

Operabilidade e regiões operacionais viáveis em sistemas de refrigeração por compressão a vapor via simulação em DWSIM

Luellen Pereira Rocha^(a), Rebeca Albino De Jesus^(a), Heleno Bispo^(a), Nicolas Spogis^(b*)

^(a) Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, Brasil

^(b) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Química, Campinas-SP, Brasil

*nicolas.spogis@gmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de operabilidade de um chiller de compressão a vapor operando com R-410A, modelado no simulador DWSIM 9.0.5. A partir de um conjunto abrangente de condições operacionais, foram avaliadas a capacidade de resfriamento, o consumo de utilidades e a eficiência energética do sistema. A aplicação dos conceitos de espaço de entrada disponível, espaço de saída atingível e espaço de saída desejado permitiu identificar regiões operacionais viáveis e analisar conflitos entre capacidade de refrigeração e eficiência. Os resultados indicam forte influência da temperatura de evaporação sobre o desempenho energético, enquanto as demandas de utilidades dependem de múltiplas variáveis operacionais. O estudo demonstra o potencial da análise de operabilidade como ferramenta de apoio ao projeto e à operação de sistemas de refrigeração, permitindo a identificação de trade-offs e a definição de condições operacionais mais robustas.

Palavras-chave: operabilidade; *chiller*; R-410A; DWSIM; simulação de processos.

1. Introdução

Sistemas de refrigeração por compressão a vapor são amplamente utilizados em climatização, refrigeração industrial e processos farmacêuticos. O projeto e a operação desses sistemas envolvem a seleção de condições operacionais que atendam simultaneamente a requisitos de capacidade de refrigeração, eficiência energética e consumo de utilidades. A crescente demanda por eficiência energética e a adoção de refrigerantes com menor impacto ambiental tornam essencial a avaliação sistemática do desempenho do *chiller* em amplas faixas operacionais.

A análise de operabilidade, originalmente proposta por Vinson e Georgakis (2000) e posteriormente formalizada por Georgakis et al. (2003), fornece um arcabouço matemático para avaliar a capacidade de um processo de atingir saídas desejadas a partir de entradas disponíveis. Os conceitos fundamentais incluem o Espaço de Entrada Disponível (AIS), que define as faixas de variáveis manipuladas; o Espaço de Saída Atingível (AOS), que é a imagem do AIS pelo modelo do processo; e o Espaço de Saída Desejado (DOS), que especifica os requisitos de desempenho. O Índice de Operabilidade (OI) quantifica a fração do DOS coberta pelo AOS, variando de 0 (nenhum requisito atendido) a 1 (todos os requisitos atendidos).

Gazzaneo et al. (2020) revisaram os avanços em algoritmos de operabilidade, destacando a extensão para sistemas não-lineares e multivariáveis. Mais recentemente, Alves e Lima (2024) exploraram a seleção de estruturas de controle com base em análise de operabilidade. No entanto, aplicações de análise de operabilidade a sistemas de refrigeração por compressão a vapor permanecem escassas na literatura, apesar do caráter intrinsecamente não-linear desses processos.

O DWSIM (de Medeiros, 2023) é um simulador de processos de código aberto que permite a modelagem rigorosa de ciclos de refrigeração, incluindo compressores com eficiência isentrópica, trocadores de calor e válvulas de expansão. A utilização de simuladores de código aberto favorece a reprodutibilidade científica e a acessibilidade do estudo.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise de operabilidade completa de um *chiller* de compressão a vapor operando com R-410A, utilizando 2.000 cenários simulados no DWSIM 9.0.5. A contribuição principal consiste na aplicação sistemática dos conceitos de AIS, AOS e DOS a um sistema de refrigeração, quantificando o impacto de restrições de COP sobre a região operacional viável e identificando os trade-offs entre capacidade e eficiência energética.

