Análise de sensibilidade sobre o desempenho exergético e econômico de sistema de liquefação de ar: integração Hysys-Python

Palavras-Chave: gás natural liquefeito, ar líquido, análise exergética, sistemas térmicos.

Autores/as:

LAURA GIOVANA GIACOMINI DE L. MIRANDA, FEQ – UNICAMP

JULIA FERREIRATANAN, FEQ – UNICAMP

DIANA WENDY RÉ ESTANISLAU, FEQ - UNICAMP

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

INTRODUÇÃO:

O gás natural liquefeito (GNL) é uma importante *commodity* energética, amplamente utilizada no cenário global devido à sua viabilidade de transporte em longas distâncias. Durante o transporte marítimo, o GNL é mantido a temperaturas criogênicas, o que lhe confere um elevado potencial exergético. No país de destino, o gás precisa ser regaseificado para se adequar às condições de injeção e distribuição nos gasodutos locais, como é o caso da malha integrada de transporte de gás natural no Brasil (EPE, 2019).

O processo de regaseificação, além de essencial para a utilização do GNL, representa uma oportunidade estratégica para o aproveitamento da exergia contida na corrente criogênica, que pode ser utilizada em processos que demandam utilidades frias, destacando-se, entre eles, os sistemas de Armazenamento de Energia na forma de Ar Líquido (*LAES – Liquid Air Energy Storage*). Nesses sistemas, o ar ambiente é liquefeito ao absorver o frio residual do GNL, armazenando energia que pode ser posteriormente liberada sob demanda, por exemplo, para suprir necessidades energéticas em horários de pico industrial.

Ademais, há outras estratégias utilizadas para aumentar o rendimento na geração de potência, como a inserção de um ciclo de Rankine orgânico (ORC) a este para maior aproveitamento das grandes variações de temperatura presentes no sistema (LEE *et al*. 2019; JIANG *et al*. 2024).

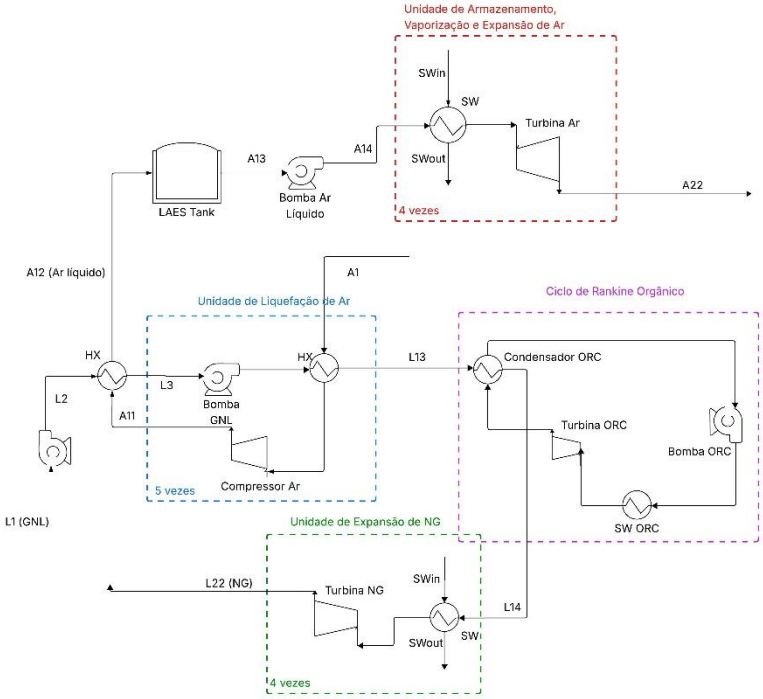
O presente projeto tem como objetivo avaliar a implementação de um sistema integrado GNL-ORC-LAES, modificado com um sistema de bombeamento de GNL em múltiplos estágios, e contempla uma análise de sensibilidade das variáveis operacionais do processo, avaliando sua influência em parâmetros de desempenho, como a geração de potência e a destruição de exergia e no capital de investimento do sistema, visando assim uma operação otimizada do sistema global.

