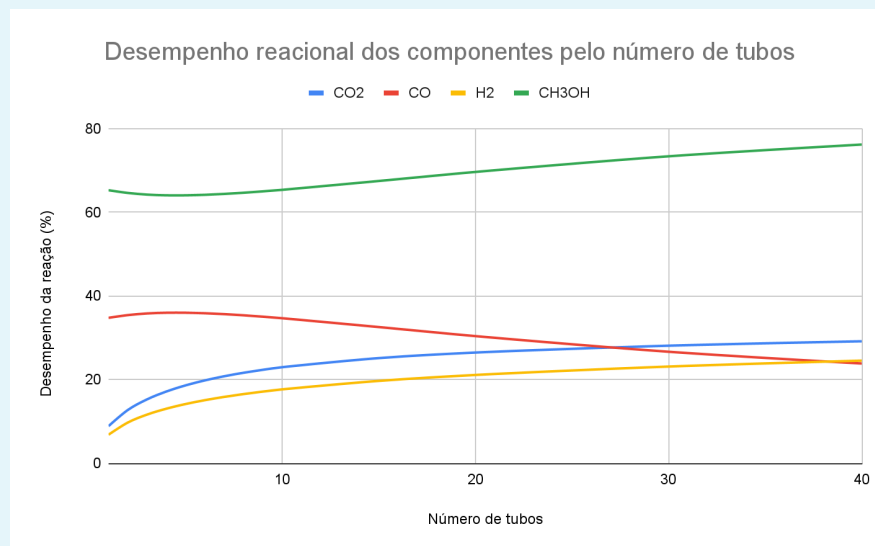


Figura 4: Desempenho do processo químico em função do número de tubos entre 1 a 40.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a modelagem do reator tubular permite compreender os perfis de reagentes e produtos envolvidos na síntese de metanol. A análise do tubo único mostrou o comportamento esperado de consumo de CO₂ e H₂ com a formação de H₂O, metanol e CO e a avaliação com múltiplos tubos evidenciou que o aumento da quantidade de tubos intensifica a conversão global de CO₂, sugerindo que a configuração geométrica do reator é fator determinante para a eficiência do processo.

A variação do diâmetro do tubo mostrou que dimensões menores favorecem ligeiramente o desempenho reacional. No entanto, verificou-se uma estabilização do rendimento a partir de determinado diâmetro, indicando uma transição para o regime dominado por limitações cinéticas.

Por outro lado, o aumento do número de tubos promoveu ganhos significativos de conversão de CO₂ e H₂, bem como maior seletividade para metanol, em detrimento da formação de CO. Esse efeito está associado à ampliação da área catalítica total e à melhor distribuição dos fluxos reagentes, sugerindo que a configuração geométrica é um fator determinante para otimizar o desempenho global do reator.

Esses resultados ressaltam a importância de se considerar parâmetros geométricos na etapa de projeto e otimização de reatores, uma vez que afetam diretamente o equilíbrio entre conversão e seletividade. Além disso, reforçam o papel da simulação computacional como ferramenta estratégica para avaliar cenários operacionais e propor modificações estruturais com impacto direto na eficiência e sustentabilidade do processo, contribuindo para o avanço de rotas sustentáveis de produção de metanol a partir de CO₂.

5 REFERÊNCIAS

- [1] ASIF, M. et al. *Hydrogen production, storage, and decarbonization via heterogeneous CO₂ hydrogenation: RWGS, FTS, and methanol synthesis pathways*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11814-025-00454-9>
- [2] Rivera-Tinoco, R., & Bouallou, C. (2010). *Comparison of absorption rates and absorption capacity of ammonia solvents with MEA and MDEA aqueous blends for CO₂ capture*. Journal of Cleaner Production, 18(9), 875–880. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.006>
- [3] Van-Dal, É. S., & Bouallou, C. (2013). *Design and simulation of a methanol production plant from CO₂ hydrogenation*. Journal of Cleaner Production, 57, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.008>
- [4] Gothe, M. L., Pérez-Sanz, F. J., Braga, A. H., Borges, L. R., Abreu, T. F., Bazito, R. C., Gonçalves, R. V., Rossi, L. M., & Vidinha, P. (2020). *Selective CO₂ hydrogenation into methanol in a supercritical flow process*. Journal of CO₂ Utilization, 40, 101195. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101195>
- [5] Cordero-Lanzac, T., Ramirez, A., Navajas, A., Gevers, L., Brunialti, S., Gandía, L. M., Aguayo, A. T., Mani Sarathy, S., & Gascon, J. (2022). *A techno-economic and life cycle assessment for the production of green methanol from CO₂: catalyst and process bottlenecks*. Journal of Energy Chemistry, 68, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.09.045>
- [6] Portha, J.-F., Parkhomenko, K., Kobl, K., Roger, A.-C., Arab, S., Commenge, J.-M., & Falk, L. (2017). *Kinetics of Methanol Synthesis from Carbon Dioxide Hydrogenation over Copper–Zinc Oxide Catalysts*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 56(45), 13133–13145. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b01323>

MODELAGEM NUMÉRICA E ANÁLISE DE ABSORVEDORES PARA TANQUE DE ONDAS

Vinícius Kenzo Inoue¹, Renato Picelli Sanches¹,
Gustavo Roque da Silva Assi¹



¹ Universidade de São Paulo,
Departamento de Engenharia
Naval e Oceânica

E-mail para contato: vinicius.inoue@usp.br

RESUMO – Este estudo modela numericamente um tanque de ondas para avaliar o impacto de simplificações e discretização no erro de simulação, apoiando o desenvolvimento de absorvedores porosos otimizados. Simulações no OpenFOAM mostraram que certas simplificações reduzem o tempo computacional sem perda significativa de precisão, permitindo testar diferentes porosidades e espessuras dos absorvedores.

1 INTRODUÇÃO

Os tanques de ondas são essenciais para estudar a resposta de estruturas offshore a carregamentos hidrodinâmicos, permitindo reproduzir ondas em escala reduzida em ambiente controlado, reduzindo incertezas de projeto em comparação com modelos analíticos e empíricos. Tanques unidirecionais consistem em um canal com gerador de ondas em uma extremidade e dispositivo absorvedor na outra, que pode ser ativo, utilizando atuadores e sensores, ou passivo, baseado na quebra da onda por uma praia ou na dissipação de energia em meio poroso.

Esses mecanismos já foram investigados por meio de abordagens paramétricas na análise de quebra-mares porosos [1] e praias inclinadas [2], além de terem sido explorados em estudos envolvendo otimização topológica [3]. Entretanto ainda não foi feito ainda um estudo direto de análise da influência de parâmetros como discretização e hipóteses simplificadoras no desempenho dos absorvedores otimizados de forma sistemática.

No caso de tanques curtos, como o do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, o uso de praias é inviável para ensaios com estruturas mais espaçosas como fazendas eólicas *offshore* e terminais internacionais, tornando atraente o desenvolvimento de absorvedores porosos otimizados. Para isso, utilizam-se técnicas de otimização numérica e simulações numéricas, exigindo controle dos erros de discretização e modelagem física, uma vez que resultados consistentes raramente são obtidos em modelos iniciais.

Assim, este trabalho tem como objetivo modelar numericamente um canal de ondas e analisar o impacto de hipóteses simplificadoras e parâmetros de discretização no erro associado a simulação, visando subsidiar o desenvolvimento de um absorvedor poroso otimizado para ser testado e implementado no departamento.

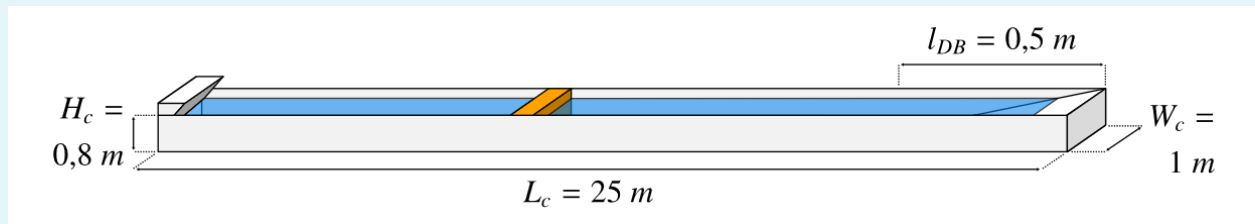


Figura 1: Geometria e dimensões do canal de ondas do departamento.

2 METODOLOGIA

2.1 Ferramentas computacionais

As simulações foram executadas na distribuição Ubuntu 24.04 no WSL 2.5.10.0 de um workstation Windows 11, CPU Intel iO-I3900 e 64 GB de memória RAM. O *software* de código aberto OpenFOAM (versão 2312) foi utilizado na modelagem numérica devido à possibilidade de implementação de *solvers* e *scripts*, além de ser possível controlar parâmetros numéricos com maior liberdade que em *softwares* comerciais.

2.2 Modelagem numérica

Para menor demanda computacional, foi modelada apenas uma região de interesse do canal. Foi considerado escoamento incompressível, multifásico, adiabático e bidimensional. As hipóteses simplificadoras a serem avaliadas são: uso de modelo invíscido, solver (PIMPLE vs PISO), solver consistente ou não e time-step adaptativo.

A malha cartesiana foi gerada utilizando-se da função *blockMesh* presente no OpenFOAM de forma parametrizada por um comprimento característico estabelecido em um arquivo de configuração. A malha foi feita de forma a diminuir o tamanho das células na região próxima à interface, com o objetivo da melhor representação da superfície livre.

Foram escolhidas condições de contorno de forma a representar a geração e a absorção de ondas de forma numérica, possibilitando a modelagem de apenas uma região de interesse próxima ao absorvedor.

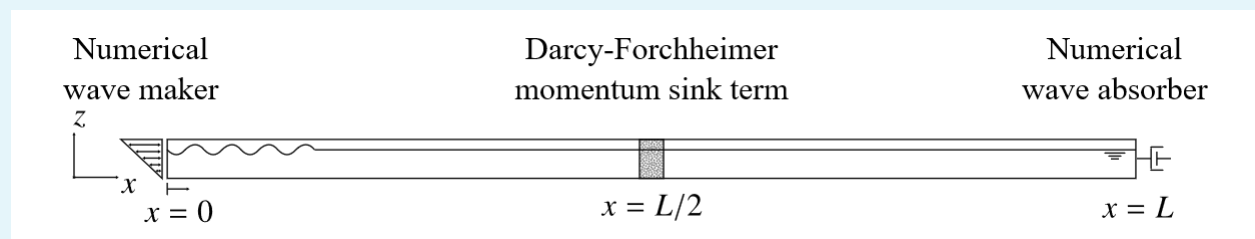


Figura 2: Condições de contorno do modelo numérico.

Os esquemas de discretização de maior ordem (segunda ordem) foram escolhidos para maior precisão do resultado inicialmente, visando maior precisão na avaliação dos erros associados à simulação numérica.

2.3 Validação e convergência

Foi utilizada a extrapolação de Richardson proposta em [4], utilizando-se de três malhas com diferentes graus de refino para a estimação do erro. Utilizou-se do mesmo processo para a obtenção de um time-step razoável.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação de hipóteses

As hipóteses foram avaliadas em relação à malha escolhida pelo processo de convergência de malha. Todas as hipóteses avaliadas, com exceção do uso do solver consistente, diminuíram significativamente o tempo computacional sem grandes diferenças de resultados com a configuração base, menos simplificada.

Tabela 1: Avaliação das hipóteses simplificadoras.

