

ESTUDO DE TECNOLOGIAS PARA A LIQUEFAÇÃO DE HIDROGÊNIO: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

Ana Lima Vieira, ana.lima-vieira@unesp.br¹

Guilherme Fidelis Peixer, guilherme.peixer@polo.ufsc.br²

Jaime Andrés Lozano, jaime@polo.ufsc.br²

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Vargem Limpa, Bauru - SP, 17033-360.

²POLO – Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 88040-900, Brasil.

Resumo. Esta pesquisa apresenta uma análise aprofundada dos ciclos de refrigeração de Carnot, e Rankine reverso ideal e real, incluindo configurações específicas de cinco ciclos principais de refrigeração e quatro de liquefação: sistemas de compressão de vapor de estágio único (SS), sistemas de refrigeração de múltiplos estágios (MS), sistemas de refrigeração em cascata (CRS), sistemas de refrigeração auto-cascata (ARS), ciclo de refrigeração por ar (ARC), Joule-Thomson ou ciclo Linde (JT), ciclo Brayton (BC), ciclo Claude (CC) e JT com mistura de refrigerantes (MGR); com o objetivo de compreender seus princípios e aplicações no processo de refrigeração e liquefação. Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre a necessidade da liquefação de hidrogênio, com foco em aspectos de performance e otimização. Cada ciclo de refrigeração foi estudado e caracterizado quanto ao seu funcionamento no processo de liquefação, considerando diferenças entre os ciclos e as modificações decorrentes da utilização de distintos refrigerantes. Além disso, foram discutidas as aplicabilidades de cada ciclo e analisados seus principais componentes, como dispositivos de expansão, compressores e trocadores de calor. Por fim, realizou-se a modelagem simplificada do ciclo Linde utilizando métodos numéricos no MATLAB e a biblioteca CoolProp, com uma análise termodinâmica detalhada para avaliar o desempenho do ciclo.

Palavras chave: Refrigeração. Liquefação. Hidrogênio.

Abstract. This research presents a comprehensive analysis of Carnot and both ideal and real Reverse Rankine refrigeration cycles, including specific configurations of five main refrigeration cycles and four liquefaction cycles: single-stage vapor compression systems (SS), multi-stage refrigeration systems (MS), cascade refrigeration systems (CRS), auto-cascade refrigeration systems (ARS), air refrigeration cycle (ARC), Joule-Thomson or Linde cycle (JT), Brayton cycle (BC), Claude cycle (CC), and JT with mixed refrigerants (MGR); aiming to understand their principles and applications in hydrogen liquefaction. A literature review was conducted, emphasizing performance and optimization aspects. Each refrigeration cycle was characterized in terms of its functionality and operational differences, considering variations in working fluids. Additionally, the applicability and key components—such as expansion devices, compressors, and heat exchangers—were discussed. Finally, a simplified model of the Linde cycle was implemented using MATLAB and CoolProp, with a detailed thermodynamic evaluation to estimate performance and specific energy consumption.

Keywords: Refrigeration, Liquefaction, Hydrogen.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Refrigeração

Um refrigerador é caracterizado como um sistema para realizar a transferência de calor de uma região de baixa temperatura para uma de alta temperatura (Çengel, 2011). Isso ocorre por meio de aparelhos cíclicos e fluidos de trabalho, chamados de refrigerantes. O princípio da refrigeração trabalha com 4 componentes principais: evaporador, condensador, compressor e dispositivo de expansão. Com isso, tem-se o trabalho realizado no refrigerador, especificamente pelo compressor, como $W_{\text{net,in}}$, a magnitude do calor removido (pelo evaporador) do espaço refrigerado como Q_L , e a magnitude do calor rejeitado (pelo condensador) para o espaço quente como Q_H .

O ciclo de Carnot reverso representa uma situação hipotética de eficiência máxima para um ciclo de refrigeração, baseado no conceito de um fluido de trabalho como gás ideal, sem mudanças de fase. No entanto, sua aplicação prática é inviável, pois os processos isentrópicos e isotérmicos assumidos no ciclo não ocorrem dessa forma nos sistemas reais. Na prática, durante a compressão do refrigerante, pode haver a presença simultânea das fases líquida e vapor, o que não é considerado no modelo idealizado. Da mesma forma, na expansão do fluido refrigerante de alta pressão por uma turbina, o ciclo ideal pressupõe um processo isentrópico — ou seja, uma transformação adiabática e reversível, sem troca de calor com o meio externo —, já que a turbina opera melhor nessa condição devido ao maior calor específico na fase gasosa.

