

Análise do desempenho termodinâmico de um sistema de regaseificação do gás natural liquefeito acoplado a sistema de armazenamento de ar líquido

Palavras-Chave: transição energética, gás natural liquefeito, ar líquido, recuperação do frio.

Autores(as):

LAURA GIOVANA GIACOMINI DE LACERDA MIRANDA, FEQ – UNICAMP

GIULIA VERONESE GUARISCHI FRAGA, FEQ – UNICAMP

DIANA WENDY RÉ ESTANISLAU, FEQ - UNICAMP

Prof. Dr. JOSÉ VICENTE HALLAK D'ANGELO (orientador), FEQ - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O desenvolvimento tecnológico e social do mundo depende da disponibilidade de energia, que é um insumo vital para todos os principais setores que garantem o bem-estar humano, um bom padrão de vida e a própria existência da vida no planeta. Estima-se um crescimento de 40% na demanda mundial de energia até 2050 (EIA, 2020) o qual tem gerado uma emergência climática global reforçando assim a necessidade por inovação em tecnologias para descarbonização da matriz energética e para o aumento da eficiência dos sistemas energéticos atuais. Uma vez que as fontes renováveis e de emissões neutras disponíveis atualmente não são capazes de suprir a demanda global, o gás natural exercerá um papel importante na transição energética pois, dentre os combustíveis fósseis, é o que apresenta menor emissão de CO₂ por unidade de energia produzida (ZOU *et al.*, 2016).

O Brasil é importador dessa matriz, sendo a maior parte do abastecimento realizado por gasodutos provenientes da Bolívia. Alternativamente, a importação a distâncias extracontinentais é viabilizada por meio da liquefação do gás natural. Atualmente, oito terminais de regaseificação estão em operação no Brasil, sendo que três deles iniciaram suas operações em 2023 (EPE, 2022). Juntos, possuem a oferta potencial de 133 MMm³/dia. Até 2032, com a previsão da conclusão de mais dois terminais de regaseificação de GNL, essa capacidade será de até 168 MMm³/dia (EPE, 2022).

Apesar da liquefação ser necessária para o transporte eficiente desta *commodity*, o gás natural consumido em residências, instalações comerciais, indústrias e usinas térmicas deve ser vaporizado até temperaturas e pressões padronizadas para transporte em tubulações locais. A etapa de regaseificação do gás natural consiste em um enorme potencial energético e exergético devido às suas temperaturas criogênicas, contudo, no processo de regaseificação do GNL, o 'frio' muitas vezes não é aproveitado para outras aplicações possíveis.

Uma das formas de aproveitar esse potencial é a integração desse sistema de regaseificação com um ciclo de potência, resultando em economia de energia, bem como em uma operação com melhor desempenho exerético. Uma outra possibilidade de aproveitamento do potencial do GNL é na produção de ar líquido como forma de armazenar energia em sistemas conhecidos como LAES (do inglês “*liquid air energy storage*”), que foi proposto inicialmente por Smith (1977). Já a combinação de sistemas LAES com ciclos de potência, para o aproveitamento do frio no processo de regaseificação do LNG é uma proposta de estudo recente na literatura (LEE *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018).

Desse modo, o objetivo deste projeto é simular e validar o sistema de regaseificação de gás natural (GNL) acoplado a um sistema de liquefação de ar para armazenamento de energia, proposto por Lee et al (2017) e, por meio da análise exerética dos equipamentos e do sistema global, detectar as maiores fontes de ineficiência e então propor melhorias de operação, visando a redução das taxas de destruição de exerгия e melhorar a performance do sistema.

METODOLOGIA:

Inicialmente, o sistema de regaseificação de GNL acoplado a um sistema de compressão e armazenamento de ar líquido proposto por Lee *et al.* (2017), foi simulado no software *Aspen Hysys*® v.10, utilizando o pacote termodinâmico Peng-Robinson. A partir da validação dos resultados da simulação em comparação com o sistema original, foi aplicada uma análise exerética em cada componente do sistema, bem como no sistema global, a fim de identificar as principais ineficiências e