Hipótese	Diferença no resultado	Diferença no tempo computacional
Escoamento invíscido	-0,0003%	-7,33%
Solver PISO	0,0000%	-28,86%
1 Correção externa	-0,3000%	-13,99%
Consistente	0,0000%	0,76%
Co máximo de 0,125	-0,2000%	-52,01%

3.2 Teste do modelo

Assim, foi possível realizar um teste inicial do modelo, explorando o domínio de projeto possível para a configuração dos absorvedores. Como esperado, um absorvedor mais poroso e mais espesso possibilita menor refração. Entretanto, como não foi analisada a reflexão da onda, não é possível afirmar qual seria a configuração ótima no caso de um absorvedor de apenas uma camada.

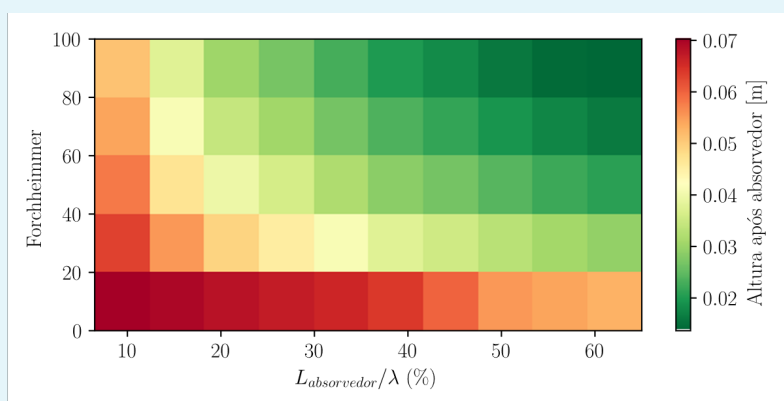


Figura 3: Teste com diferentes porosidades e comprimentos do absorvedor.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi possível obter um modelo numérico do tanque com baixo computacional a fim de projetar um absorvedor poroso para o departamento, analisando hipóteses simplificadas. Para trabalhos futuros, é possível implementar algoritmos de otimização *surrogated-based*, utilizando-se dos erros conhecidos na discretização para explorar diferentes fidelidades para avaliações intermediárias.

5 REFERÊNCIAS

- [1] GANDOMI, Mostafa et al. Multi-criteria decision-making optimization model for permeable breakwaters characterization. *Ocean Engineering*, v. 280, p. 114447, 2023.
- [2] URREGO-PABÓN, Jose et al. Numerical and experimental study of several passive wave absorber behavior in a wave channel. *Results in Engineering*, v. 23, p. 102455, 2024.0
- [3] LIU, Ze; DONG, Hao-Wen; YU, Gui-Lan. Topology optimization of periodic barriers for surface waves. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 63, n. 1, p. 463–478, 2021.
- [4] ROACHE, Patrick J.; GHIA, Kirti N.; WHITE, Frank M. Editorial policy statement on the control of numerical accuracy. *Journal of Fluids Engineering*, v. 108, n. 1, p. 2, 1986.

O IMPACTO DE ALTERNATIVAS DE VITRAIS SOBRE A REVERBERAÇÃO SONORA NO INTERIOR DA BASÍLICA NOVA DE NOSSA SENHORA DA CONCEIÇÃO APARECIDA

CYK IKEDA, F VITTORINO, MM AQUILINO



Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Laboratório de Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Instalações Prediais

E-mail para contato: fulviov@ipt.br

RESUMO – Este estudo avaliou o impacto acústico da instalação de vitrais nas fachadas da Basílica Nova de Nossa Senhora da Conceição Aparecida, substituindo os elementos vazados de concreto existentes. Foi medido o tempo de reverberação em 24 posições para calibrar um modelo digital da Basílica no software Odeon, seguido de simulações para calcular o Índice de Transmissão da Fala (STI), comparando as condições com e sem os vitrais. Os resultados indicaram tempos de reverberação heterogêneos, muito acima dos valores recomendados, dificultando o entendimento da fala. As simulações, mostraram que a adoção dos vitrais não alterará significativamente essa condição, pois o ambiente já é bastante reverberante devido ao seu grande volume. Conclui-se que o impacto dos vitrais sobre a reverberação sonora é mínimo, e a inteligibilidade da fala no interior da Basílica continuará dependendo do sistema artificial de sonorização já instalado.

1 INTRODUÇÃO

A edificação da Basílica nova de Nossa Senhora da Conceição Aparecida, em Aparecida (SP), “teve sua terraplanagem iniciada em 1952 e terminada em 1954. Começou a ser construída em 11 de novembro de 1955” [1] e, desde então, vem passando por aprimoramentos, como, por exemplo, instalação de revestimento de pisos e paredes e sistemas artificiais de sonorização. Atualmente, busca-se instalar vitrais nas fachadas, nas janelas inferiores em substituição aos elementos vazados em concreto que produzem ventilação permanente. Esta ação, além de impactar no conforto térmico, pode aumentar ainda mais o tempo de reverberação no interior da Basílica, dificultando o entendimento da fala.

O objeto do presente artigo é a apresentação dos resultados de estudos de avaliação nos impactos resultantes sobre as condições de conforto acústico, concernentes ao projeto de instalação de esquadrias em substituição aos elementos vazados de concreto atualmente existentes nas ‘Fachadas da Basílica’, localizadas nas dependências onde ficam os fiéis assistindo missas. Para tanto, foram realizadas simulações computacionais, utilizando-se o software Odeon [2]. O modelo digital construído da Basílica foi calibrado por medições realizadas com a edificação vazia.

2 METODOLOGIA

Em linhas gerais, o trabalho desenvolvido seguiu os seguintes passos:

- Medição do tempo de reverberação em 24 posições ao longo dos 4 eixos da Basílica para calibração das propriedades acústicas dos materiais a serem usadas no modelo digital e avaliação inicial das condições sonoras do recinto;
- Cálculo do impacto da adoção dos novos vitrais sobre a reverberação sonora a partir do indicador STI – Speech Transmission Index (em português Índice de Transmissão da Fala) é um parâmetro que mede a qualidade da transmissão de fala em um ambiente acústico. É uma ferramenta padronizada e amplamente utilizada para avaliar a inteligibilidade da fala. Um valor de STI = 1 significa inteligibilidade perfeita, enquanto STI = 0 significa que o conteúdo da informação foi completamente perdido. Valores bons para esse parâmetro são superiores a 0,61.
- Avaliação dos impactos dos novos vitrais sobre as condições de conforto térmico e acústico.

3 MODELO DE CÁLCULO DO SOFTWARE ODEON

O software ODEON emprega um modelo híbrido para a simulação acústica, combinando quatro métodos. Inicialmente, determina a energia sonora direta, que considera a atenuação da fonte ao receptor com base na distância e na absorção do ar. Para as reflexões iniciais, o ODEON utiliza o Método de Imagem das fontes para modelar as reflexões especulares, criando fontes virtuais para cada superfície refletora, permitindo calcular um “caminho direto do som” a partir de suas primeiras reflexões. Complementar a este, o Método de Espalhamento Inicial é usado para as reflexões difusas iniciais, gerando, também, fontes secundárias que também contribuem para a resposta sonora. Cada reflexão desses raios pode criar novas fontes secundárias, e qualquer uma que seja visível a partir do receptor contribui para a pressão sonora total no receptor. Para as reflexões tardias, o software emprega o Método de Radiosidade de Raios. Nesta fase, os raios sonoros são emitidos e refletidos com que se baseia em um modelo de espalhamento que leva em conta a rugosidade e o tamanho das superfícies. Em vez de seguir um único raio, o modelo trata as superfícies como emissores de energia. Esse modo de cálculo somente é acionado após um certo número de reflexões ser atingido. [3]

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tempos de Reverberação Medidos

Os valores obtidos para o tempo de reverberação estão apresentados na Figura 1. Os tempos de reverberação são bastante heterogêneos para frequências abaixo de 2.000 Hz, região em que se concentra boa parte das frequências da fala humana. Isso é esperado dado o grande volume do local. A média dos tempos de reverberação nos 24 pontos de medição ficou bem acima do recomendado em literatura, cujos valores para frequências de menos de 2000 Hz deveriam estar abaixo de 4s.

4.2 Resultados das Simulações

Na Figura 2 tem-se os valores calculados do STI. Aqui são apresentados os valores já com a adoção do vitral, que são praticamente iguais aos obtidos sem a sua instalação. Isso se deve ao grande volume interno da edificação onde a componente sonora direta do som é muito mais significativa do que a componente refletida e o restante da edificação já é bastante reverberante. Valores adequados de STI tanto com o uso do vitral, como aqueles com os elementos vazados em concreto atuais, foram obtidos apenas nas regiões com cores em verde e azul.

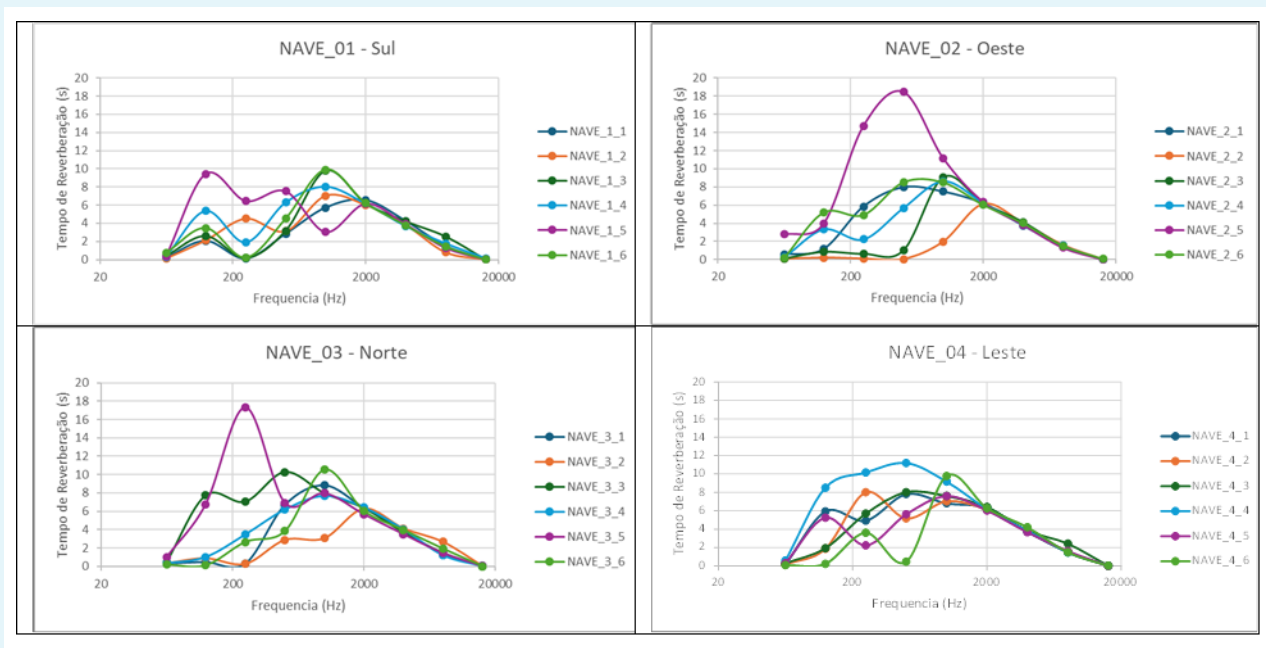


Figura 1: Tempos de reverberação medidos nos 6 pontos em cada uma das 4 naves.