METODOLOGIA:

Descrição do processo

O sistema proposto, na Figura 1, consiste em unidades integradas de compressão e liquefação de ar, vaporização e expansão de GNL e ciclo de Rankine orgânico. Foi baseado em Lee et al. (2019) e modificado com a adição de múltiplos estágios de bombeamento de GNL.

O ar atmosférico (A1) entra na Unidade de Liquefação de Ar, é comprimido em múltiplos estágios e resfriado pelo GNL, resultando em ar liquefeito (A12), armazenado no tanque “LAES”. O GNL (L1), em contracorrente, é alternadamente bombeado e aquecido pela corrente de ar, gerando L13 a 300 bar. Esta corrente ainda mantém temperatura suficientemente baixa para atuar como condensador de um ciclo de Rankine orgânico, com propano e etano. Em seguida, L14 segue para a Unidade de Expansão de NG, onde sofre expansões alternadas com trocas térmicas com água do mar (SWi), atingindo o estado de saída (L22 vaporizado a 70 bar).



Paralelamente, a Unidade de Armazenamento, Vaporização e Expansão de Ar opera de forma semelhante à unidade de NG, podendo ser acionada sob demanda ou operar simultaneamente ao sistema.
O sistema apresenta restrições quanto ao escopo das variáveis (Tabela 1), com base nas mesmas condições operacionais e premissas de Lee et al. (2019). O caso base está na Tabela 2. As demais variáveis de processo foram calculadas com base nesses inputs.

Parâmetro	*Valor*
Pressão de entrada GNL (bar)	1,300
Temperatura de entrada GNL (°C)	-162
Pressão de exaustão do gás natural (bar)	70,00
Pressão de entrada do Ar (bar)	1,013
Temperatura de entrada do Ar (°C)	25,0
Temperatura da água do mar (°C)	25,0
Temperatura de saída dos aquecedores (com água do mar) (°C)	15,0
Mínima diferença de temperatura em trocadores de calor (°C)	3,00
Máxima razão de compressão em compressores (-)	3,5
Máxima razão de compressão em bombas (-)	-
Eficiência isentrópica de compressores (%)	0,90
Eficiência isentrópica de turbinas (%)	0,92
Eficiência isentrópica de bombas (%)	0,90

Tabela 1 - Restrições e parâmetros de processo.

Simulação integrada Hysys-Python

Devido à alta interdependência entre as unidades e múltiplas variáveis modificáveis da simulação, Python foi utilizado para atribuir automaticamente valores ao sistema. Além disso, foram implementadas funções de checagem para garantir o cumprimento das Leis da Termodinâmica, garantindo ausência de cruzamento de temperatura nos trocadores de calor e respeitando os limites operacionais dos equipamentos e estado físico de operação dos componentes (Tabela 2).

Figura 1 - Diagrama esquemático do sistema LNG-LAES-ORC com múltiplos estágios de bombeamento.

Corrente	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Corrente	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Corrente	Pressão (bar)	Temperatura (°C)
A1	1,013[(a)]	25,00[(a)]	L1	1,30[(a)]	-162,00[(a)]	L14	300	-45,0[(a)]
A2	1,013	-54,00[(a)]	L2	30 [(a)]	-160,95	L16	190[(a)]	-5,75
A3	2,11[(a)]	4,42	L3	30	-145,00[(a)]	L18	109[(a)]	-15,44
A5	4,60[(a)]	-16,54	L4	90 [(a)]	-142,30	L20	90[(a)]	-2,27
A7	9,45[(a)]	2,03	L5	90	-140,00[(a)]	L22	70[(a)]	-2,03
A9	19,91[(a)]	-91,89	L6	180 [(a)]	-135,95	O1	2[(a)]	-40,37
A12	42,00[(a)]	-139,36	L7	180	-122,00[(a)]	O2	2	-65,00[(a)]
A14	205[(a)]	-97,89	L8	240 [(a)]	-118,92	O3	12[(a)]	-64,52
A16	55[(a)]	-73,52	L9	240	-115,00[(a)]	O4	12	15,00[(a)]
A18	14,50[(a)]	-73,87	L10	280[(a)]	-112,92	SWin	1,013[(a)]	25,00[(a)]
A20	3,80[(a)]	-72,03	L11	280	-105,00[(a)]	SWout	1,013[(a)]	22,00[(a)]

[(a)] *inputs* fornecidos para cálculo das demais condições.
* as vazões mássicas de gás natural (L), ar (A), fluido de trabalho do ORC (O) são constantes e equivalem a: 1 kg/s, 0,3168 kg/s e 0,3583 kg/s, respectivamente.