2. Metodologia

2.1 Descrição do processo

O sistema consiste em um ciclo de compressão a vapor simples composto por compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador, utilizando R-410A como refrigerante. O R-410A é uma mistura quase-azeotrópica de R-32 e R-125 (50/50 em massa), amplamente utilizada em *chillers* comerciais de pequeno e médio porte. O ciclo foi simulado no DWSIM com eficiência isentrópica do compressor fixada em 0,75. A água gelada é resfriada de 25 para 5 °C no evaporador, e a água de resfriamento no condensador entra a 30 °C e sai a 35 °C. A temperatura de condensação foi fixada em 40 °C.

2.2 Geração do Dataset

Um *dataset* de 2.000 cenários estacionários foi gerado por amostragem uniforme no espaço de entrada bidimensional. A distribuição uniforme foi adotada para garantir cobertura homogênea do AIS, condição essencial para o cálculo correto do índice de operabilidade. As duas variáveis de entrada e suas faixas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis de entrada e saída do estudo.

Variável	Papel	Faixa	Unidade
T evaporação	Entrada	-5 a 2	°C
Vazão compressor	Entrada	500 a 600	m ³ /h
Água gelada	Saída	20,6 - 31,0	m ³ /h
Água torre	Saída	108,5 - 156,1	m ³ /h
COP	Restrição	3,40 - 4,29	-

2.3 Análise de operabilidade

A análise de operabilidade foi conduzida com base no *framework* de Georgakis et al. (2003). O AIS corresponde ao retângulo definido pelas faixas das duas entradas. O AOS foi obtido pela avaliação do modelo de simulação em todos os 2.000 pontos do AIS, gerando os pares (vazão de água gelada, vazão de água na torre). O DOS foi definido como regiões retangulares no espaço de saída, com restrições adicionais de COP mínimo. O OI foi calculado como a razão entre o número de pontos que atendem simultaneamente todas as restrições do DOS e o número total de pontos.

Foram avaliados seis cenários de DOS com diferentes níveis de exigência, variando os limites mínimos de vazão de água gelada (24-26 m³/h), máximos de vazão de água na torre (132-140 m³/h) e mínimos de COP (3,5-4,0). Adicionalmente, foram gerados *heatmaps* de operabilidade local no espaço de entrada, discretizado em uma grade 14×14, permitindo identificar as regiões do AIS com maior probabilidade de atender às especificações.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise exploratória

A Figura 1 apresenta a matriz de correlação de Pearson para as cinco variáveis do estudo. O resultado mais notável é a correlação quase perfeita entre a temperatura de evaporação e o COP ($R = 0,999$), indicando que o COP é essencialmente controlado por uma única variável de entrada. Este resultado é fisicamente consistente: como a temperatura de condensação é fixa (~40 °C), o COP depende quase exclusivamente do *lift* térmico, determinado pela temperatura de evaporação. A vazão do compressor, por outro lado, não afeta o COP ($R = 0,018$) mas contribui significativamente para a vazão de água gelada ($R = 0,619$) e para a vazão de água na torre ($R = 0,702$).

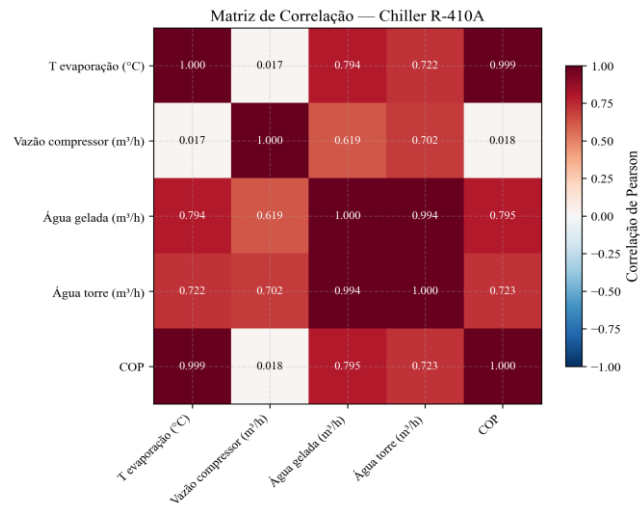


Figura 1. Matriz de correlação de Pearson para as variáveis do estudo.