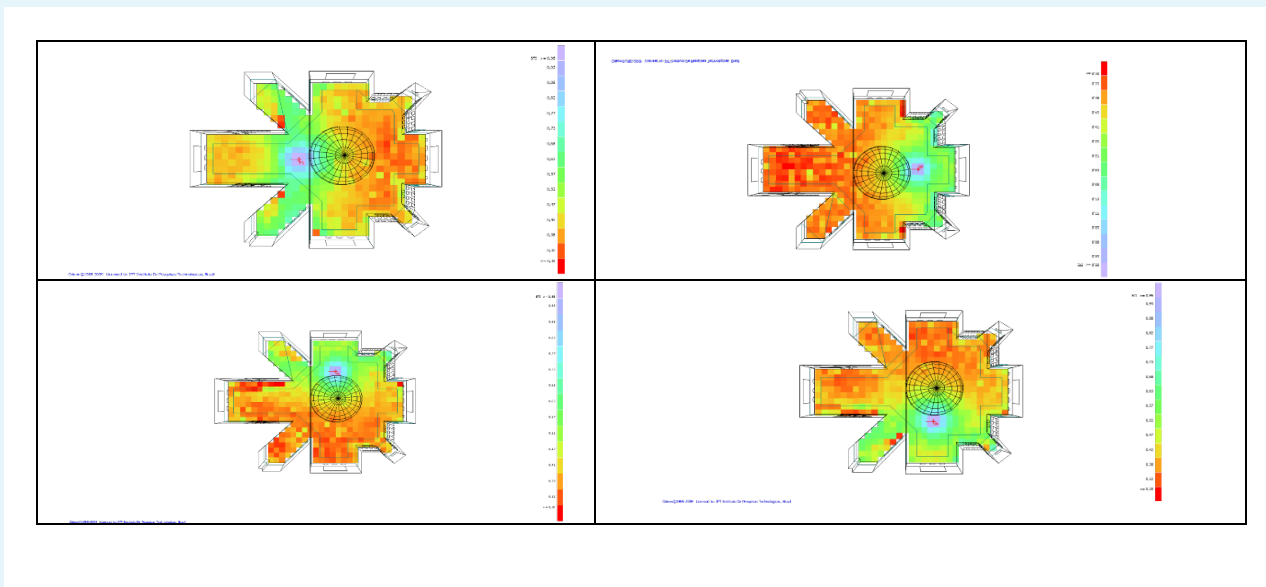


Figura 2: STI calculados com a utilização de vitrais na fachada.

5 CONCLUSÃO

Os tempos de reverberação medidos são bastante altos, o que poderia tornar o ambiente com baixa STI, mas, esse efeito é compensado pelo sistema artificial de amplificação de som. Essa situação não será alterada com a utilização de vitrais em substituição aos cobogós.

6 REFERÊNCIAS

[1] CATEDRAL BASÍLICA DE NOSSA SENHORA APARECIDA, In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Catedral_Bas%C3%ADlica_de_Nossa_Senhora_Aparecida>. Acesso em: 31/08/2025.

[2] ODEON, *Odeon Room Acoustics Software, User's Manual*. Lyngby, 2023. Disponível em: <<https://odeon.dk/download/Version18/OdeonManual.pdf>>. Acesso em: 31/08/2025.

[3] ODEON, *What is "Room ACOustics"?*. Disponível em: <<https://odeon.dk/learn/articles/room-a-coustics/>>. Acesso em: 31/08/2025.

SIMULAÇÃO DA ADSORÇÃO DE DICLOFENACO DE SÓDIO EM CARVÃO ATIVADO DERIVADO DE RESÍDUOS DE PET

ARS ARAUJO¹, DR da COSTA¹, D DINIZ¹, GU MANZONI¹,
GV OLIVIERI¹, AA MORANDIM-GIANNETTI¹



¹Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato:
preamorandim@fei.edu.br

RESUMO – O presente trabalho visou à simulação computacional de um processo de adsorção em regime permanente para remoção de diclofenaco sódico em um efluente, sendo utilizado como adsorvente carvão ativado derivado de resíduos de PET (polietileno tereftalato). As simulações foram realizadas no software Aspen Plus, considerando-se o processo de adsorção análogo a uma reação química e utilizando-se dados cinéticos e de isotermas levantados experimentalmente. Para uma operação contínua de uma coluna de adsorção, a partir de uma análise de sensibilidade, estimou-se que, para uma massa de adsorvente de até 500 kg, uma vazão de efluente de até 850 m³/h se mostra adequada. Os resultados preliminares abrem a possibilidade para futuras investigações quanto à dinâmica da coluna (curva de ruptura, regeneração do adsorvente).

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações na poluição hídrica é a presença de contaminantes de origem farmacêutica, que são conhecidos por sua toxicidade e bioacumulação em água [1]. Um exemplo de poluente bastante detectado em rios é o diclofenaco de sódio, composto farmacêutico que atua como anti-inflamatório [2]. A remoção convencional de diclofenaco sódico em efluentes pode envolver várias operações, dentre as quais a adsorção se destaca como um caminho promissor, já que se mostra eficiente em efluentes cuja composição é difícil de ser conhecida por completo, como é o caso de efluentes hospitalares ou da indústria farmacêutica [3].

Além disso, a crescente utilização de plásticos PET em embalagens ocasionou um desafio ambiental devido ao seu acúmulo prejudicial no solo e na água [4]. Diante deste fato, vêm sendo exploradas diversas iniciativas de reciclagem para transformar os resíduos em novos produtos, como combustíveis, plastificantes, resinas e carvão ativado [5–6]. Experimentalmente, o carvão ativado proveniente de resíduos de PET pode ser obtido por meio de um processo de carbonização em mufla e, posteriormente, pode ser aplicado como uma alternativa sustentável para a adsorção de poluentes [7].

Assim, o presente estudo visou à implementação em simulações computacionais de dados cinéticos e de isotermas levantados experimentalmente para o processo de adsorção de diclofenaco de sódio em carvão

ativado proveniente de resíduos de PET, com o intuito de realização de análises de sensibilidade preliminares para escalabilidade em um processo contínuo.

2 METODOLOGIA

Dados cinéticos e de isotermas de adsorção de diclofenaco de sódio em carvão ativado proveniente de PET foram levantados experimentalmente em um estudo anterior, de modo que ácido fosfórico foi observado como agente ativante que levou à maior capacidade de adsorção. Além disso, dentre os modelos de isoterma e cinético ajustados aos dados experimentais, foram aplicados no presente estudo computacional os respectivos modelos de isoterma de Langmuir e cinético de pseudo-segunda ordem [7].

As simulações computacionais apresentadas aqui foram realizadas no *software* Aspen Plus (V14) e utilizaram uma abordagem de analogia do processo de adsorção a uma reação química, em que o diclofenaco sódico em solução aquosa se converte a diclofenaco sódico adsorvido. Na simulação, adotou-se o modelo termodinâmico ELECNRTL (*Electrolyte Non-Random Two Liquid*) e o equipamento RPlug, de modo que o reator tubular com catalisador representa, analogamente, uma coluna de adsorção preenchida com o adsorvente.

As condições operacionais testadas foram: temperatura de 25 °C, pressão de 1 bar e corrente de alimentação de solução aquosa com concentração de 75 ppm. Demais dados operacionais foram variados através de uma análise de sensibilidade: massa de adsorvente (entre 50 e 1000 kg) e vazão da corrente de alimentação (entre 150 e 1000 m³.h⁻¹).

A saída avaliada na análise de sensibilidade foi definida como a porcentagem de capacidade de adsorção (q), que representa a porcentagem adsorvida de diclofenaco sódico dividida pela massa de adsorvente, conforme Equação (1).

$$\%q = \frac{100}{W} \left(\frac{\dot{W}_1 - \dot{W}_f}{\dot{W}_1} \right) \quad (1)$$

onde W é a massa de adsorvente, e $\dot{W}_1$ e $\dot{W}_f$ são as vazões mássicas de diclofenaco sódico nas correntes de alimentação e saída, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de porcentagem de capacidade de adsorção foram expressos na Figura 1. Tal figura mostra que menores valores de massa de adsorvente levam a maiores porcentagens de capacidade de adsorção, o que pode parecer contraintuitivo. Contudo, a propriedade analisada está em base de massa de catalisador, o que traz uma interpretação que visa balancear a porcentagem adsorvida e a massa de catalisador para um processo contínuo.

Neste cenário, a maior porcentagem de capacidade de adsorção está na faixa entre 0,2 e 0,225 %·g⁻¹, com valores muito próximos até a massa de catalisador de 500 kg e vazões volumétricas de até 850 m³.h⁻¹, indicando que a porcentagem adsorvida é proporcional à quantidade de adsorvente nesta faixa. Portanto, nesta faixa, o adsorvente opera de forma mais eficiente em termos de sua capacidade. Quantidades de adsorvente superiores a 500 kg e/ou vazões de efluente superiores a 850 m³.h⁻¹ mostram que, para uma mesma vazão de efluente, o aumento da massa de catalisador leva a uma redução na porcentagem de capacidade adsorvida, indicando que o aumento na massa de catalisador não favorece um proporcional aumento na quantidade adsorvida de diclofenaco sódico.

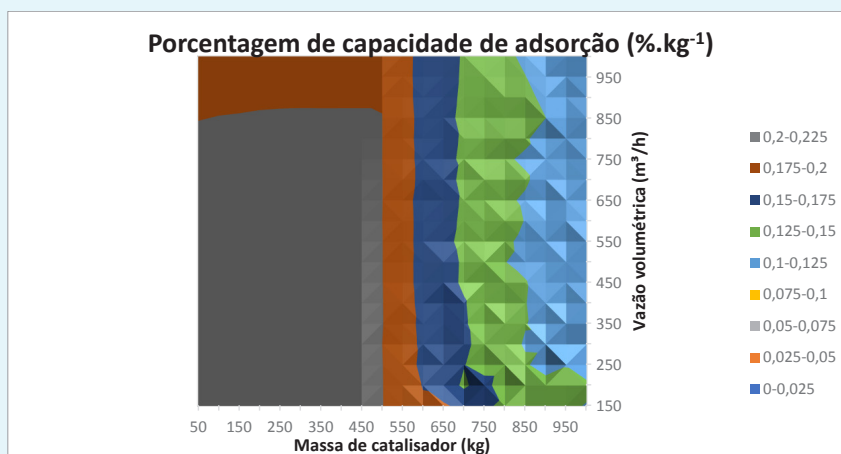


Figura 1: Gráfico de contorno da porcentagem de capacidade de adsorção em função da massa de catalisador e da vazão volumétrica de alimentação do efluente.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou resultados de simulações de diclofenaco sódico em carvão ativado obtido a partir de resíduos de PET, considerando-se a operação de adsorção análoga a uma reação química. Com base em um modelo cinético e de isoterma de adsorção, foi possível realizar uma análise de sensibilidade levando-se em conta dados operacionais do processo para se avaliar a porcentagem de capacidade de adsorção. A faixa de condições operacionais que leva ao maior valor para esta porcentagem traz uma análise preliminar de escalabilidade do processo para uma coluna de adsorção operando continuamente, abrindo possibilidade para futuros estudos quanto à dinâmica em termos de curva de ruptura e regeneração do adsorvente.