Outra possibilidade de estudo de sistemas de refrigeração é o Rankine reverso ideal. Nele, em contrapartida com o ciclo de Carnot reverso, o refrigerante é transformado totalmente em vapor antes da compressão, e a turbina de expansão é substituída por um dispositivo de expansão, que é responsável pelo estrangulamento do fluido refrigerante. A válvula de expansão opera por meio da expansão de Joule-Thomson, em que a variação da pressão é acompanhada por uma variação de temperatura, que pode ser positiva ou negativa dependendo do gás e da temperatura inicial. Dessa forma, o processo de expansão deixa de ser isentrópico, o que o torna menos eficiente.

Ambos os ciclos supracitados são estudados teoricamente. A partir disso, surge o ciclo de refrigeração real de compressão de vapor. Tem-se buscado continuamente a melhoria da eficiência de processos com propostas de alterações que vão desde alterações no fluido refrigerante a mudança de sequenciamento dos equipamentos utilizados.

Um deles é o método de cascata, em que dois ou mais processos de refrigeração são colocados para operar em série, para obter temperaturas mais baixas de resfriamento. Com isso, o condensador de um processo e o evaporador do outro trabalham como um mesmo trocador de calor. O reflexo disso é um aumento na capacidade de refrigeração, tendo em vista o alcance de uma maior diferença de temperaturas (Çengel, 2011). Isto impacta em um aumento de eficiência no ciclo de refrigeração.

Outra proposta é o sistema de refrigeração de compressão de múltiplos estágios. Ele é similar ao ciclo cascata, porém ao invés de um trocador de calor entre dois ou mais processos, existe uma câmara de mistura. Além deste, existe o sistema de refrigeração multiuso com um único compressor. Ele é utilizado por exemplo em geladeiras com freezer, em que o refrigerante após sair da geladeira passa por uma segunda válvula de expansão para, em seguida, ir até o freezer.

Ao considerar alternativas para o aumento de eficiência, em temperaturas ultrabaixas (abaixo de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), estudou-se cinco ciclos principais: sistemas de compressão de vapor de estágio único (SS), sistemas de refrigeração de múltiplos estágios (MS), sistemas de refrigeração de cascata (CRS), sistemas de refrigeração de auto cascata (ARS), ciclo de refrigeração de ar (ARC).

1.2. Liquefação

Ao tratar de ciclos de refrigeração em temperaturas criogênicas, é relevante tratar de outro processo de resfriamento: a liquefação de gases. A liquefação de gases é de extrema importância pois permite reduzir significativamente o volume dos gases, facilitando seu armazenamento e transporte. Além disso, torna possível diversas aplicações industriais e médicas, como o uso de oxigênio líquido em hospitais e de nitrogênio líquido para conservação de materiais biológicos. A liquefação também é essencial para processos de separação de componentes gasosos, como na obtenção de oxigênio e nitrogênio puros a partir do ar. Outra aplicação relevante é no setor energético, onde o gás natural liquefeito (GNL) viabiliza o transporte de grandes quantidades de energia a longas distâncias.

Entretanto, inicialmente é importante caracterizar a liquefação. Um refrigerador e um liquefator são termodinamicamente iguais, no entanto, enquanto o refrigerante atua em um ciclo no refrigerador, no processo de liquefação ele é o produto que se busca, o gás liquefeito. Após a passagem no dispositivo de expansão no processo de refrigeração, na liquefação este ponto estará a uma temperatura tão baixa que a fase do fluido de trabalho será líquida, e assim obtém-se um liquefator.

O ciclo básico de liquefação de gases é conhecido como ciclo Linde ou ciclo Joule-Thomson (JT). Ele é composto por compressor, trocador de calor e válvula de expansão. A simplicidade deste ciclo apresenta-se como principal vantagem. Para aumentar sua capacidade de refrigeração, a fim de atingir temperaturas mais baixas, torna-se viável um processo com o uso de mais de um líquido refrigerante, surgindo como alternativa o ciclo de Joule-Thomson de gás misto (MGR) (Chakravarthy e Venkatarathnam, 2011). Diferente do uso de um fluido puro, como o nitrogênio, que exige altas pressões e apresenta baixa eficiência devido à grande variação de entropia durante a expansão, o MGR permite operar com pressões mais baixas, e alcançar eficiências superiores. Nesse ciclo, a combinação de diferentes componentes favorece uma maior queda de temperatura durante a expansão e, assim, permitindo atingir níveis de resfriamento mais profundos com menor consumo energético. Logo, a partir do uso de uma mistura de refrigerantes, a eficiência do ciclo aumenta em vista de 3 fatores principais: 1) reduz o consumo de energia, 2) evita problemas operacionais, 3) ocorre o deslizamento de temperatura (temperature glide) (Chakravarthy e Venkatarathnam, 2011).