3.2 Mapeamento AIS → AOS

A Figura 2 apresenta o mapeamento do espaço de entrada (AIS) para o espaço de saída (AOS). O painel (a) mostra a distribuição uniforme dos 2.000 pontos no AIS, coloridos pelo COP, evidenciando o gradiente horizontal controlado pela temperatura de evaporação. O painel (b) revela que o AOS tem formato de losango alongado, significativamente distorcido em relação ao retângulo do AIS. Esta distorção é uma consequência direta da não-linearidade do mapeamento e confirma que a análise de operabilidade é relevante para este sistema. O painel (c) mostra a dependência da vazão de água gelada em relação a ambas as entradas, com bandas de cor indicando o efeito da vazão do compressor. O painel (d) confirma a relação quase-linear entre temperatura de evaporação e COP, com ajuste quadrático apresentando $R^2 = 1,00$.

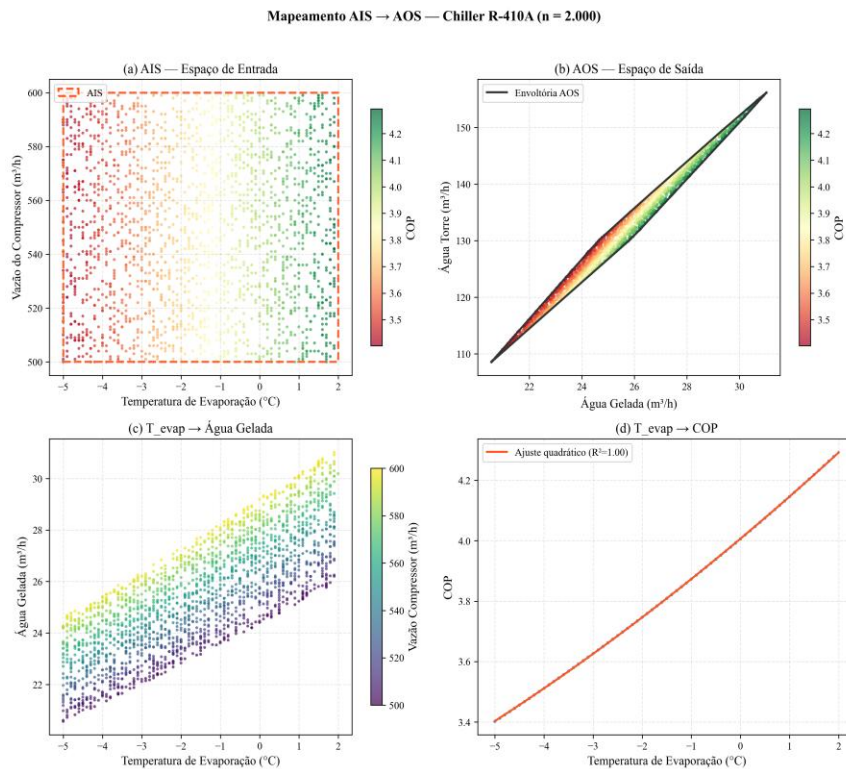


Figura 2. Mapeamento AIS → AOS do *chiller* R-410A (n = 2.000).

3.3 Índices de operabilidade

A Tabela 2 apresenta os índices de operabilidade para seis cenários de DOS. O OI varia de 48,0%, para o DOS relaxado, até 0,2% para o DOS restritivo, demonstrando a alta sensibilidade do índice às especificações. Quando a restrição de COP é removida (DOS 6), o OI sobe para 21,6%, indicando que a restrição de COP reduz a região viável em aproximadamente 36% em relação ao cenário sem restrição energética.