5 REFERÊNCIAS

- [1] YOUSSEF NAE, AMER E, EL NAGA AOA, SHABAN SA, Molten salt synthesis of hierarchically porous carbon for the efficient adsorptive removal of sodium diclofenac from aqueous effluents. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, v. 113, p. 114–125, 2020.
- [2] SHAMSUDIN MS, AZHA SF, SELLAOUI L, BADAWI M, BONILLA-PETRICIOLET A, ISMAIL S, Performance and interactions of diclofenac adsorption using Alginate/Carbon-based Films: Experimental investigation and statistical physics modelling. *Chem. Eng. J.*, v. 428, p. 131929, 2022.
- [3] NIETO E, CORADA-FERNÁNDEZ C, HAMPEL M, LARA-MARTÍN PA, SÁNCHEZARGÜELLO P, BLASCO J, Effects of exposure to pharmaceuticals (diclofenac and carbamazepine) spiked sediments in the midge, *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae). *Sci. Total Environ.*, v. 609, p. 715–723, 2017.
- [4] CHEN R, DENG S, CUI T, DUAN S, JIA Q, ZHANG L, Progress in recycling and reutilization of waste polyethylene terephthalate. *Progr. Rubber Plast. Recycl. Tech.*, v. 40, p. 77–97, 2024.
- [5] BÄCKSTRÖM E, ODELIUS K, HAKKARAINEN M, Ultrafast microwave assisted recycling of PET to a family of functional precursors and materials. *Eur. Polym. J.*, v. 151, p. 110441, 2021.
- [6] PATNAIK S, BARICK AK, PANDA AK, Thermo-catalytic degradation of different consumer plastic wastes by zeolite a catalyst: A kinetic approach. *Progr. Rubber Plast. Recycl. Tech.*, v. 37, p. 148–164, 2021.
- [7] ARAUJO ARS, DA COSTA DR, DINIZ D, MANZONI GU, Obtenção de carvão ativado a partir do polietileno tereftalato (PET) visando a aplicação futura em tratamento de efluentes industriais. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Química, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2022.

SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA OSCILADOR

F O BENSON, M F BARBOSA,
I GONÇALES, M S M DIAS



Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo

E-mail para contato: mdias@ipt.br

RESUMO – Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e a validação de um circuito elétrico, desde a simulação computacional até a implementação prática. Inicialmente, o circuito foi projetado no software LTspice, onde se analisou a forma de onda e a amplitude do sinal gerado, ganhando-se tempo. Em seguida, elaborou-se o esquema elétrico e a placa de circuito impresso no KiCad, possibilitando a organização dos componentes e a visualização do layout, e por fim, o protótipo montado e testado em bancada, confirmando funcionamento estável, eficiente e confiável.

1 INTRODUÇÃO

Os circuitos eletrônicos estão presentes em toda tecnologia moderna, pois possibilitam o controle, o tratamento e a transmissão de sinais elétricos [1] em uma infinidade de aplicações. Dentre essas aplicações, os circuitos osciladores são sistemas fundamentais, pois geram sinais periódicos de forma autônoma, sendo assim, importantes para sistemas de comunicação [2], instrumentação e temporização. Das várias topologias existentes, os osciladores LC são os mais encontrados em aplicações, devido à sua simplicidade e eficiência. O oscilador Hartley [3] é uma das topologias clássicas, que utiliza uma bobina fracionada e um capacitor como partes do circuito tanque, fornecendo a realimentação positiva necessária para a oscilação. Sua frequência é dependente de componentes reativos e a sua razoável estabilidade faz dele um bom instrumento para amostras didáticas e para projetos de baixo custo.

2 DESENVOLVIMENTO

O oscilador Hartley baseia-se em um circuito LC ressonante acoplado a um estágio ativo que fornece o ganho necessário para compensar as perdas no tanque. A frequência de oscilação é determinada pela relação entre os componentes indutivos e capacitivos, podendo ser expressa como:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L_{eq}}} \quad (1)$$

Onde:

F_0 é a frequência de oscilação (Hz);

C é a capacitância do tanque (F);

L_{eq} é a indutância equivalente, dada por:

$$L_{eq} = L1 + L2 + 2M \quad (2)$$

Onde:

L1 e L2 são os indutores da malha de realimentação;
M é o acoplamento mútuo quando aplicável.

O circuito oscilador foi inicialmente desenvolvido no LTspice versão 24.0.12, possibilitando a visualização da formação da realimentação positiva, e por meio da simulação transitória foi possível avaliar o processo de partida da oscilação, a evolução da amplitude ao longo do tempo e a estabilidade da frequência, considerando a relação entre L1 e L2, bem como a qualidade dos componentes que compõem o tanque ressonante.

2.1 Criação e Análise do Circuito no LTspice

O LTspice é um software de simulação de circuitos amplamente utilizado em eletrônica analógica por sua precisão e praticidade. No ambiente do *software*, o circuito pode ser projetado e configurado conforme especificações desejadas, conforme mostra a Figura 1. Em seguida, por meio da simulação transitória, foi possível observar o processo de oscilação e medir a amplitude do sinal gerado pelo circuito, conforme mostra a Figura 2.

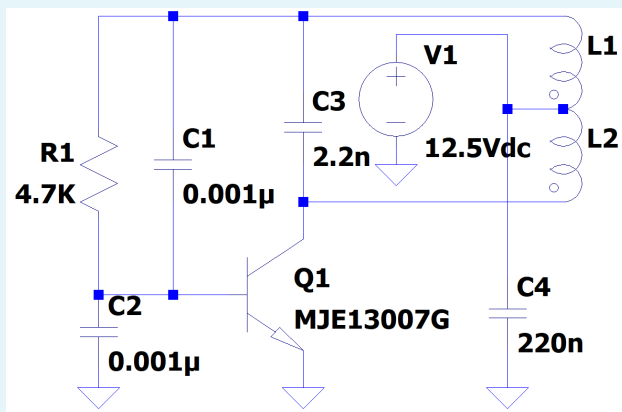


Figura 1 – Circuito oscilador Hartley

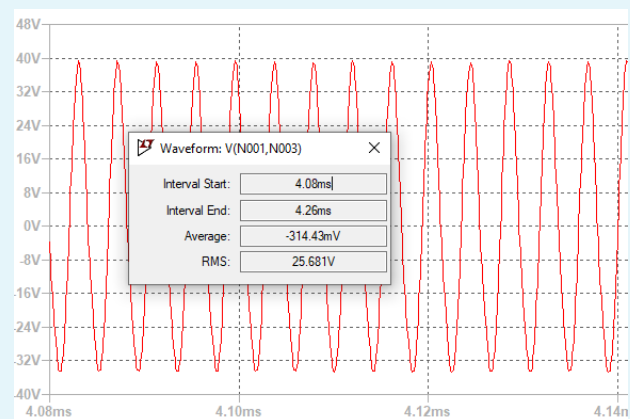


Figura 2 – Forma de onda gerada

2.2 Criação do Circuito no KiCad

Após simulação no LTspice foi possível elaborar o esquema elétrico do circuito final, conforme mostra a Figura 3 e projetar a placa de circuito impresso (PCI), conforme mostra a Figura 4, utilizando o *software* KiCad versão 9.0.1.

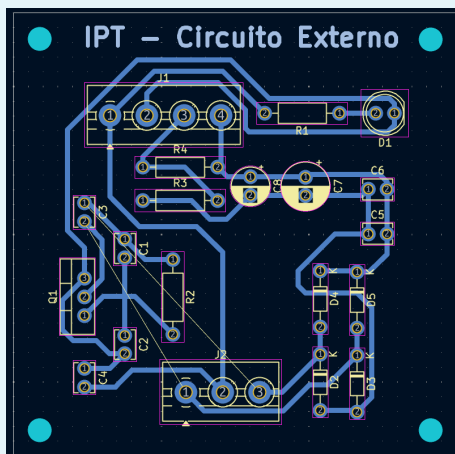


Figura 3 – Diagrama elétrico

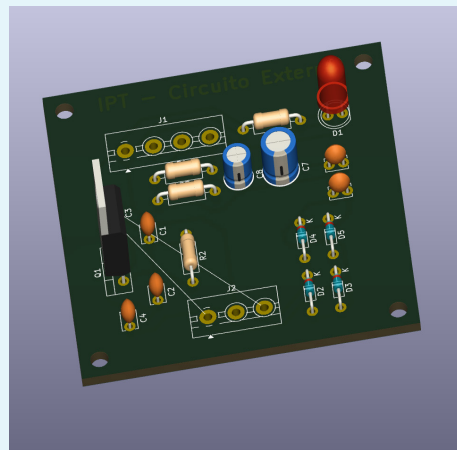


Figura 4 – Circuito na PCI

O KiCad permitiu organizar os componentes, roteamento das trilhas e visualizar a PCI em 3D, garantindo que o layout fosse adequado para fabricação e facilitando a transição do projeto simulado para a implementação prática.

2.3 Validação do Circuito em Bancada

Após a simulação do circuito no LTspice e a criação da placa do circuito impresso (PCI) no KiCad, a versão física da placa foi confeccionada no laboratório de prototipagem, conforme mostrado na Figura 5. Os componentes foram então soldados na PCI, conforme ilustrado na Figura 6, e o protótipo montado foi testado em bancada.

Para a realização das medições corretas, foram utilizados os equipamentos devidamente calibrados que possibilitaram a verificação do funcionamento do oscilador e a amplitudes da senoide gerada, conforme mostrado na Figura 7. A partir da realização dos testes, foi possível notar a mesma situação obtida na simulação do circuito e o funcionamento do circuito testado.

Verificou-se, durante a execução dos testes, o funcionamento do circuito e a eficiência da topologia, visto que o sistema funcionou conforme o esperado.



Figura 5 – PCI

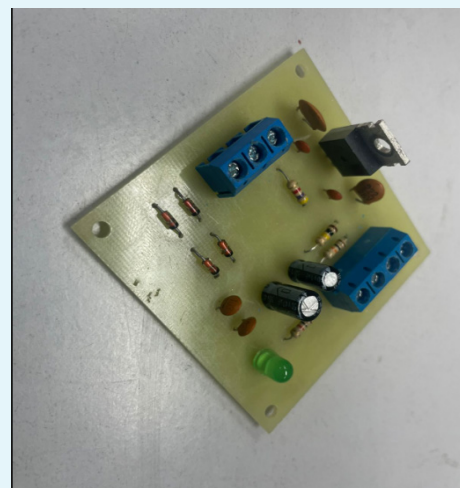


Figura 6 – PCI com os componentes

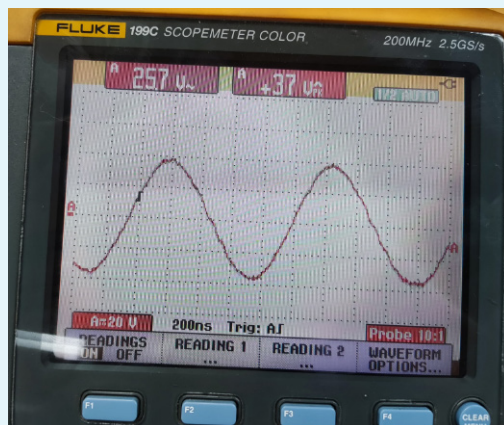


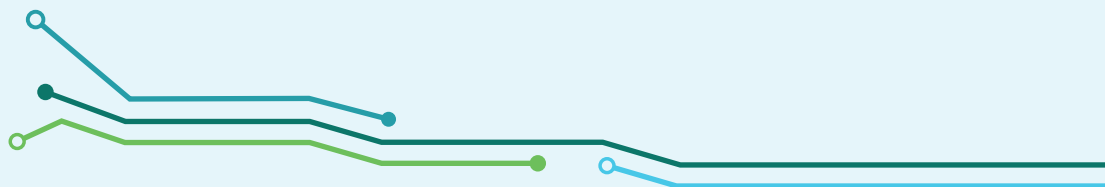
Figura 7 – Sinal medido em bancada

3 CONCLUSÃO

A partir da realização das medidas feitas, foi possível observar a mesma condição obtida nas simulações e confirmar o funcionamento do circuito implementado. Com isso, demonstrou-se a capacidade de simular, projetar, construir, testar e validar todo o sistema eletrônico, comprovando a eficiência e a confiabilidade do projeto desenvolvido desde a simulação.