Já o ciclo Brayton (BC) opera com um fluido secundário. Ele substitui a válvula de expansão por uma turbina, o que garante maior eficiência devido à não necessidade de altas pressões. Entretanto, não funciona com uma mistura de duas fases, e necessita de grande fluxo de gás.

O ciclo Claude (CC) utiliza uma turbina seguida de uma válvula de expansão. Este ciclo necessita de otimizados processos de resfriamento, o que se apresenta como desvantagem.

1.2.1. Liquefação do hidrogênio

As plantas de hidrogênio são responsáveis por realizar a liquefação do gás. Para selecionar a planta ideal, diversos fatores são levados em conta, como o tamanho da planta, o nível de tecnologia disponível da fabricante, o custo do equipamento e a eficiência do ciclo empregado. Quanto maior a capacidade do sistema de liquefação, menor o custo específico de produção.

Os principais desafios da liquefação de hidrogênio são o armazenamento e o transporte. Uma vez que o hidrogênio se encontra líquido, mantê-lo nesta fase é um processo intensivo em energia. A perda de hidrogênio por “boil-off” pode chegar a 563 kg por dia, como observado em tanques criogênicos esféricos de grande escala utilizados pela NASA no Centro Espacial Kennedy, o que equivale a aproximadamente 0,25% do volume armazenado diariamente. Isso, combinado com a falta de padrões de segurança e escala, aumenta ainda mais a dificuldade do armazenamento e transporte. Outra característica que corrobora para este ponto é a alta densidade gravimétrica do hidrogênio (H_2) (Peixer et al., 2023).

Além disso, o hidrogênio é considerado um dos fluidos criogênicos que mais têm dependência no calor específico na temperatura (Nandi e Sarangi, 1993), por isso é necessário cuidado para modelar os trocadores de calor, para identificar o ponto de menor temperatura no processo.

Outro ponto pertinente é a conversão ortho-para do hidrogênio. O objetivo final é ter a máxima quantidade possível de para-hidrogênio, tendo em vista sua característica exotérmica e sua maior estabilidade (Al Ghafri et al., 2022), o que facilita no armazenamento e transporte. Isso é realizado com o auxílio de conversores catalíticos para acelerar o processo, visto que ele não é espontâneo e é exotérmico (Nandi e Sarangi, 1993). Novamente, é necessário tomar cuidado com gás “boil-off” (Al Ghafri et al., 2022).

Nesta pesquisa, o ciclo de liquefação de hidrogênio selecionada para análise é o ciclo Linde, tendo em vista sua estrutura simples — baseada em compressão, resfriamento e expansão por válvula Joule-Thomson — o que facilita a modelagem computacional e o entendimento dos princípios envolvidos. Apesar de apresentar menor eficiência que ciclos com turbinas, como o de Claude, o ciclo de Linde permite alcançar temperaturas próximas a 20 K, sendo adequado para a liquefação do hidrogênio (KONNO; KAWAMURA; OKADA, 2006).

2. METODOLOGIA

A pesquisa teve início com uma revisão teórica e termodinâmica dos principais ciclos de refrigeração aplicáveis à liquefação de gases, destacando seus princípios de funcionamento, componentes críticos (compressor, válvula de expansão, trocadores de calor) e suas variantes operacionais. Foram analisados cinco tipos principais de sistemas de refrigeração (SS, MS, CRS, ARS, ARC) e quatro tipos principais de sistemas de liquefação (JT, CC, BC, MGR), avaliando suas características de desempenho, faixas de operação e eficiência energética.

