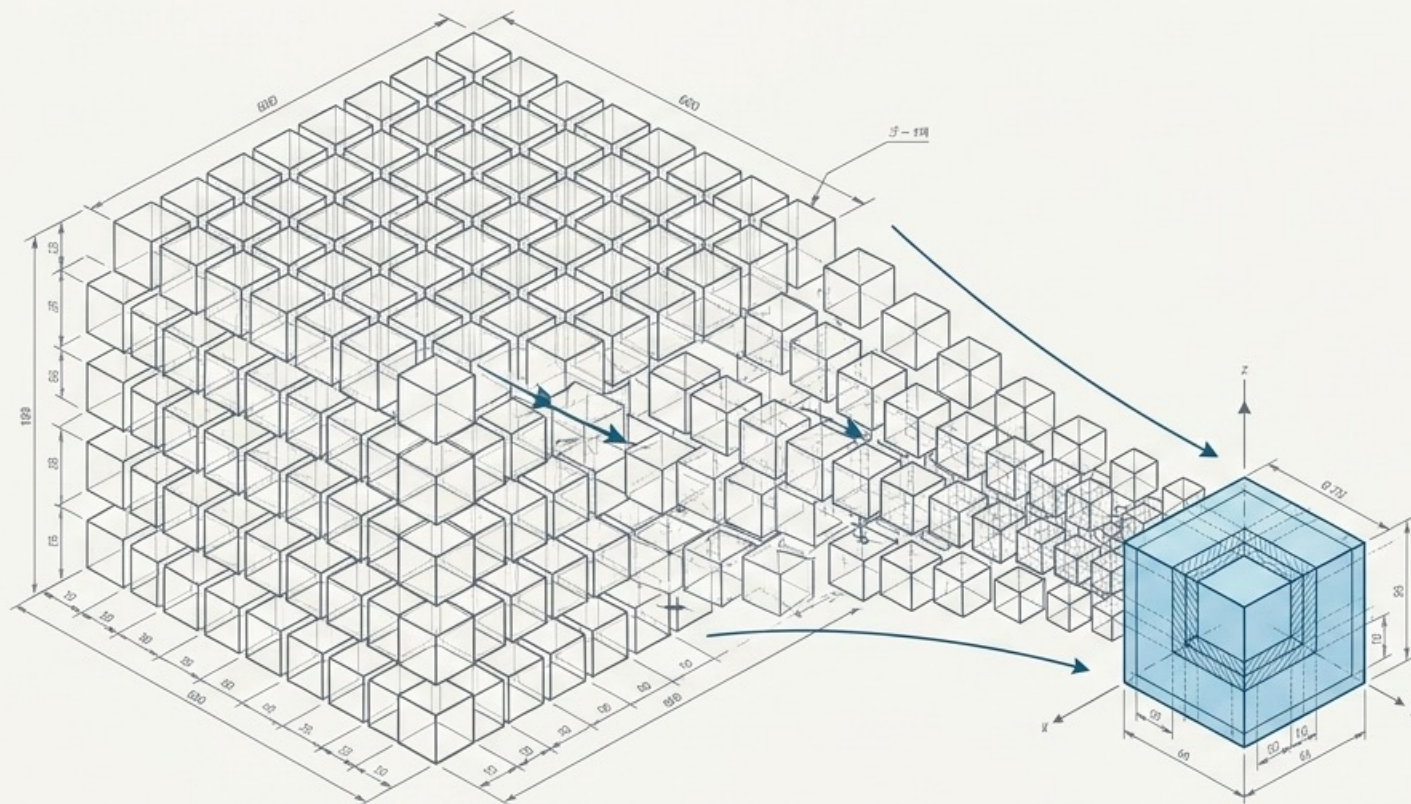


Fundamentos Físicos do GNL

O Gás Natural Liquefeito (GNL) é o vetor central da estabilidade energética global contemporânea. A redução à temperatura criogênica sob pressão atmosférica converte o gás à fase líquida, atingindo uma densidade entre 430-470 kg/m³.