4 REFERÊNCIAS

- [1] LIU JQ, WANG L, PU YQ, LI JL-W, KANG K, A magnetically resonant coupling system for wireless power transmission. *Proc. Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol. (ICMMT)*, p. 1–4, 2012. doi:10.1109/ICMMT.2012.6230316.
- [2] PRAUZEK M, KONECNY J, VENCLIKOVA M, BARANEK V, NFC interface for standalone data acquisition device. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 25, p. 437–441, 2016. doi:10.1016/j.ifacol.2016.12.051.
- [3] IQBAL J, SHAHID A, KHAN H, MALIK S, Robust Colpitts and Hartley oscillator design. *Procedia Comput. Sci.*, v. 58, p. 627–632, 2015. doi:10.1016/j.procs.2015.08.082.



SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA ANTENA MICROSTRIP

G R FELIX, K J OLIVEIRA, M S DIAS



Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo

E-mail para contato:
gusthfelix@ipt.br

RESUMO – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma antena microstrip, abrangendo o cálculo teórico inicial, simulação computacional e validação experimental em bancada. A proposta foi a construção de uma antena que operasse em frequência próxima de 2,4 GHz, muito utilizada em sistemas de comunicação sem fio como Wi-Fi e Bluetooth, explorando tanto a fundamentação matemática por trás do seu funcionamento, quanto os aspectos práticos de projeto, simulação e fabricação.

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de comunicação sem fio tem impulsionado o desenvolvimento de antenas compactas, de baixo custo e com bom desempenho em faixas de frequência cada vez mais utilizadas no cotidiano. Entre as diversas soluções existentes, as antenas microstrip destacam-se por sua simplicidade construtiva, perfil reduzido e facilidade de integração a circuitos impressos, o que as torna ideais para aplicações em dispositivos móveis, redes Wi-Fi, Bluetooth, RFID e sistemas embarcados [1]. As antenas microstrip possuem três camadas principais: um patch condutor, um substrato dielétrico e um plano de terra. Seu funcionamento se baseia na ressonância eletromagnética, na qual o patch atua como cavidade ressonante responsável pela irradiação [2]. O desempenho depende das dimensões do patch e das propriedades do substrato, parâmetros que podem ser calculados por equações que relacionam comprimento efetivo, largura e permissividade elétrica à frequência de operação.

2 DESENVOLVIMENTO

As antenas microstrip possuem estrutura simples, composta por um condutor superior denominado patch, um substrato dielétrico e um plano de terra na parte inferior. A frequência de ressonância de uma antena patch retangular pode ser aproximada pela expressão [3]:

$$f_r = \frac{c}{2L_{ef}\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (1)$$

Onde:

f_r é a frequência de ressonância (Hz);

c é a velocidade da luz no vácuo;

L_{ef} é o comprimento elétrico efetivo do patch;

ϵ_{ef} é a permissividade dielétrica efetiva do substrato.

O comprimento efetivo é obtido a partir da soma do comprimento físico e da extensão de franja de campo, dada por:

$$L_{ef} = L + 2\Delta L \quad (2)$$

Sendo Δ a extensão de franja de campo, calculada por:

$$\Delta L = 0,412h \cdot \frac{(\epsilon_{ef}+0,3)(\frac{W}{h}+0,264)}{(\epsilon_{ef}-0,258)(\frac{W}{h}+0,8)} \quad (3)$$

A permissividade efetiva do substrato é:

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \cdot \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Onde:

ϵ_r é a constante dielétrica do substrato;

h é a altura do substrato;

W é a largura do patch.

2.1 Simulação no ANSYS HFSS

Com as dimensões estimadas, a antena foi projetada no software ANSYS HFSS, ferramenta que possibilita a análise eletromagnética tridimensional. Na simulação, avaliou-se o parâmetro S11, que indicou boa adaptação de impedância na frequência desejada, com valor inferior a -10 dB em torno de 2,2 GHz. Também foram analisados a largura de banda, o diagrama de radiação e o ganho da antena, confirmando um comportamento direcional coerente com a teoria. Essa etapa de simulação foi essencial para refinar o projeto e ajustar dimensões que, na prática, sofrem pequenas variações devido ao substrato e à alimentação. As Figuras I até V mostram esse desenvolvimento.

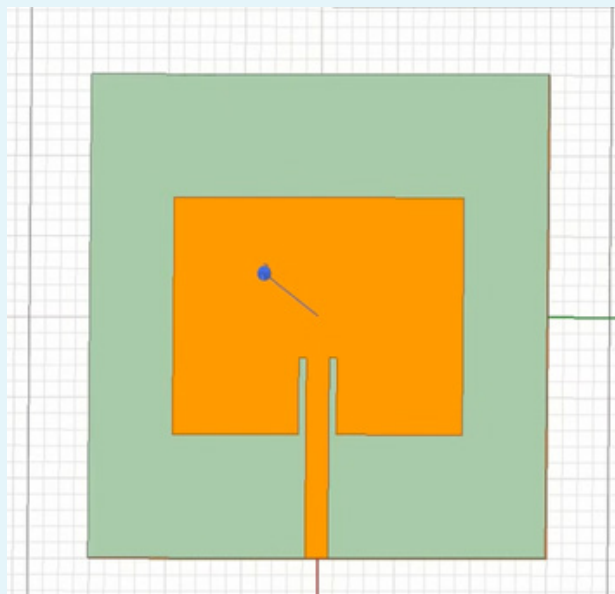


Figura 1: Antena simulada.

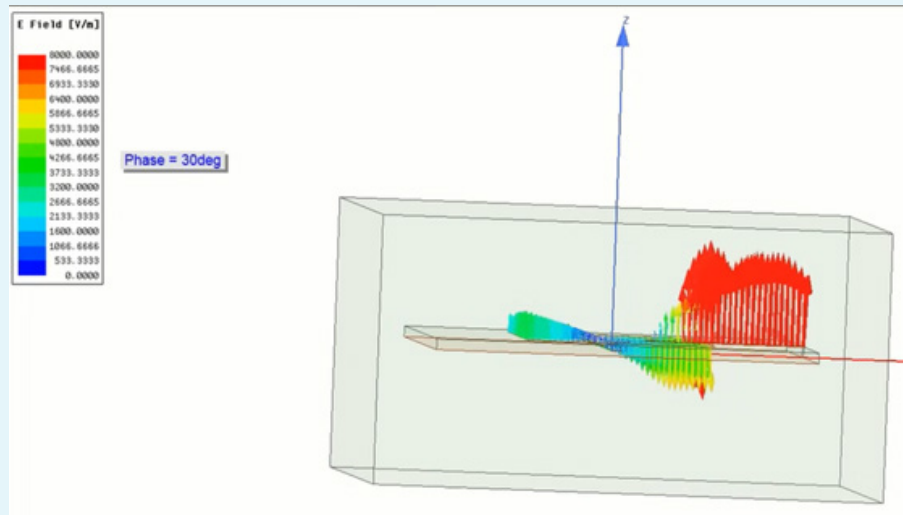


Figura II: Ondas de propagação na antena.

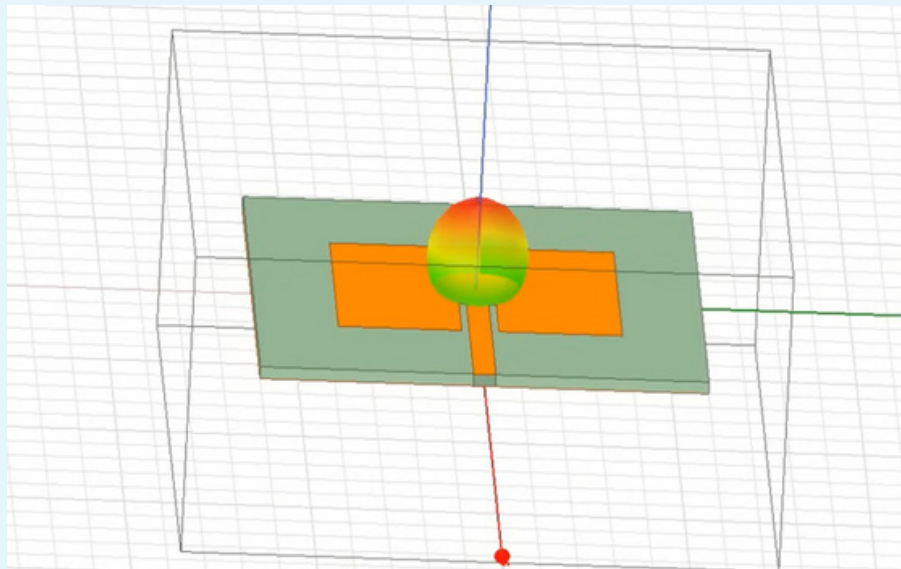


Figura III: Diagrama de radiação tridimensional.

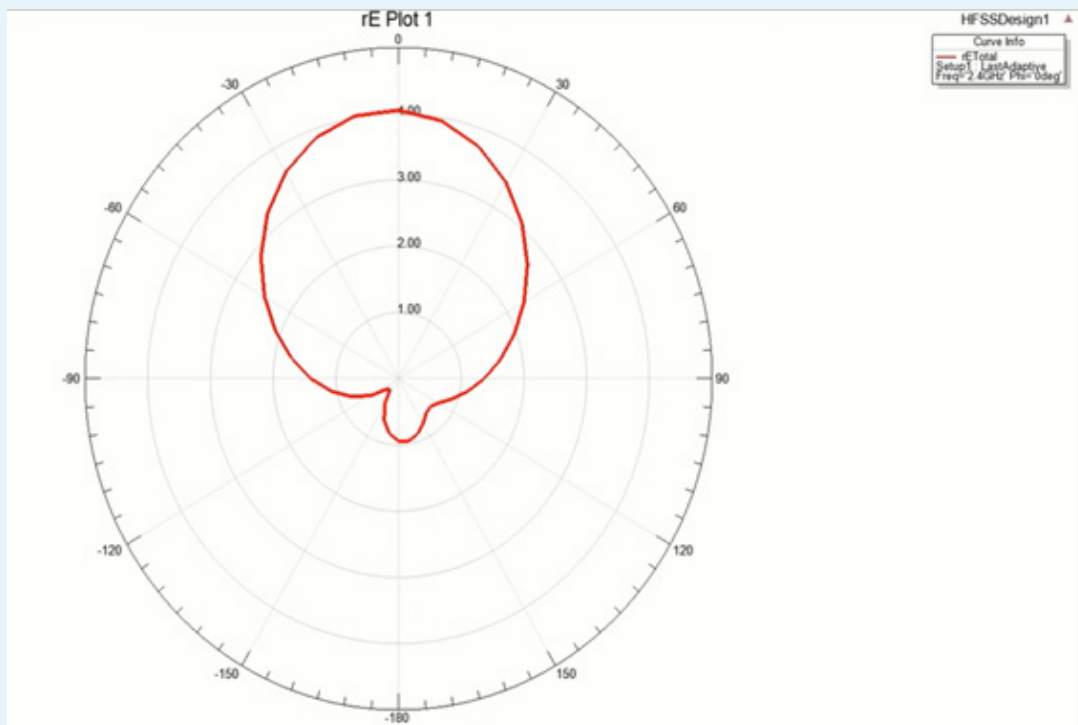


Figura IV: Diagrama de radiação de campo distante da antena.