Para fins de simulação e modelagem, optou-se por utilizar o ciclo Linde simplificado, reconhecido por sua viabilidade em aplicações de pequeno porte e pela possibilidade de resfriamento com nitrogênio (N_2). A modelagem computacional foi realizada utilizando MATLAB, com suporte da biblioteca CoolProp em Python para extração de propriedades termodinâmicas do hidrogênio. Equipamentos comerciais foram selecionados: o compressor Burckhardt B-Line, a válvula criogênica SUPRA da Rotarex e o trocador de calor brazed aluminum da Chart Industries; e os dados operacionais de cada um coletado, para uso na simulação.

As seguintes hipóteses foram adotadas:

- 1) Pressão de compressão: o compressor utilizado no processo é capaz de comprimir o hidrogênio até uma pressão de saída de $P = 100$ bar.
- 2) Expansão múltipla em série: para alcançar uma queda de pressão adequada e eficiente, são utilizadas quatro válvulas de expansão dispostas em série.
- 3) Trocadores de calor ideais: os trocadores de calor presentes no sistema são considerados ideais, ou seja, possuem uma área que possibilita a troca máxima de calor entre as correntes. Além disso, assume-se que a pressão do fluido se mantém constante ao atravessar os trocadores de calor.
- 4) Processo adiabático e perdas desprezíveis: assume-se que o processo de liquefação ocorre de forma adiabática em relação ao ambiente, ou seja, sem troca de calor significativa com o meio externo. Além disso, considera-se que as perdas de energia por atrito, vazamento e dissipação de calor são desprezíveis.
- 5) Vazão mássica e produção de hidrogênio líquido: a vazão mássica total do sistema é assumida como $\dot{m}=1$ (unidade de massa por segundo). A quantidade de hidrogênio liquefeito ao final do processo é designada por y , que representa a fração líquida obtida após a expansão final.
- 6) Expansão isentálpica: considerando a o processo de expansão realizado pela válvula como isentálpico, tem-se que as entalpias no ponto 4 e 5 são iguais.
- 7) Calor específico: a variação de calor específico com a mudança de temperatura do hidrogênio foi desconsiderada.

A “Eq. 1”, explicitada nos resultados, referente a equação de balanço de massa no trocador de calor, foi resolvida numericamente via método de Newton-Raphson para determinar a fração líquida de hidrogênio (y) obtida após a expansão.

Já a “Eq. 3”, também presente em resultados, foi utilizada para cálculo do Consumo Específico de Energia (SEC), que possibilita analisar a eficiência do sistema simulado e cria uma forma de compará-lo com sistemas de liquefação amplamente utilizados no mercado atual.

3. RESULTADOS

A partir da análise comparativa entre os ciclos de refrigeração/liquefação, a “Tab. 1” foi feita a fim de elucidar as especificidades de cada sistema, por meio das colunas Refrigerante, Identificação, Vantagem, Desvantagem, Temperatura.

Tabela 1. Especificidades de tecnologias de refrigeração (Chakravarthy e Venkatarathnam, 2011), (Radebaugh, 2009), (Saeed et al., 2023), (Alekshev, 2013), (Li et al., 2023)

Tecnologias de Refrigeração	Refrigerantes	Principal funcionamento	Vantagem	Desvantagem	Temperatura (K)
JT com Mistura de refrigerantes (MGR)	Mistura	JT com mistura de refrigerantes	Atinge temperaturas mais baixas que JT, e possui eficiência aumentada devido a redução da razão das pressões	Acúmulo de líquido	54 - 230
Ciclo Claude (CC)	Hélio	Combinação dos BC e JT	Custo-eficiente, serve como intermediário entre o JT e o BC, utiliza compressores de parafuso	Necessita de um processo de resfriamento eficiente	4,2 – 4,6
Ciclo Brayton (BC)	Refrigerantes de baixa temperatura (hélio, neônio, hidrogênio)	JT com uma turbina ao invés de uma válvula de expansão	Sem necessidade de altas pressões (devido à turbina)	Não pode produzir líquido devido à turbina, exige grande tamanho, inadequado para refrigeração de temperatura constante	6 – 70
Refrigeração de Joule-Thomson/ Ciclo Linde simples (JT)	Oxigênio + nitrogênio	Sistema de refrigeração simples	Design simples, vibrações mínimas na extremidade fria	Operação em alta pressão, pequena capacidade de resfriamento, requer um trocador de calor eficiente	77
Sistema de Compressão de Vapor de Estágio Único (SS)	Refrigerantes puros (misturas podem atingir temperaturas mais baixas, mas com um desconto na performance)	Ciclo de compressão de vapor comum	Simplicidade, utiliza expansão isentrópica, processo isotérmico para isobárico	Ineficiente para aplicações de temperaturas ultrabaixas, exige alta pressão	233
Sistema de Compressão de Vapor de Múltiplos Estágios (MS)	R744 + refrigerantes HC N ₂ O, CO ₂ , NH ₃	Compressor com múltiplos estágios	Adequado para temperaturas ultrabaixas	Maior ocupação de espaço do sistema	203 – 273