Tabela 2. Índices de operabilidade para diferentes cenários de DOS.

Cenário	CW mín	TW máx	COP mín	OI (%)	n viável
Relaxado	24	140	3,5	48,0	961
Moderado	25	135	3,7	16,4	329
Exigente	25	135	3,8	13,9	278
Restritivo	26	132	3,8	0,2	4
Ultra	25	135	4,0	8,1	161
Sem COP	25	135	-	21,6	431

A Figura 3 visualiza o AOS com três cenários de DOS sobrepostos, mostrando como o aumento da restrição de COP progressivamente reduz a região viável. Os pontos cinza representam cenários que não atendem à restrição de COP, enquanto os pontos coloridos indicam os cenários viáveis. A forma do DOS (retângulo) intersecta parcialmente o AOS (losango), evidenciando a incompatibilidade geométrica que fundamenta a análise de operabilidade.

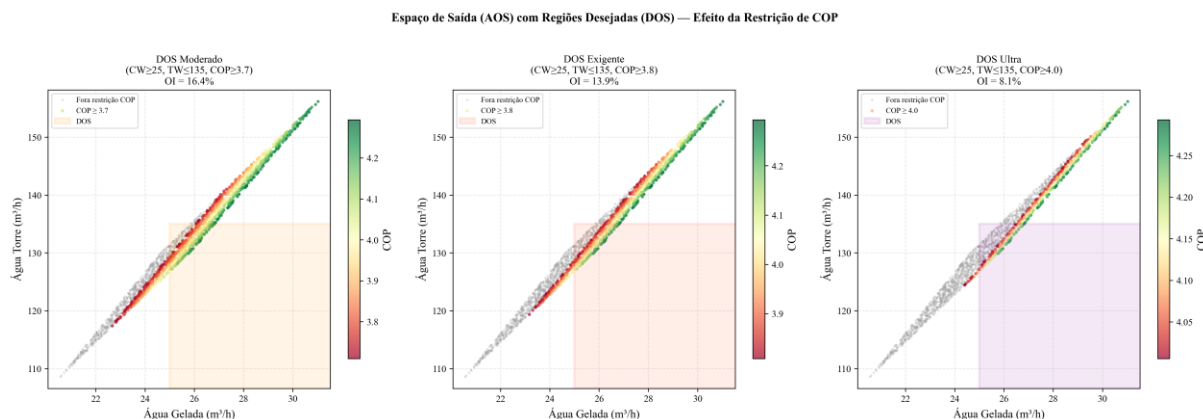


Figura 3. AOS com três cenários de DOS sobrepostos e respectivos OIs.

3.4 Mapa de operabilidade no espaço de entrada

A Figura 4 apresenta a projeção da viabilidade no espaço de entrada para três cenários de DOS. Observa-se um padrão diagonal claro: a região viável concentra-se na porção inferior direita do AIS, correspondendo a temperaturas de evaporação mais altas (maior COP) e vazões de compressor mais baixas (menor consumo de água na torre). Conforme o DOS se torna mais exigente, a região viável contrai-se progressivamente.