Tabela 2 - Condições operacionais do caso base.

Análise de sensibilidade e escopo

Para a análise de sensibilidade, foi necessário determinar os intervalos de variação das variáveis do sistema que apresentavam valores viáveis, inicialmente desconhecidos. Para tal, utilizou-se o utilitário *Case Studies* do Aspen Hysys. que permite avaliar o impacto da variação de uma variável sobre parâmetros calculáveis como potência líquida gerada, destruição de exergia e capital inicial estimado.

Os níveis inferior e superior de cada intervalo foram definidos com base nos seguintes critérios: (i) convergência da simulação nos Hysys; (ii) cumprimento de restrições operacionais verificadas via Python (como diferença mínima de temperatura e razão de compressão); (iii) intervalos sem inversão de tendência para o parâmetro avaliado.

Quando necessário, os intervalos foram ajustados iterativamente via Python até atender aos critérios. As variáveis com maior impacto sobre os parâmetros avaliados foram destacadas por meio de um diagrama tornado.

Análise exergética e econômica

A abordagem considerada na simulação foi de estado estacionário, e todos os equipamentos foram tratados como adiabáticos e sem perda de carga nos escoamentos. A equação de estado Peng Robinson foi aplicada para o cálculo das propriedades termodinâmicas. A exergia específica de cada uma das *i* - correntes do processo foi determinada segundo a Equação (1),

$$\mathrm{ex_i} = (\mathrm{h_i} - \mathrm{h^o}) - \mathrm{T^o}(\mathrm{s_i} - \mathrm{s^o}) \qquad (1)$$

na qual h_i é a entalpia mássica da corrente *i*, s_i é a entropia mássica da corrente *i*, e h^o e s^o são as entalpias e entropias na condição de referência. Nesse trabalho a condição de referência adotada foi de 101,3 kPa e 25 °C para cada uma das diferentes correntes (GNL, água e ar, fluido do ciclo ORC).

O balanço de exergia para cada volume de controle, dado a hipótese de equipamentos adiabáticos, é dada pela Equação (2),

$$\dot{\mathrm{E}}\mathrm{x_{dest}} = \dot{\mathrm{W}}_{\mathrm{VC}} + \sum_{\mathrm{e=1}}^{\mathrm{m}} \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{e}}\,\mathrm{ex_e} - \sum_{\mathrm{s=1}}^{\mathrm{n}} \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{s}}\,\mathrm{ex_s} \qquad (2)$$

na qual $\dot{E}x_{dest}$ é a taxa de exergia destruída, $\dot{W}_{VC}$ é o trabalho líquido exercido no volume de controle ou pelo volume de controle e os termos de somatório são as exergias associadas a cada n-correntes que entram e m-correntes que saem do volume de controle.

Para a análise econômica foi utilizada a correlação empírica proposta por Heberle *et al.* (2012), na qual a soma dos custos de todos os equipamentos adquiridos (C_{PE}) constitui o investimento inicial do sistema, apresentada pela Equação (3).

$$\log(C_{PE}) = K_1 + K_2.\log(X) + K_3.\log(X)^2 \qquad (3)$$

Na fórmula, CPE é o custo do equipamento, em dólares americanos (US$); X é a área de troca térmica no caso do trocador de calor ou a potência de entrada/saída para a bomba/compressor, em m² ou kW; K1, K2 e K3 são coeficientes constantes, cujos valores específicos estão listados na Tabela 3.