Sistema de Refrigeração Cascata (CRS)	NH ₃ + CO ₂ e outros (R134a or R600a, propano, etileno, metano)	Dois ou mais ciclos de compressão de vapor empilhados	Maior controle de temperatura, baixas temperaturas, sem necessidade de altas razões de compressão	Requer compressores fisicamente grandes, aumento da complexidade, inspeções periódicas necessárias	120 – 233
Sistema de Refrigeração de Auto-Cascata (ARS)	Mistura propano-etano e outros	Separador colocado após a válvula de expansão	Resfriamento eficiente e temperaturas mais baixas	Efeito de deslizamento de temperatura (temperature glide)	51 – 233
Ciclo de Refrigeração de Ar (ARC)	Ar	Utiliza um compressor-expansor com uma câmara fria	Sem necessidade de recarga de refrigerante, o expansor auxilia o compressor	Requer um dispositivo para extrair a umidade	173 - 213

Além disso, é importante considerar a aplicabilidade de cada um dos ciclos, e com isso a “Tab. 2” foi elaborada com base nas temperaturas de atuação de cada ciclo e temperaturas necessárias para cada aplicação.

Tabela 2. Aplicabilidade de sistemas de refrigeração (Chakravarthy e Venkatarathnam, 2011), (Radebaugh, 2009), (Saeed et al., 2023), (Aleksiev, 2013)

Aplicações	Sistemas de Refrigeração									Faixa de Temperatura (K)
Ar-condicionado	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	295 – 300
Armazenamento de alimentos não congelados (refrigeradores domésticos e comerciais)	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	270 – 295
Congelamento de alimentos	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	240 – 270
Armazenamento de vacinas	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	253
Liofilização de alimentos e produtos farmacêuticos	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	220 – 240
Armazenamento de amostras biológicas	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	143 – 253
Liquefação de gás natural (LNG)	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	110
Liquefação de ar	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	80 – 100
Resfriamento de sensores infravermelhos	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	80
Liquefação de nitrogênio	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	77
Liquefação de hidrogênio	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	20
Ressonância magnética	MGR	CC	BC	JT	SS	MS	CRS	ARS	ARC	4

Na “Tabela 2” as células em verde representam os ciclos que podem ser aplicados na faixa de temperatura presente na mesma linha, e, logo, uma aplicabilidade é associada à esta faixa. É válido evidenciar a ampla faixa de atuação de sistemas de refrigeração de auto-cascata, e da utilização dos ciclos Brayton e Claude para temperaturas criogênicas.

Entretanto, é importante ressaltar que a aplicação não depende apenas da temperatura de atuação, mas também de fatores como tamanho da planta, investimento disponível e refrigerantes a serem utilizados, os quais foram desconsiderados para a construção da tabela.

A partir da análise das plantas de liquefação de hidrogênio, a planta com ciclo Linde, ideal para sistemas de pequena escala, com resfriamento com N₂, foi selecionada para modelagem e análise termodinâmica. Na “Figura 1” observa-se o esquemático simplificado deste ciclo. Nela LN₂ e GN₂ representam o refrigerante utilizado no sub-resfriamento, o qual foi realizado com nitrogênio, com LN₂ como nitrogênio líquido e GN₂ como gás nitrogênio.

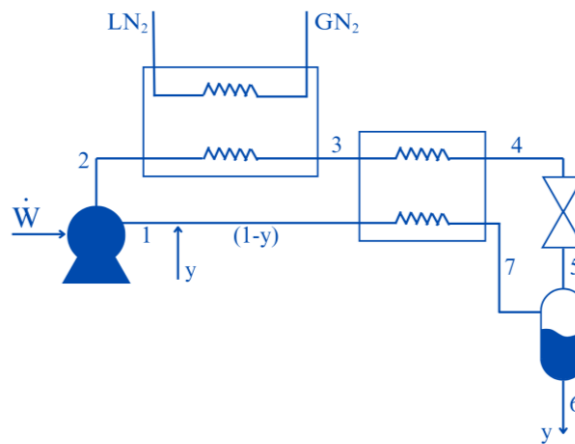


Figura 1. Ciclo Linde simplificado

Para sua análise, foram selecionados equipamentos comerciais. O compressor escolhido foi o Compressor B-Line (Burckhardt Compression, 2025). Ele é um compressor pistão. O princípio geral de funcionamento dele envolve a redução de volume, que resulta na compressão do gás. Na “Tabela 3” estão reunidas as especificidades relevantes deste equipamento.