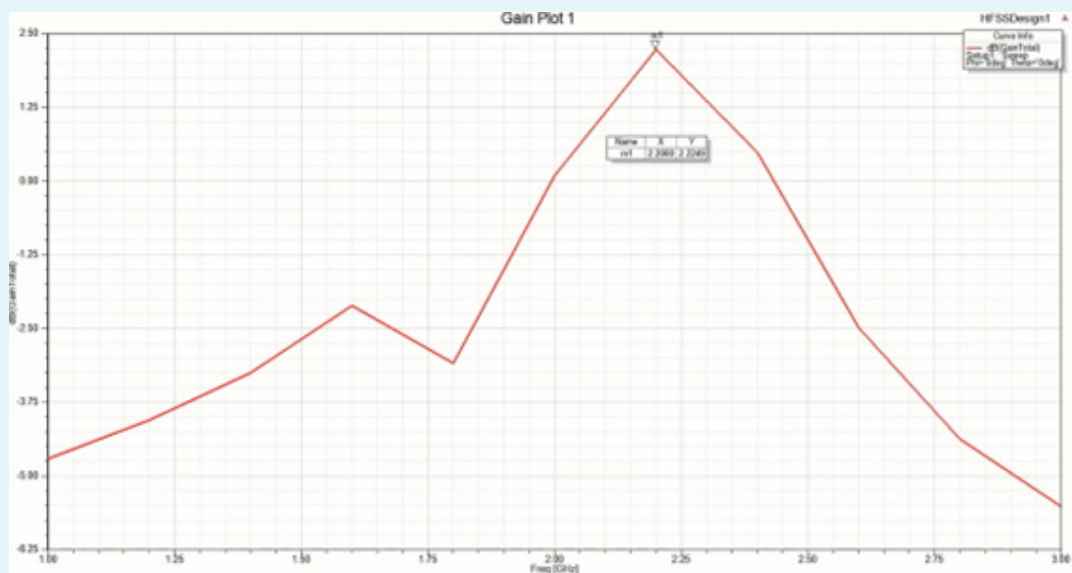


Figura V: Diagrama de ganho da antena.

2.2 Fabricação da Antena

A etapa seguinte consistiu na fabricação da antena em placa de fenolite, escolhida pela facilidade de manuseio. O processo envolveu a transferência do layout do patch para a superfície cobreada, seguida da corrosão em perclorato de ferro para remoção do excesso de cobre, restando apenas o desenho da antena. Por fim, o conector de entrada foi soldado, finalizando a montagem física. A Figura VI ilustra a montagem final.

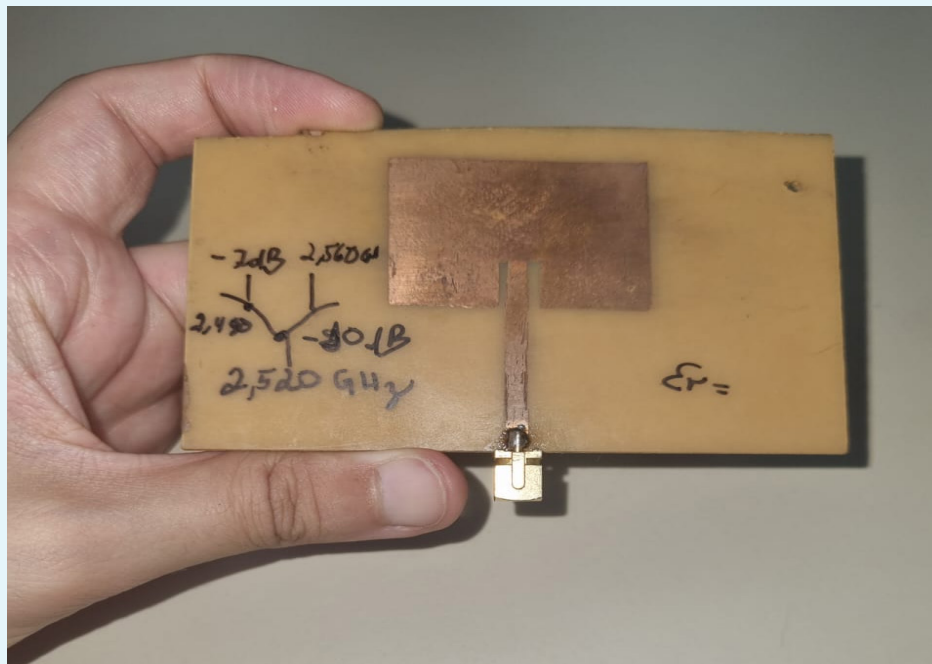


Figura VI: Antena confeccionada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A antena projetada no HFSS apresentou ressonância em 2,25 GHz, com retorno de perda em torno de -10 dB, largura de banda de aproximadamente 100 MHz e ganho estimado de 6 dBi. Após a fabricação em fenolite e testes com o NanoVNA, observou-se ressonância prática em 2,5 GHz, com S_{11} abaixo de -10 dB, garantindo boa adaptação de impedância. O ganho medido ficou entre 4 e 5 dBi, próximo ao previsto.

4 CONCLUSÃO

Foi possível demonstrar a consistência entre teoria, simulação e prática, comprovando que a metodologia empregada permite não apenas projetar, mas também fabricar e validar experimentalmente uma antena microstrip de forma eficiente e confiável.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio do Instituto de Pesquisa e Tecnologia do Estado de São Paulo. Agradecemos também aos colegas do LGE pela colaboração.

6 REFERÊNCIAS

- L. A. de Asis, *Multi Purpose Wireless Communication Antenna Design: Microstrip Antenna*. Journal of Research in Science and Engineering, vol. 6, no. 12, pp. 8–12, 2024.
- P. L. V. Jannuzzi, *Estudo de métodos de caracterização de antenas em ambiente anecoico*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- M. Grilo and F. S. Correra, "Antena patch retangular em substrato têxtil alimentada via acoplamento por proximidade," in *Anais do Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag)*, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS ESTRUTURAIS APLICADAS AO PROJETO MECÂNICO DE UM COMPRESSOR CENTRÍFUGO OPERANDO COM CO₂ SUPERCRÍTICO

D.Z. LIMA¹, W.G. FERREIRA¹, D.J. DEZAN¹,
R.L. STOETERAU², J.I. YANAGIHARA²

¹ Universidade Federal do ABC,
Centro de Eng., Modelagem e
Ciências Sociais Aplicadas

² Universidade de São Paulo,
Departamento de Eng. Meca-
trônica e Sistemas Mecânicos

E-mail para contato: diego.
zilli@ufabc.edu.br

RESUMO – Este trabalho apresenta as análises estruturais estáticas e dinâmicas aplicadas ao projeto de um compressor centrífugo de teste destinado a operar com CO₂ em estado supercrítico (sCO₂). O desenvolvimento exigiu simulações computacionais multidisciplinares, integrando análises aerodinâmicas, rotodinâmicas e estruturais, com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) e seguindo critérios normalizados. Os resultados mostraram que tanto o impelidor quanto a carcaça atendem aos limites de tensão, deslocamento e integridade estrutural, enquanto a análise rotodinâmica mostrou operação segura, com amplitudes de vibração dentro dos limites normativos.

1 INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO₂), principal gás de efeito estufa, teve sua concentração atmosférica aumentada de 280 ppm em 1750 para mais de 400 ppm nos últimos anos, motivando o desenvolvimento de tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) [1]. Entre as alternativas, destaca-se o uso do CO₂ em estado supercrítico (sCO₂), que oferece vantagens como estruturas compactas e alta eficiência de compressão, mas impõe desafios significativos aos projetos aerodinâmicos e estruturais dos compressores [2]. O dimensionamento estrutural de compressores centrífugos para sCO₂ é particularmente crítico, pois deve resistir a elevadas pressões, densidades e velocidades de rotação, exigindo simulações computacionais multidisciplinares [3]. Este trabalho apresenta as análises estruturais estáticas e dinâmicas fundamentais aplicadas ao projeto de um compressor centrífugo de teste destinado a operar com CO₂ supercrítico.

2 METODOLOGIA

O principal método utilizado nas análises estruturais foi o Método dos Elementos Finitos (MEF). Detalhes sobre o método podem ser encontrados em referências clássicas, como [4].

2.1 Análise estrutural do impelidor

O impelidor é o componente rotativo central do compressor centrífugo, fundamental para seu desempenho e responsável por transferir energia cinética para o fluido de trabalho. A análise estrutural deve levar em conta os carregamentos inerciais, provenientes da alta rotação de 50000RPM, e os carregamentos aerodinâmicos, devido à interação fluido-estrutural.

Os critérios de projeto consideram fatores de segurança disponíveis na literatura, por exemplo, máxima tensão inferior a 90% do limite de escoamento, inferior a 66.7% do limite último do material e margem de burst superior a 20%. Além da verificação do comportamento estático, o comportamento dinâmico do impelidor deve ser analisado de forma criteriosa, conforme detalhado no fluxograma da Figura 1.

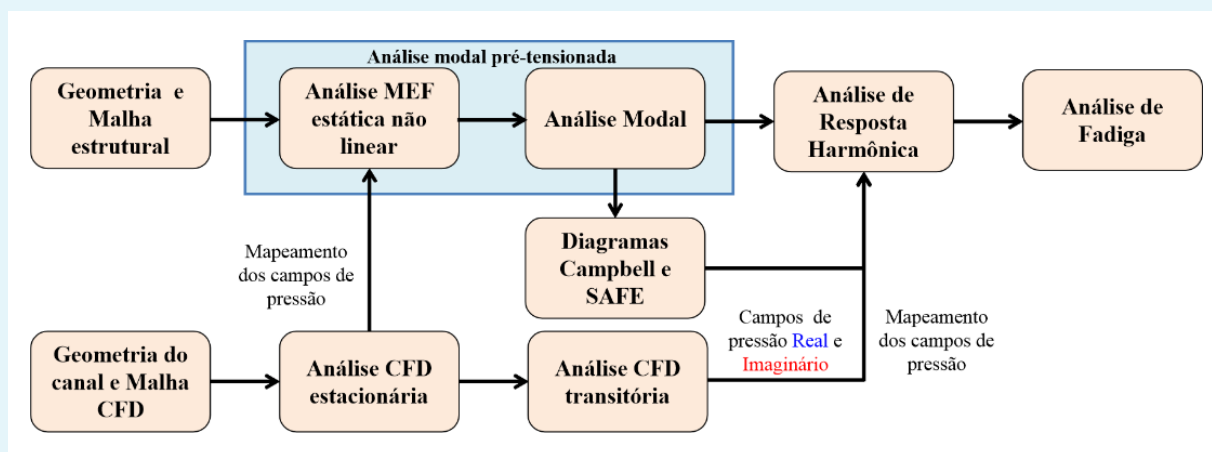


Figura 1: Fluxograma completo das simulações computacionais para análise do impelidor.

2.2 Análise da rotodinâmica lateral

Altas amplitudes de vibração podem comprometer a segurança, levando a falhas prematuras ou até mesmo catastróficas. A análise da rotodinâmica lateral permite prever e mitigar vibrações excessivas, assegurando que o compressor opere de forma segura e eficiente ao longo de sua vida útil, com folgas mínimas. As simulações foram conduzidas de acordo com os requerimentos descritos nas normas da American Petroleum Institute (API) 617 e 684 e seguiram o processo ilustrado na Figura 2.