Equipamento	***Variável X***	K_1	K_2	K_3
Trocador de Calor	Área (m²)	4,6656	-0,1557	0,1547
Bomba	Potência consumida (kW)	3,3892	0,0536	0,1538
Compressor/ Turbina	Potência consumida/ gerada (kW)	2,6259	1,4398	-0,1776

Tabela 3 - Parâmetros da correlação de Heberle et al (2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir do caso base, realizou-se a variação de algumas condições, provocando respostas às funções objetivo avaliadas. Na Figura 2 apresenta-se o impacto relativo na geração de potência e, na Figura 3, em relação à taxa de destruição de exergia.

Dentro desse escopo, foi possível identificar casos em que houve melhoria considerável em relação ao caso base. Verificou-se que uma redução da pressão de liquefação da corrente A12 implicou no aumento da geração de potência de 86,82 kW para 90,1 kW/kg.s-1. Além disso, o aumento da razão de compressão no primeiro estágio de bombeamento (L2) de 30 bar para 85 bar, parece ter impactado positivamente a geração de potência, chegando a 91,2 kJ/kg, que representa um incremento de 5,1% em relação ao caso base e de 8,1 % em relação ao artigo de Lee et al (2019), o qual o sistema se baseia (Tabela 4).

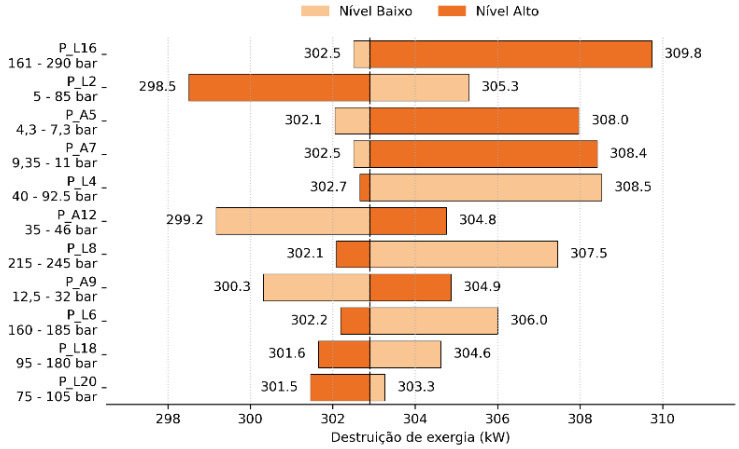


Figura 2 - Análise de sensibilidade de algumas variáveis na geração líquida de potência.

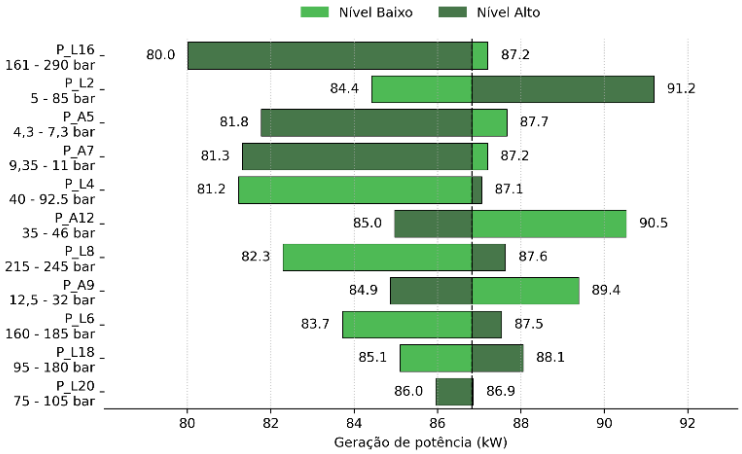


Figura 3 - Análise de sensibilidade de algumas variáveis na destruição total de exergia.

Artigo	***Geração de Potência (kJ/kg GNL)***
Lee et al 2017	67,44
Lee et al 2019	84,34
Qi et al 2020	85,67
Jiang et al 2024	28,71
Este trabalho (caso base)	86,82
Este trabalho (melhor condição)	91,2

Tabela 4 - Comparação de desempenho geração de potência com a literatura.