Região Viável no Espaço de Entrada (AIS) para Diferentes DOS

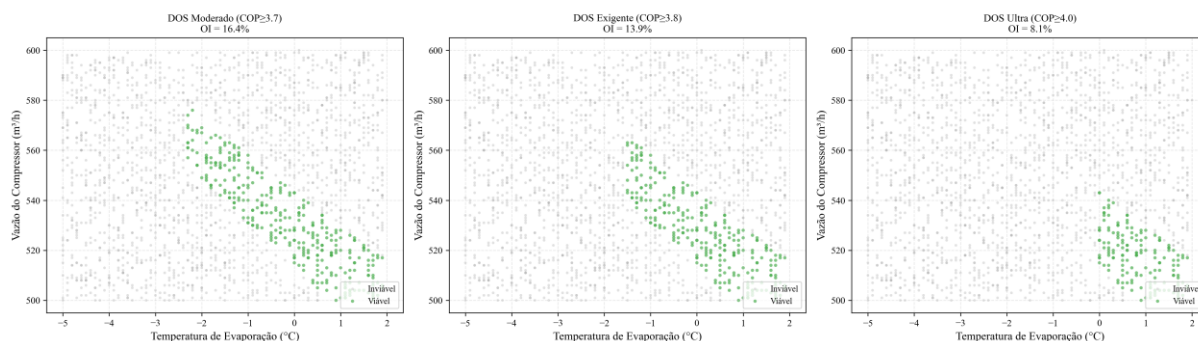


Figura 4. Região viável no espaço de entrada (AIS) para diferentes cenários de DOS.

A Figura 5 apresenta o *heatmap* de operabilidade local para o DOS exigente ($COP \geq 3,8$; água gelada ≥ 25 m³/h; água torre ≤ 135 m³/h). A grade 14×14 discretiza o AIS e calcula o OI em cada célula, revelando a fronteira de transição entre as regiões 0% e 100% de viabilidade. A transição é nítida e ocorre na diagonal, confirmando que ambas as entradas contribuem para a viabilidade, porém com papéis distintos: a temperatura de evaporação controla o COP enquanto a vazão do compressor controla a capacidade.

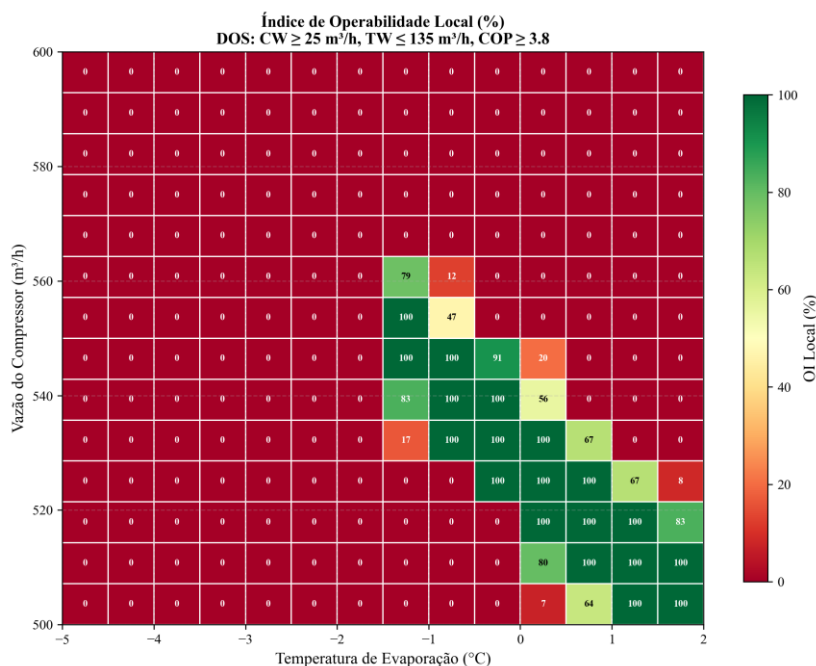


Figura 5. Heatmap de operabilidade local no espaço de entrada para o DOS exigente.

3.5 Análise de Trade-Offs

A Figura 6 evidencia os *trade-offs* fundamentais do sistema. O painel (a) mostra que para obter COP elevado ($\geq 3,8$) com alta capacidade de refrigeração (≥ 25 m³/h), a região viável é restrita. O painel (b) confirma a correlação quase linear entre água gelada e água de torre ($r = 0,994$), com as restrições de COP, água gelada e água de torre delimitando uma pequena zona de operação desejada. O painel (c) mostra que a razão água gelada/água de torre (indicador de eficiência) aumenta monotonicamente com o COP, independentemente da vazão do compressor.