Tabela 3. Dados do compressor (Burckhardt Compression, 2025)

Pressão de saída	120 bar
Potência nominal	9,5 MW
Velocidade máxima	500 rpm

A válvula de expansão selecionada foi Expansion Pneumatic Valve Low Pressure at Low Cryogenic Temperatures SUPRA (Rotarex S.A., 2025). Ela é capaz de operar a temperaturas criogênicas, o que se torna extremamente necessário para a liquefação do hidrogênio, que apresenta uma temperatura de condensação de aproximadamente 20 K. Os dados referentes a ela estão explicitados na “Tab. 4”.

Tabela 4. Dados da válvula de expansão (Rotarex S.A., 2025)

Pressão de trabalho	< 25 bar
Coefficiente de fluxo Cv	4,81
Faixa de temperatura	-270°C to +80°C
Materiais	SS 316L / Vespel
Diâmetro	20 mm
Pressão de operação do atuador pneumático	5 – 7 bar

Para os trocadores de calor, o modelo Brazed Aluminum Heat Exchanger (Chart Industries, 2023) foi o utilizado. Ele é capaz de ser utilizado tanto no resfriamento realizado com N₂, quanto nas trocas de calor do H₂ com ele mesmo. Na “Tabela 5” é possível observar as especificações dele.

Tabela 5. Dados do trocador de calor (Chart Industries, 2023)

Taxas de resfriamento e aquecimento	< 2°C/min
Pressão máxima	160 bar

Com base nas hipóteses realizadas, foi possível adquirir as propriedades dos pontos referenciados na “Fig. 1”, como mostrado na “Tab. 6”. As propriedades foram retiradas com o auxílio da biblioteca CoolProp.

Tabela 6. Propriedades dos pontos do ciclo Linde

Propriedades	1	2	3	4	5	6	7
Temperatura (K)	300	300	77	T ₄	20,32	20	20,32

Pressão (Bar)	1	100	100	100	1	1	1
Entalpia (J/kg)	3958274,9	4005238	878280,2	454,3	454,3	-3,58	-446,8

Com isso, por meio da “Eq. 1” de balanço de massa no trocador de calor é possível encontrar a função a ser analisada e encontrar a temperatura no ponto 4 (T₄) e consequentemente a quantidade produzida de hidrogênio líquido “y”.

$$Cp * \dot{m} * (T_2 - T_4) = (T_1 - T_7) * (\dot{m} - y) * Cp \quad (1)$$

T₁ é a temperatura em 1;

T₂ é a temperatura em 2;

T₄ é a temperatura em 3;

T₇ é a temperatura em 7;

y é o hidrogênio líquido produzido;

Cp é o calor específico do hidrogênio;

$\dot{m}$ é a vazão mássica.

Simplificando a “Eq. 1” obtém-se a “Eq. 2”.

$$(300 - T_4) = (300 - 20,32) * (1 - y) \quad (2)$$

Utilizando o método numérico de Newton Raphson em MATLAB para resolver a “Eq. 2”, à T₄ = 50 K, y = 0,1061 kg/s. Conclui-se que 10,61% do gás hidrogênio foi transformado em sua forma líquida.

Com isso, é possível calcular o consumo de energia específico (SEC), representada na “Eq. 3”.

$$SEC = \frac{\dot{W}}{y} \quad (3)$$

Com $\dot{W} = 9,5 \text{ MW} = 9500 \text{ kW}$ e o valor encontrado de y = 0,1061 kg/s = 381,96 kg/h, o SEC é de 24,87 kWh/kg. Este valor é maior do que o esperado, e fatores como a baixa produção de hidrogênio líquido, superdimensionamento do compressor (que não faria uso de toda sua potência para atingir a pressão desejada), ou ainda um resfriamento insuficiente gerado pelos trocadores de calor podem ser a causa de um SEC superior ao desejado.