-162°C

Temperatura de Liquefação

1:600

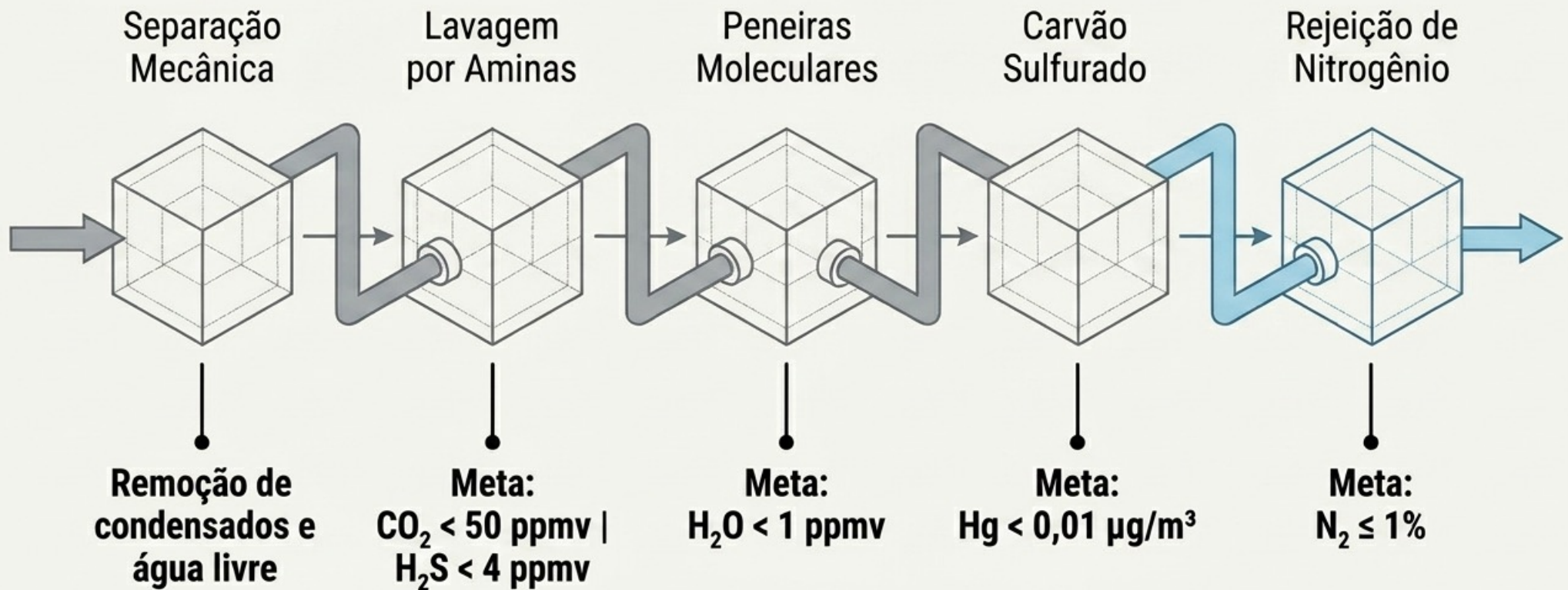
Fator de Contração Volumétrica

-35%

Emissões vs. Carvão Mineral

Condicionamento e Purificação do Gás de Alimentação

A introdução do gás bruto diretamente nos trocadores de calor criogênicos induz o congelamento de impurezas sólidas e fragilização por metal líquido. O pré-tratamento exige parâmetros químicos estritos de tolerância.



Fase 1: O Déficit Térmico (Liquefação)

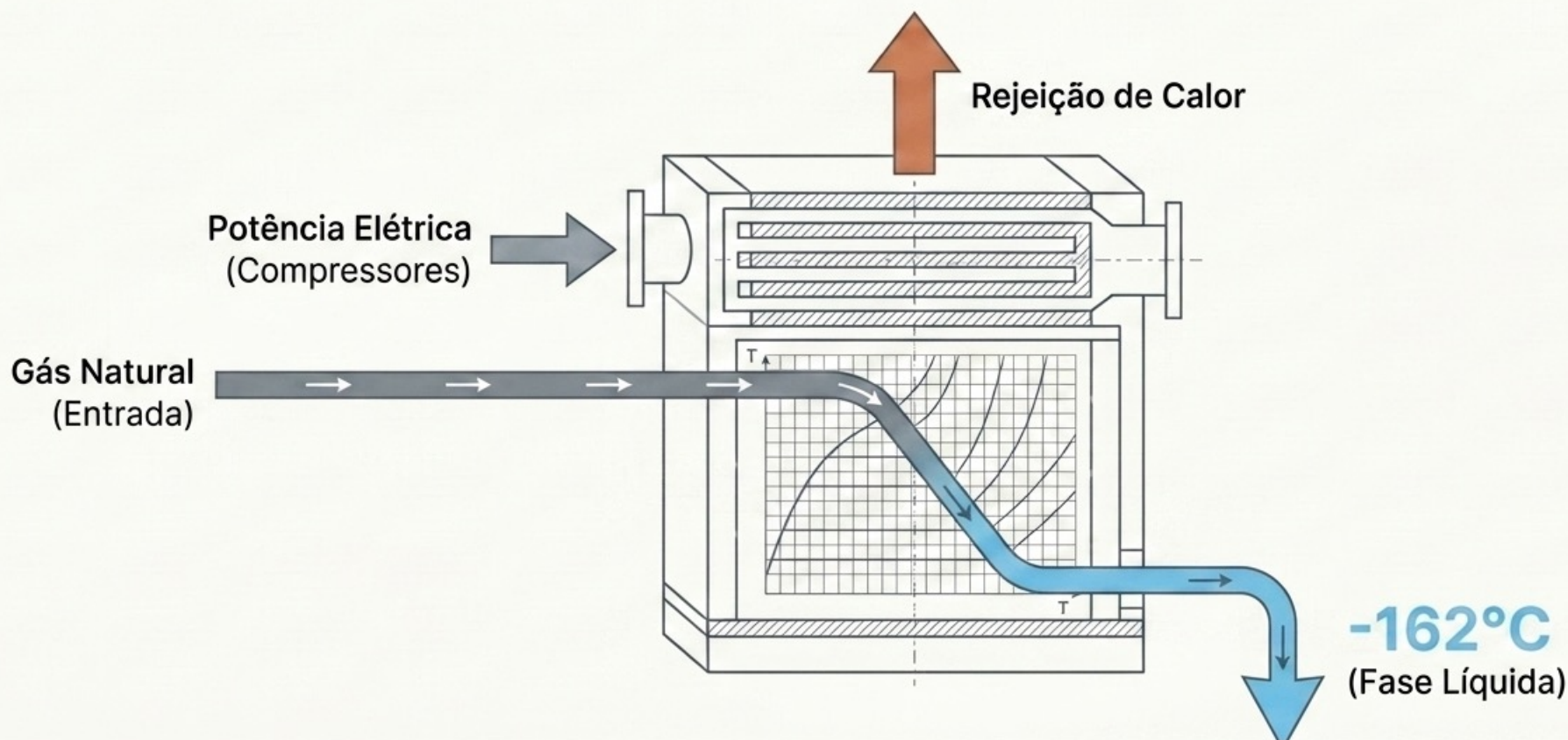
O **processo de criogenia** exige uma carga energética intensiva, correspondendo ao consumo de aproximadamente 3,6% do poder calorífico inferior (PCI) do próprio gás. A remoção de calor ocorre via expansão termodinâmica.