Condições de operação	Valores	
Temperatura de entrada do GNL (L1)	-162 °C	propor melhorias nas condições de operação.
Pressão de entrada do GNL (L1)	130 kPa	Algumas condições de operação foram mantidas constantes, como as condições de entrada e saída do gás natural, bem como as hipóteses do artigo original, a fim de permitir uma comparação fiel ao sistema original. A Tabela 1 apresenta as condições operacionais constantes do sistema.
Pressão de exaustão do GNL (L13)	3500 kPa	
Pressão de trabalho do GNL	30000 kPa < P < 3500 kPa	
Temperatura do ar atmosférico (A1)	25 °C	
Pressão do ar atmosférico (A1)	101,3 kPa	
Pressão de trabalho máxima	30000 kPa	
Razão de compressão máxima	3,50	
Razão de expansão máxima	-	
Eficiência isentrópica dos compressores	0,90	
Eficiência isentrópica das turbinas	0,92	
Eficiência isentrópica das bombas	0,90	
Mínimo ΔT em trocadores de calor	3 °C	

Tabela 1 - Parâmetros operacionais constantes para o sistema base e sistema otimizado.

A exerгия física específica de cada uma das i-correntes do processo é determinada por:

$$ex_i = (h_i - h^0) - T^0(s_i - s^0) \quad (1).$$

na qual h_i é a entalpia específica da corrente-i (kJ/kg), s_i é a entropia específica da corrente-i (kJ/(kg.K)), e h^0 e s^0 são as entalpias e entropias na condição de referência. Nesse trabalho, o estado de referência adotado foi de 101,3 kPa e 25 °C para cada uma das diferentes correntes (GNL, água e ar).

O balanço de exergia para cada volume de controle, dada a hipótese de equipamentos adiabáticos é:

$$\dot{E}x_{destr} = \dot{W}_{VC} + \sum_{e=1}^N \dot{m}_e ex_e - \sum_{s=1}^M \dot{m}_s ex_s \quad (2).$$

em que $\dot{E}x_{destr}$ é a taxa de exergia destruída (kW), \dot{W}_{VC} é o trabalho exercido no volume de controle ou pelo volume de controle e $\sum_{e=1}^N \dot{m}_e ex_e$ e $\sum_{s=1}^M \dot{m}_s ex_s$ são o somatório das exergias associadas a cada uma das N-correntes que entram e M-correntes que saem do volume de controle.

Os parâmetros utilizados para a avaliação do desempenho termodinâmico são provenientes das análises baseadas na Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica e são descritos a seguir:

- Eficiência exergética (-): é compreendida pela razão da exergia recuperada, na forma de calor (\dot{Q}_{rec}) e trabalho ($\dot{W}_{turbina}$), nas correntes de saída, pela exergia fornecida nas correntes de entrada.

$$\eta_{EX} = \frac{\dot{Q}_{recup} + \dot{W}_{turbina}}{\sum \dot{E}x_i^{entra} - \sum \dot{E}x_j^{sai} + \dot{W}_{bomba/compressor}} \quad (3)$$

- Eficiência energética (-): é a eficiência de Primeira Lei, compreendida pela razão entre somatório das correntes de calor e trabalho gerados e as correntes de calor e trabalho fornecidos.

$$\eta_{EN} = \frac{\dot{Q}_{recup} + \dot{W}_{turbina}}{\dot{Q}_{fornec} + \dot{W}_{bomba/compressor}} = \frac{\dot{Q}_{recup} + \dot{W}_{turbina}}{\dot{m}_{QUENTE}(h_{entra} - h_{sai}) + \dot{W}_{bomba/compressor}} \quad (4)$$

- Produção específica de energia (kJ/kg GNL): é a quantidade de energia produzida a partir de 1 kg de GNL, normalmente, a condição de referência para o GNL é -162 °C e 1 bar.
- Eficiência *round-trip*: em sistemas energéticos constituídos de uma fase de armazenamento e outra de liberação de energia, a eficiência *round-trip* balanceia a energia requerida para realizar o processo de armazenamento (\dot{W}_{armaz}) e a energia gerada no processo de liberação (\dot{W}_{lib}).

$$\eta_{RT} = \frac{\dot{W}_{lib}}{\dot{W}_{armaz}} = \frac{\sum \dot{W}_{bombas}}{\sum_{k=6}^8 \dot{W}_{turbina, k}} \quad (5)$$

O método de análise envolvendo as equações apresentadas foi aplicado para cada componente do sistema original, proposto por Lee *et al.* (2017). A partir dos resultados obtidos para essa simulação, foram determinadas faixas de operação para algumas variáveis de processo, que foram testadas em uma análise paramétrica discretizada. A Figura 1 apresenta um esquema da simulação dos sistemas combinados.