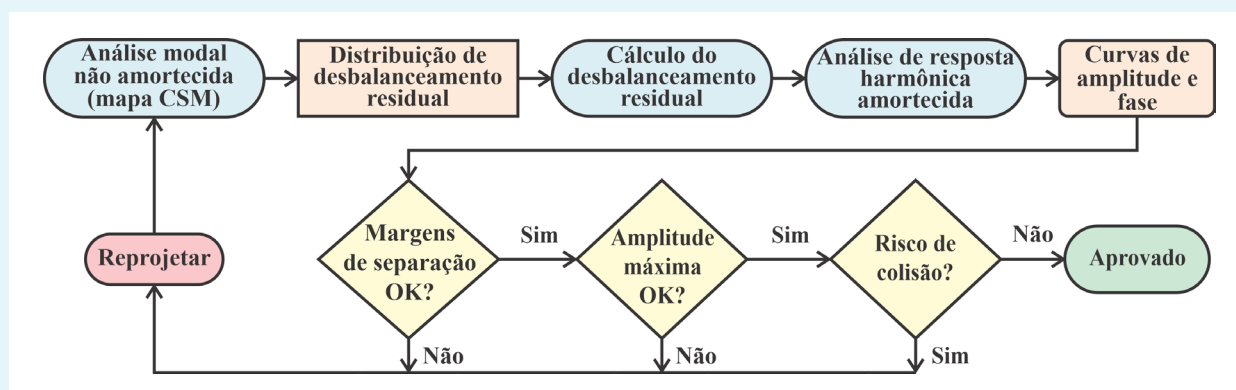


Figura 2: Fluxograma de análise da rotodinâmica lateral de acordo com API 684.

2.3 Análise estrutural da carcaça do compressor

A carcaça é um componente estrutural essencial em turbomáquinas, responsável por conter o rotor, o eixo e o fluido de trabalho em alta pressão. A pressão máxima de trabalho do projeto é de 120bar. As análises estruturais foram realizadas seguindo critérios da norma API 617. A avaliação estrutural incluiu condições de carregamento sob pressão hidrostática de 140bar, aplicação de pré-carga nos parafusos, para simular o torqueamento de montagem, e a consideração dos efeitos de carregamento térmico na condição de máxima pressão de trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise estrutural do impelidor

Alguns resultados são apresentados na Figura 3. A Figura 3a mostra as pressões aerodinâmicas mapeadas na malha do MEF. No entanto, para considerar o equilíbrio das forças axiais, as pressões nas cavidades traseiras também devem ser aplicadas, conforme Figura 3b. Como amostra dos resultados das análises, nas Figura 3c e 3d, são apresentados os campos de deslocamento e de tensão equivalentes, respectivamente, para a condição de sobre velocidade, ou seja, carregamento inercial de 57500RPM.

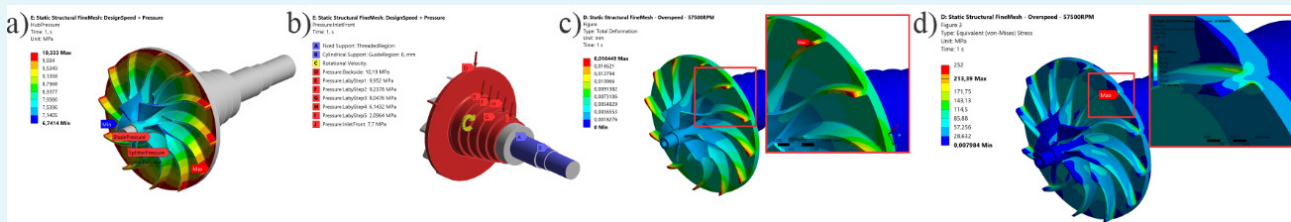


Figura 3: Pressão mapeada para a malha MEF a); Carregamentos de pressão na região traseira b); Campo de deslocamentos c); Campo de tensões equivalentes d).

3.2 Análise da rotodinâmica lateral

Na Figura 4a, é apresentado o modelo do MEF utilizado para a análise da rotodinâmica lateral. Já na Figura 4b, está o resultado da análise modal não amortecida resumida no mapa de velocidades críticas. Por fim, na Figura 4c, está o gráfico de resposta harmônica amortecida com desbalanceamento residual. A faixa de operação está representada pelas linhas tracejadas vermelhas e a curva de resposta em preto. A linha azul representa o limite de amplitude de acordo com a norma API 684, mostrando que o risco de colisão entre as partes estacionárias e rotativas está eliminado.

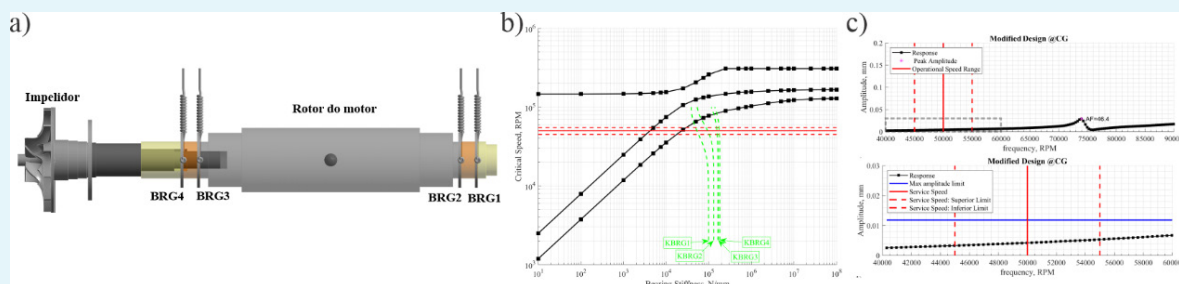


Figura 4: Modelo da análise de rotodinâmica a); Mapa de velocidades críticas b); Resposta harmônica amortecida c).

3.3 Análise estrutural da carcaça do compressor

A Figura 5a apresenta o modelo da montagem completa da carcaça com regiões em vermelho sendo as superfícies com carregamento de pressão. O campo de temperaturas obtido está ilustrado na 5b, com temperatura mínima próxima dos -20°C e máxima de 75°C . Já o campo de tensões é mostrado na Figura 5c, na qual toda a estrutura apresenta níveis de tensão abaixo do limite de 25% da tensão última do material, exceto pelas regiões de contato com a cabeça dos parafusos. A última avaliação, Figura 5d, é com relação à resistência ao vazamento na interface. As regiões vermelhas representam possíveis vazamentos, nota-se que não há cruzamento radial destas regiões, mostrando que vazamentos não são prováveis de ocorrer.

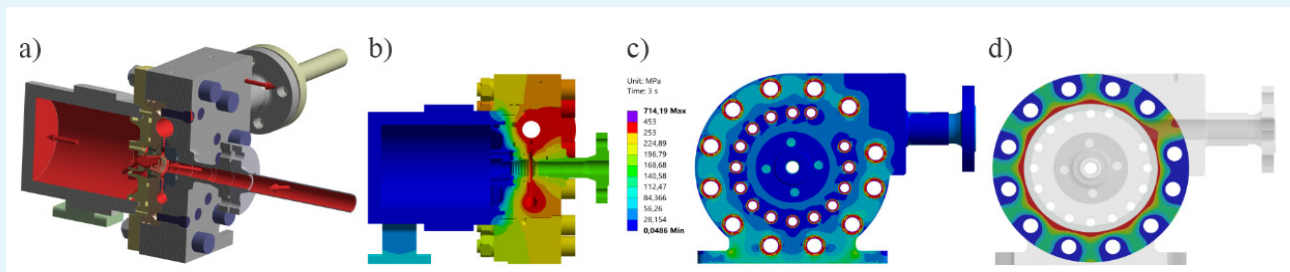


Figura 5: Superfícies com carregamento de pressão a); Campo de temperaturas b); Tensão equivalente c); Pressão de contato na interface d).

4 CONCLUSÃO

As simulações computacionais realizadas demonstraram a viabilidade do projeto mecânico de um compressor centrífugo para aplicações com sCO_2 , garantindo integridade estrutural, segurança operacional e desempenho adequado para as condições de alta pressão e rotação que são esperadas durante os testes.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos o suporte do RCGI – Research Centre for Greenhouse Gas Innovation, sediado na Universidade de São Paulo (USP) e patrocinado pela FAPESP – (2014/50279-4 e 2020/15230-5) e pela Shell Brasil, assim como pela ANP.

6 REFERÊNCIAS

- [1] UMEZAWA T et al. Statistical characterization of urban CO_2 emission signals observed by commercial airliner measurements. Scientific reports, v. 10, n. 1, p. 7963, 2020.
- [2] LETTIERI C et al. Characterization of nonequilibrium condensation of supercritical carbon dioxide in a de laval nozzle. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 140, n. 4, 2018.
- [3] BRUN K; FRIEDMAN P; DENNIS, R (Ed.). Fundamentals and applications of supercritical carbon dioxide (sCO_2) based power cycles. Woodhead publishing, 2017.
- [4] BATHE KJ, Finite element procedures. Klaus-Jurgen Bathe, 2006.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E CINÉTICA DE Vulcanização EM FORNO INDUSTRIAL

N. de O. ARMANDO¹, J.L. de PAIVA¹



¹ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia Química.

E-mail para contato:
jolpaiva@usp.br

RESUMO – Estudou-se a modelagem e simulação de um forno contínuo de vulcanização de um perfil de borracha extrudado, a partir de parâmetros e dados da operação de uma unidade industrial. Modelou-se o sistema e implementou-se um procedimento de cálculo do campo de temperaturas e do grau de cura do perfil de borracha, a partir de um modelo térmico considerando os mecanismos de condução, convecção e radiação térmica e de um modelo fenomenológico de cinética de cura. Estes modelos representaram de forma confiável o processo de vulcanização do forno contínuo, confirmando-se a partir da análise experimental do processo.

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento de peças em fornos contínuos é muito utilizado por indústrias fabricantes de peças extrudadas de borracha tais como tubos, cabos, guarnições, cordões e perfis diversos. Estes fornos, também conhecidos como túneis de vulcanização, consistem em uma esteira que transporta o perfil de borracha através de uma tubulação onde a peça é aquecida, podendo esta transferência de calor ser do tipo condução, convecção, radiação (micro-ondas, infravermelha e térmica). Este tipo de processo deve ser analisado como uma combinação dos processos de transferência de calor e da cinética de cura [1].

2 METODOLOGIA

2.1 Forno Industrial de Vulcanização Contínua

O forno é constituído por dois tubos concêntricos de seção retangular (altura = 0,06 m e largura = 0,12 m) e com 25 m de comprimento. Na região entre os tubos circula o óleo aquecido e no interior do túnel (tubo interno) o perfil de borracha é transportado sobre uma esteira transportadora metálica sem contato direto com o óleo, conforme mostrado na Figura 1. Os ensaios foram realizados na condição de regime permanente, com velocidade da esteira de 200 m/h e o óleo térmico à 230°C [2].

O sistema dispõe de três janelas de inspeção (E1, E2 e E3), indicadas na Figura 1. As temperaturas da parede do forno, esteira e do corpo de prova (borracha) foram medidas com o termômetro infravermelho, ajustando-se as emissividades em função do tipo de superfície.

Os corpos de prova são de composto cru em EPDM, acelerado com enxofre, nas dimensões de (10,25 x 10,25 x 200,00) mm. Estes corpos

de prova foram inseridos na entrada do forno e a cada estágio foram coletadas duas peças, na seguinte sequência: saída, estágio 3, estágio 2 e estágio 1. A cada coleta a temperatura da superfície da peça foi mensurada por termômetro infravermelho.