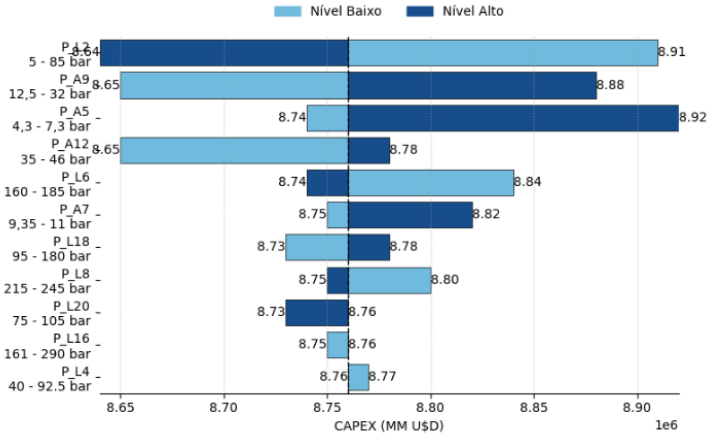


Figura 4 - Análise de sensibilidade de algumas variáveis no custo total instalado.

Ainda, com relação à variável L2, observou-se que sua elevação para 85 bar resultou não apenas em um aumento de 8,1% na geração de potência, mas também em uma redução no CAPEX estimado, de 8,76 para 8,64 MM U$D. Isto ocorre pois, em um sistema altamente interligado, alterações nas razões de compressão impactam diretamente a temperatura de exaustão e, por consequência, a área de troca térmica. Isto implica na necessidade de uma análise conjunta e automatizada desses parâmetros, dado o comportamento interdependente entre eles e de difícil previsibilidade. Deste modo, L2 destacou-se como a variável com melhor desempenho em múltiplos parâmetro entre as avaliadas.

CONCLUSÕES:

- A modificação do sistema LAES-LNG-ORC com a inclusão de multiestágios de bombeamento na unidade de liquefação de ar resultou em melhorias de até 8,1% no desempenho, evidenciando o potencial de aprimoramento do cenário original mesmo sem a aplicação de técnicas formais de otimização.
- A análise realizada focou em variações individuais das variáveis, não considerando efeitos combinados, o que limita a identificação de soluções ótimas globais. Ainda assim, o trabalho contribui ao indicar as variáveis mais sensíveis à função objetivo, sendo um passo fundamental para futuros estudos.
- A abordagem desenvolvida, aliada ao *script* de verificação de restrições, fornece uma base para investigações mais amplas em espaços de busca com múltiplas variáveis, viabilizando, em etapas futuras, a aplicação de métodos meta-heurísticos como *Particle Swarm Optimization* de forma mais eficiente e direcionada.

BIBLIOGRAFIA:

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Mapa da infraestrutura de gasodutos de transporte. Rio de Janeiro: EPE, [s.d.]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/mapa-da-infraestrutura-de-gasodutos-de-transporte. Acesso em: 22 jul.

2025HEBERLE, F.; BASSERMANN, P.; PREIßINGER, M.; BRÜGGEMANN, D. Exergoeconomic optimization of an organic Rankine cycle for low-temperature geothermal heat sources. ***International Journal of Thermodynamics***, v. 15, n. 2, p. 119–126, 2012.

JIANG, Q.; WAN, S.; PAN, C. et al. Thermodynamic design and analysis of air-liquefied energy storage combined with LNG regasification system. ***International Journal of Refrigeration***, v. 160, p. 329–340, abr. 2024.

LEE, I.; PARK, J.; MOON, Il. Conceptual design and exergy analysis of combined cryogenic energy storage and LNG regasification processes: Cold and power integration. ***Energy***, v. 140, p. 106–115, dez. 2017.

LEE I, YOU F. Systems design and analysis of liquid air energy storage from liquefied natural gas cold energy. ***Applied Energy***, v. 242, p. 168-180, 2019.

QI, M.; PARK, J.; KIM, J.; LEE, I.; MOON, Il. Advanced integration of LNG regasification power plant with liquid air energy storage: Enhancements in flexibility, safety, and power generation. ***Applied Energy***, v. 269, Art. 115049, jul. 2020.