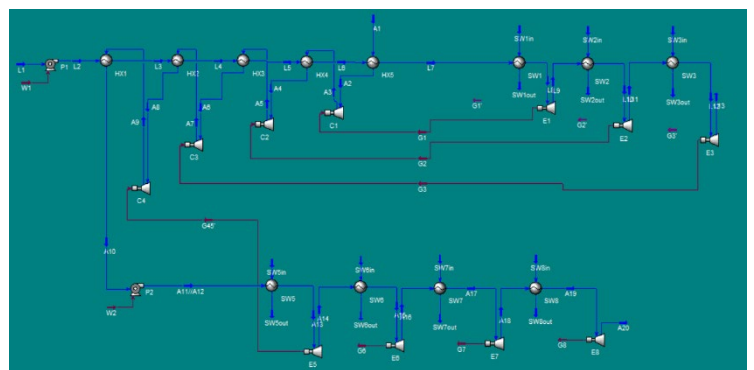


Figura 1. Sistema de regaseificação de GNL acoplado a sistema de compressão e armazenamento de ar líquido. Adaptação de Lee *et al* (2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O sistema de referência de Lee *et al* (2017) foi simulado e avaliado a partir das equações apresentadas anteriormente, apresentando uma eficiência exergética global de 32,6%, e taxa de

destruição de exergia de 316,4 kW alcançando uma eficiência *round-trip* de 172,1%, e geração líquida de energia 67,44 kW/kg GNL e as Figuras 2a e 2b apresentam uma avaliação de cada equipamento.

Os equipamentos com as menores eficiências exergeticas são os trocadores de calor, em especial aqueles que atuam na transferência de calor com a água do mar (SW1-SW8). Dentre os equipamentos modificadores de pressão, as bombas são os que apresentaram maior taxa de exergia destruída absoluta e as menores eficiências, enquanto os compressores e turbinas apresentaram as menores taxas de destruição de exergia e melhores eficiências.

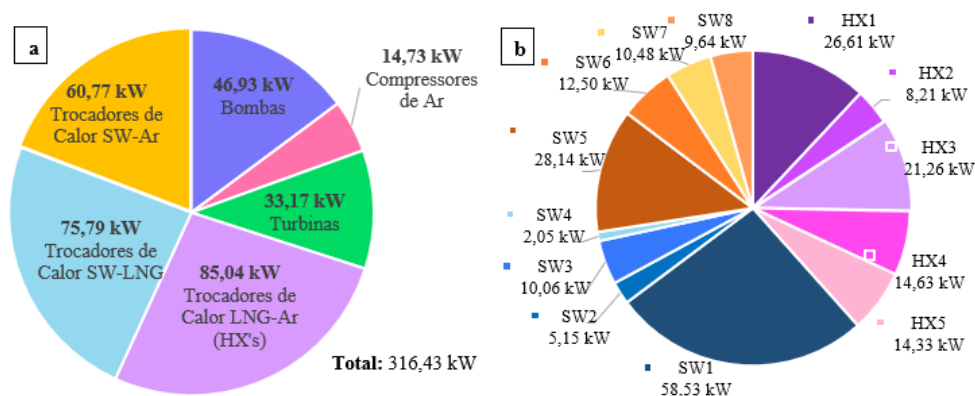


Figura 2(a). Distribuição da taxa de destruição da exergia nas classes de equipamentos. (b). Detalhamento da distribuição da destruição de exergia dentre os trocadores de calor.