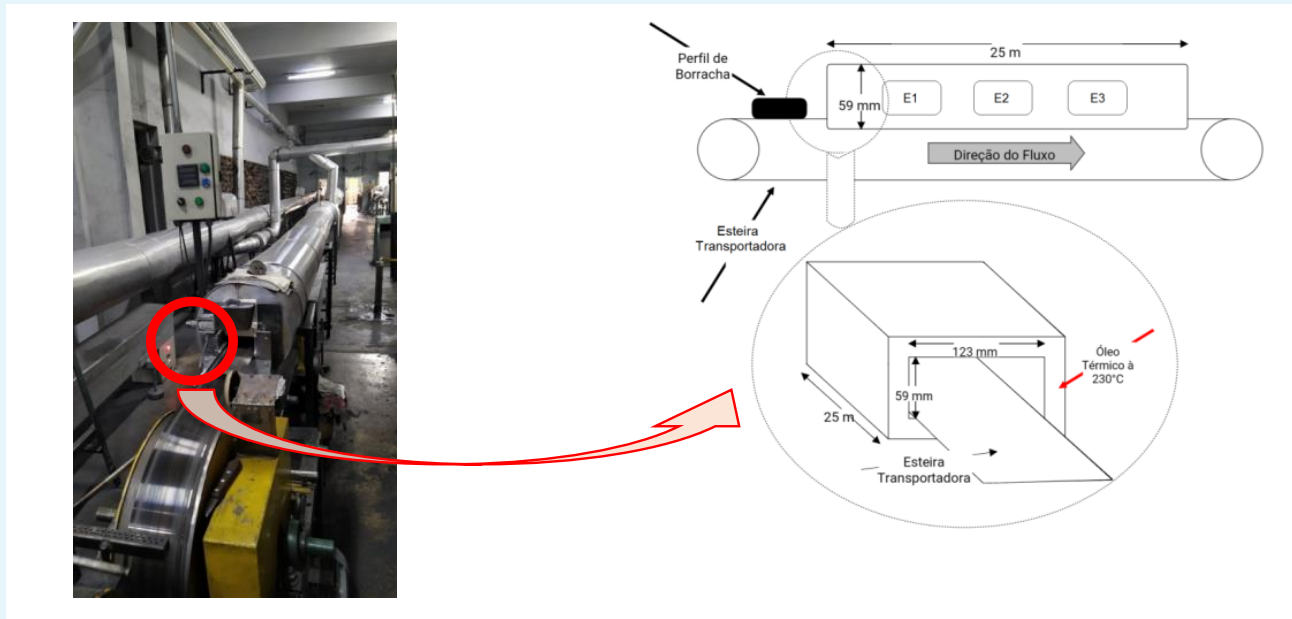


Figura 1: Foto e esquema do forno contínuo

2.2 Reometria e Cinética de Cura

A Figura 2a mostra o Reômetro, que é um equipamento de laboratório que opera como uma pequena prensa, no qual: o corpo de prova fica no centro entre dois platôs aquecidos, com a presença de uma pinça oscilatória que faz com que o composto flua no interior do molde até completar a cura. Esta medição é executada a uma temperatura fixa, sendo determinada a curva reométrica. A Figura 2b mostra uma curva reométrica típica de vulcanização de um elastômero, que ocorre em três fases: "Scorch", Cura e Platô.

A "Scorch" representa o tempo de indução durante o processamento, no qual o composto tem sua viscosidade reduzida sem que seja iniciada a reação de vulcanização. Na fase de Cura, tem-se o início à vulcanização, promovendo a mudança do estado plástico para o elástico. Ao término desta etapa é obtido o tempo denominado ótimo de vulcanização (T90 – quando se atinge 90% de conversão da reação, ou seja 90% do composto está vulcanizado). Na última fase denominada Platô, o elastômero atinge as propriedades reológicas desejadas (torque máximo – TMáx) [3].

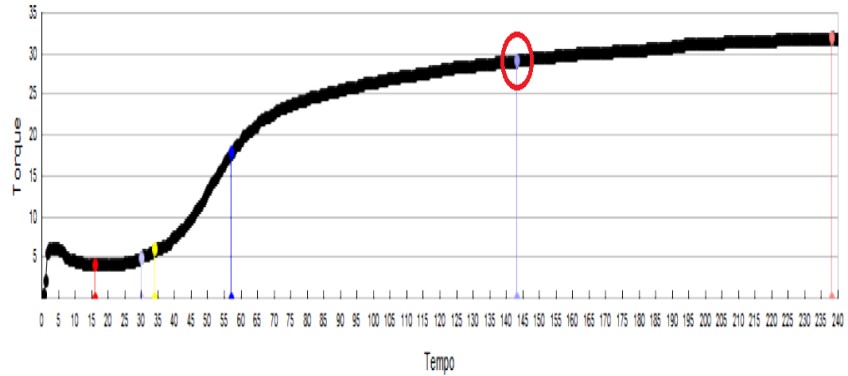


Figura 2: a) Foto do Reômetro e b) Curva reométrica típica

2.3. Modelagem

Para a modelagem considerou-se a geometria da seção da peça bidimensional por meio da Equação (1) de energia térmica, que foi discretizada pelo método explícito simples expresso pela Equação 2 [4]. Determinaram-se os campos de temperatura e do grau de cura ao longo do tempo considerando-se uma malha uniforme com 100 elementos, que apresenta maior facilidade de implementação no software Microsoft® Office Excel®.

$$\frac{DT}{Dt} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + Fo(T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n) + Fo(T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{k} g_{i,j}^n \quad (2)$$

$$q''_c = h_c(T_{Ar} - T_p) \quad (3)$$

$$q''_R = h_R(T_{FN} - T_p) \quad (4)$$

$$h_R = \epsilon_P \sigma (T_{FN}^4 - T_p^4) / (T_{FN} - T_p) = \epsilon_P \sigma (T_{FN} + T_p)(T_{FN}^2 + T_p^2) \quad (5)$$

Diversas pesquisas foram desenvolvidas para obtenção de uma correlação entre os dados obtidos em ensaios reométricos das amostras de borracha e a cinética de reação. Neste estudo, a cinética de cura foi obtida experimentalmente e ajustada pelo modelo de Isayev [5], que considera uma única cinética de vulcanização (constante cinética k (s^{-n})) e o tempo de indução

(t_1 (s)) relacionadas ao grau de vulcanização (α). Os parâmetros cinéticos foram obtidos e bem correlacionados pelas equações (6), (7) e (8), sendo $n = 1,5$.

$$t_i = 2,41 \cdot 10^{-4} \exp(45012/RT) \quad (6)$$

$$\alpha = k(t - t_i)^n / [1 + k(t - t_i)^n] \quad (7)$$

$$k = 3.50 \cdot 10^6 \exp(-75107/RT) \quad (8)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra a evolução do grau de conversão e da temperatura calculados pela integração da Equação (1) acoplada com as Equações (6), (7) e (8). Nota-se que há um ponto mais frio localizado no centro superior da peça demonstrando a forte influência da troca de calor por condução entre a esteira transportadora e o perfil de borracha. Ressalta-se o efeito do aquecimento da parte superior da peça indicando a influência da radiação térmica entre as paredes do forno e o corpo de prova.

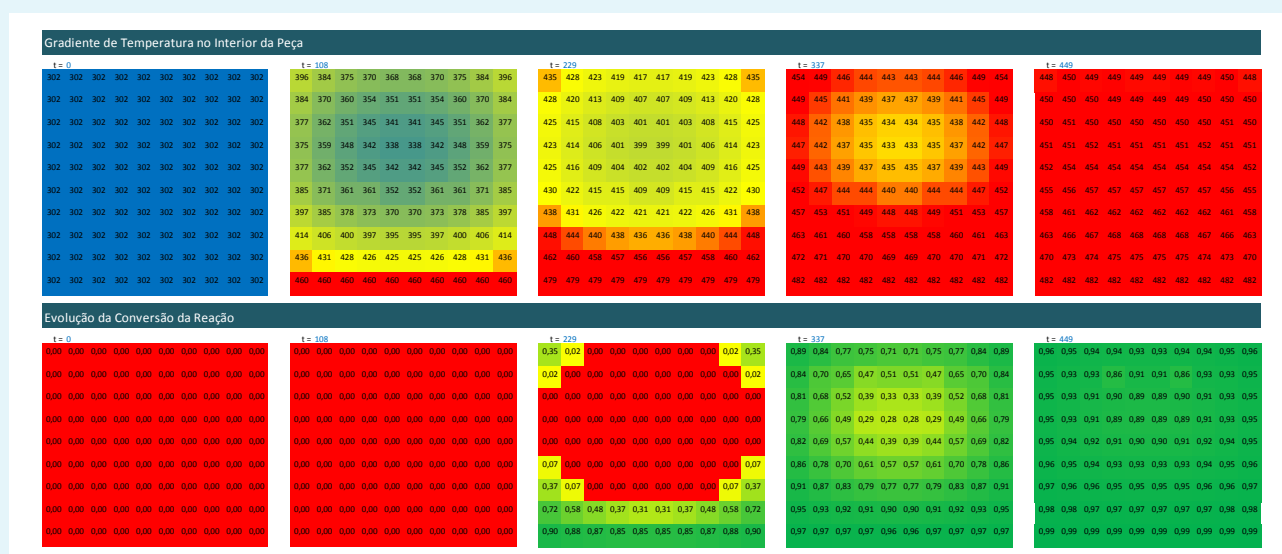


Figura 3: Temperatura no interior da peça e conversão da vulcanização nos estágios E1, E2, E3 e saída - Sem aquecimento prévio da esteira.

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de conversão e temperatura do ponto de menor temperatura no interior da peça. Observa-se a importância do tempo de residência da peça e do pré-aquecimento da esteira. O tempo de indução é superior a 300 s, praticamente 2/3 do tempo de residência.

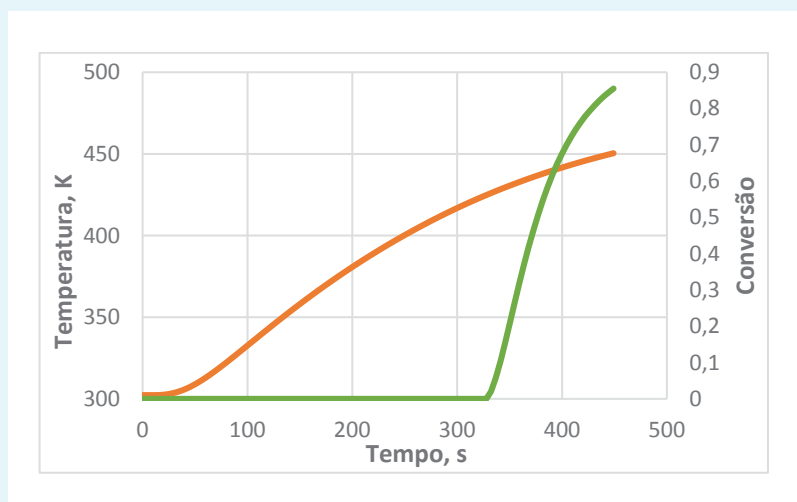


Figura 4: Temperatura e conversão no ponto crítico

4 CONCLUSÃO

O modelo térmico acoplado com a cinética de cura representa de forma confiável o processo de vulcanização do forno contínuo, corroborado pela análise experimental do processo. Apresenta-se uma ferramenta de gerenciamento de um processo industrial com confiabilidade para avaliação de produtividade de fornos contínuos de vulcanização.

O modelo da cinética de cura, obtido a partir de dados de reômetria, acoplado ao modelo de transferência de calor, incluindo a radiação térmica, representaram de forma confiável o desempenho da unidade industrial de vulcanização.

5 REFERÊNCIAS

- [1] FREAKLEY, PK., *Rubber Processing and Production Organization*. New York: Plenum Press, 1985.
- [2] ARMANDO, NO., *Estudo da transferência de calor em processo contínuo de vulcanização*. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2024.
- [3] GARBIM, V. J. (2011). *Borrachas – Tecnologia, Características, Compostos e Aplicações*. Publit Soluções Editoriais.
- [4] OZISIK, MN, ORLANDE, HR, COLAÇO, MJ, COTTA, RM, *Finite Difference Methods in Heat Transfer*. 2nd edition. CRC Press, 2017.
- [5] ISAYEV, A, DENG, J S, *Nonisothermal Vulcanization of Rubber Compounds*. The University of Akron, Polymer Engineering Center, Akron, 1987.