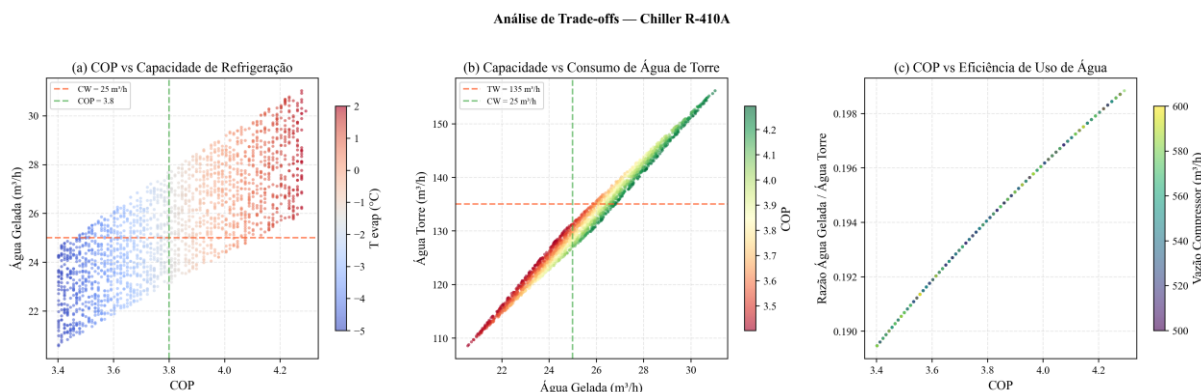


Figura 6. Análise de trade-offs: COP vs capacidade, capacidade vs consumo de torre e eficiência de uso de água.

4. Conclusão

A análise de operabilidade aplicada ao *chiller* de compressão a vapor com R-410A revelou aspectos fundamentais para o projeto e a operação do sistema. O índice de operabilidade mostrou-se altamente sensível às especificações de desempenho, variando de 48,0% para requisitos relaxados até 0,2% para requisitos restritivos, demonstrando que a definição adequada do DOS é muito importante. A restrição de COP mínimo reduziu consistentemente a região viável, com impacto mais severo quando combinada com requisitos simultâneos de capacidade e consumo de água. O mapeamento AIS → AOS revelou uma distorção significativa do espaço de saída, confirmando a não-linearidade do processo e justificando a necessidade de análise de operabilidade. O *heatmap* de operabilidade no espaço de entrada identificou claramente a fronteira de transição entre regiões viáveis e inviáveis, fornecendo uma ferramenta visual para a tomada de decisão operacional. Trabalhos futuros incluem a extensão da análise para outros refrigerantes, a incorporação de modelos *surrogate* para viabilizar otimização em tempo real e a integração com o framework de operabilidade inversa para determinar automaticamente as condições de entrada que atendem a especificações desejadas. O código-fonte completo da análise de operabilidade, incluindo os scripts de geração do *dataset*, análise estatística e visualizações, está disponível em repositório aberto no GitHub: <https://github.com/Spogis/chiller-operability-analysis>. O repositório permite a reprodução integral dos resultados apresentados neste trabalho.

Referências

- V. Alves e F. V. Lima: On the selection of control structures using process operability analysis, *Control Engineering Practice* (153), 106117, 2024.
- D. W. O. de Medeiros: DWSIM – Open Source Chemical Process Simulator, 2023. Disponível em: <https://dwsim.org>.
- V. Gazzaneo, J. C. Carrasco, D. R. Vinson e F. V. Lima: Process operability algorithms: Past, present, and future developments, *Industrial & Engineering Chemistry Research* (59), 2457–2470, 2020.
- C. Georgakis, D. Uztürk, S. Subramanian e D. R. Vinson: On the operability of continuous processes, *Control Engineering Practice* (11), 859–869, 2003.
- D. R. Vinson e C. Georgakis: A new measure of process output controllability, *Journal of Process Control* (10), 185–194, 2000.