Como pode ser observado na Figura 2(a), os trocadores de calor, conjuntamente, contemplam cerca de 70% da destruição da exergia no sistema projetado, mostrando que os principais ajustes operacionais devem ser feitos nos sistemas de transferência de calor, em busca da redução das ineficiências. Além disso, a Figura 2(b) ainda fornece um detalhamento dos trocadores de calor, com ênfase para os trocadores HX1, SW1 e SW5, sendo os que mais contribuíram com a destruição de exergia, evidenciando que há uma relação de causa e efeito entre a destruição de exergia e a diferença de temperatura das fontes fria e quente. Em seguida, foram levantadas faixas de operação para algumas variáveis de processo, como a temperatura e pressão das correntes de ar atmosférico e de gás natural, e as diferenças de temperatura nos trocadores de calor. As condições operacionais que resultaram nas melhorias mais significativas estão apresentadas na Tabela 2. A nova proposta apresentou uma melhoria na eficiência *round-trip* e na geração líquida de energia com relação ao artigo original, enquanto a eficiência global e a taxa de destruição de exergia apresentaram redução da qualidade, como pode ser observado na Tabela 2.

No entanto, a nova proposta contou com uma redução do número de estágios de expansão, na seção do gás natural, sendo uma melhoria que visa aumentar o custo-benefício do sistema em termos de manutenção e operação. Somado a isto, a nova proposta gera 23,79 % a mais de energia para uma mesma vazão de GNL, o que contribui com o aumento da viabilidade econômica do sistema. Devido à retirada desse componente, houve aumento significativo da taxa de destruição da exergia (14,63%). Esse resultado é inevitável, uma vez que o aumento do número de estágios de equilíbrio em sistemas

termodinâmicos contribui com a minimização da geração da entropia, e consequentemente, da destruição da energia

Parâmetro	Simulação	Artigo original	Incremento
Eficiência exergética Global	29,54%	32,60%	-9,37%
Eficiência Round-trip	202,37%	172,10%	17,59%
Destruição de Exergia (kW)	362,71	316,43	14,63%
Geração de energia (kW/kg GNL)	83,48	67,44	23,79%

Tabela 2. Comparação de desempenho entre o sistema original e o sistema melhorado proposto.

disponível, contudo, sistemas infinitamente grandes são inviáveis do ponto de vista técnico e econômico. Apesar de ser de interesse obter parâmetros otimizados, não é possível realizar uma melhoria simultânea. Desse modo, a otimização das eficiências termodinâmicas do sistema e da geração de energia devem ser avaliadas conjuntamente com a viabilidade tecno-econômica do sistema.

CONCLUSÕES:

A proposta inicial de melhoria do sistema de regaseificação com aproveitamento do frio para liquefação de ar e armazenamento de energia obteve incremento significativo dos parâmetros da eficiência *round-trip* e da produção bruta de energia para cada kg de GNL, sendo estes, respectivamente, 17,6% e 23,8% maiores do que o caso base. Além disso, o sistema proposto também contém a retirada de uma turbina, que possui a premissa de reduzir o custo de manutenção e operação do sistema.

Finalmente, esforços futuros devem ser direcionados ao desenvolvimento de uma metodologia para análise de custos do sistema, para a otimização do sistema seja feita de maneira multiobjetivo, isto é, contemplando a melhoria de parâmetros de desempenho e de retornos financeiros do sistema.

BIBLIOGRAFIA

EIA - Energy Information Administration – **Annual Energy Outlook 2020**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Full%20Report.pdf>>. Acessado em: 16/10/2023.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balço Energético Nacional (BEN) 2023. Ano Base: 2022**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>>. Acesso em: 16/02/2024.

LEE, I; PARK, J; MOON, I. Conceptual design and exergy analysis of combined cryogenic energy storage and LNG regasification processes: Cold and power integration. **Energy**, v. 140, p. 106-115, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.054>.

SMITH, E. M. Storage of electrical energy using supercritical liquid air. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 191, n. 1, p. 289-298, 1977.

LEE, I; PARK, J; MOON, I. Conceptual design and exergy analysis of combined cryogenic energy storage and LNG regasification processes: Cold and power integration. **Energy**, v. 140, p. 106-115, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.054>

ZHANG, T.; CHEN, L.; ZHANG, X.; MEI, S.; XUE, X.; ZHOU, Y. Thermodynamic analysis of a novel hybrid liquid air energy storage system based on the utilization of LNG cold energy. **Energy**, v. 155, p. 641-650, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.041>.

ZOU, C.; ZHAO, Q.; ZHANG, G.; XIONG, B. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. **Natural Gas Industry B**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001>.