4. CONCLUSÃO

A presente pesquisa realizou uma análise abrangente dos principais ciclos de refrigeração aplicáveis à liquefação de hidrogênio, com destaque para o ciclo Linde, escolhido para modelagem em pequena escala. A simulação termodinâmica permitiu avaliar a eficiência energética e os desafios operacionais, revelando um consumo específico de energia acima do esperado. Esses resultados apontam para oportunidades de otimização, especialmente no dimensionamento dos equipamentos e no aprofundamento da modelagem com propriedades termo físicas variáveis. Como próximos passos, recomenda-se a simulação de ciclos híbridos, a consideração de misturas refrigerantes e uma análise econômica detalhada para viabilização da aplicação em escala industrial.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e da Academia Brasileira de Ciências (ABC), através da Bolsa de Estímulo a Vocações Científicas (EVC), processo nº 2024/18414-0. A pesquisa foi conduzida no POLO – Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Agradecemos também à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus Bauru, pelo suporte institucional.

6. REFERÊNCIAS

- Alekseev, A. Basics of low-temperature refrigeration. In: CAS-CERN ACCELERATOR SCHOOL: SUPERCONDUCTIVITY FOR ACCELERATORS, 2013, Erice, Italy. CERN Yellow Report, CERN-2014-005, p. 111-139. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1501.07392>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- Al Ghafri, Saif Z. S. et al. Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities. Energy & Environmental Science, v. 15, p. 2690–2731, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d2ee00099g>. Acesso em: 27 jan. 2025.

- Brazed aluminum heat exchangers. La Crosse: Chart Industries, Inc., 2023. Disponível em: <http://www.chartindustries.com/BAHX>. Acesso em: 25 fev. 2025.
- Çengel, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.
- Chakravarthy, V. S.; SHAH, R. K.; VENKATARATHNAM, G. A review of refrigeration methods in the temperature range 4–300 K. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, v. 3, n. 2, p. 020801, jun. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4003701>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- Chang, Ho-Myung. A thermodynamic review of cryogenic refrigeration cycles for liquefaction of natural gas. *Cryogenics*, v. 72, p. 127-147, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011227515001204>. Acesso em: 19 fev. 2025.
- Expansion valve. Luxembourg: Rotarex S.A. Disponível em: <https://rotarex.com/product/bellows-low-pressure-valve-for-hp-uhp-cryogenic-gases-and-fluids-supra>. Acesso em: 25 fev. 2025.
- GAS COMPRESSOR. Winterthur: Burekhardt Compression AG. Disponível em: <http://www.recip.com/process-gas>. Acesso em: 25 fev. 2025.
- Konno, T.; Kawamura, H.; Okada, K. Hydrogen liquefaction and storage system using liquid nitrogen. *Cryogenics*, v. 46, p. 113–120, 2006. Acesso em: 29 abr. 2025.
- Li, Yinlong et al. Progress of auto-cascade refrigeration systems performance improvement: composition separation, shift and regulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 187, p. 113664, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212300521X>. Acesso em: 19 fev. 2025.
- Linde Engineering. Hydrogen liquefaction. Disponível em: <https://www.linde-engineering.com/products-and-services/process-plants/hydrogen-and-synthesis-gas/hydrogen-liquefaction>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- Mahboobtosi, Mehdi et al. Investigation and thermodynamic analysis of hydrogen liquefaction cycles: Energy and exergy study. *Heliyon*, v. 10, n. 18, p. e37570, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024136018>. Acesso em: 26 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37570>.
- Nandi, T. K.; Sarangi, S. Performance and optimization of hydrogen liquefaction cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 18, n. 2, p. 131–139, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(93\)90199-K](https://doi.org/10.1016/0360-3199(93)90199-K). Acesso em: 27 jan. 2025.
- Peixer, Guilherme F. et al. Comparison of conventional and emerging technologies for hydrogen liquefaction. In: *International Congress of Refrigeration – ICR2023*, 26., 2023, Paris. Anais [...]. Paris: IIR, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2023.0868>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- Radebaugh, Ray. Cryocoolers: the state of the art and recent developments. *Journal of Physics: Condensed Matter*, v. 21, n. 16, p. 164219, mar. 2009. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/21/16/164219>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- Saeed, Muhammad Zahid et al. Ultra-low-temperature refrigeration systems: a review and performance comparison of refrigerants and configurations. *Energies*, v. 16, n. 21, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7274>. Acesso em: 10 fev. 2025.