500 a 850 kWh/t

Consumo Energético Médio

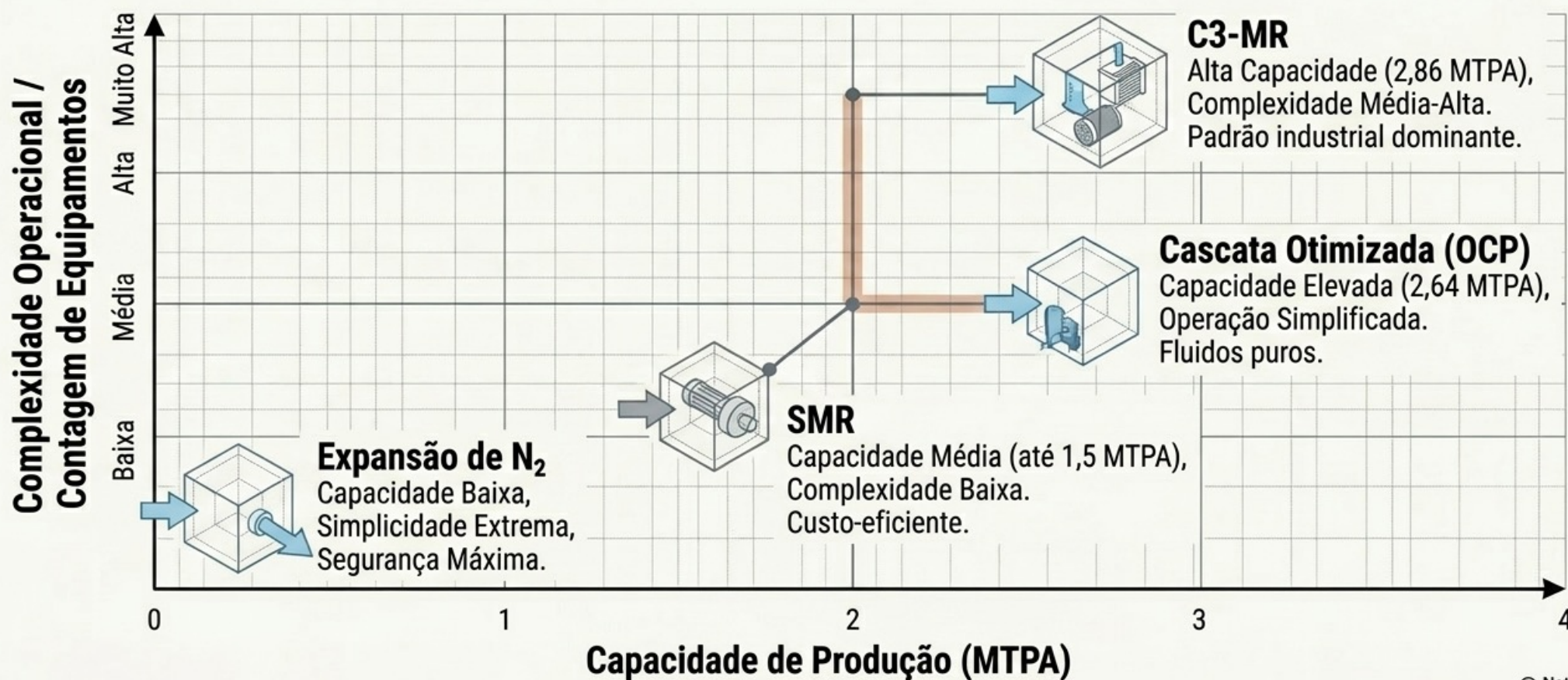
< 25 kPa

Pressão de Controle BOG



Matriz Comparativa de Tecnologias de Liquefação

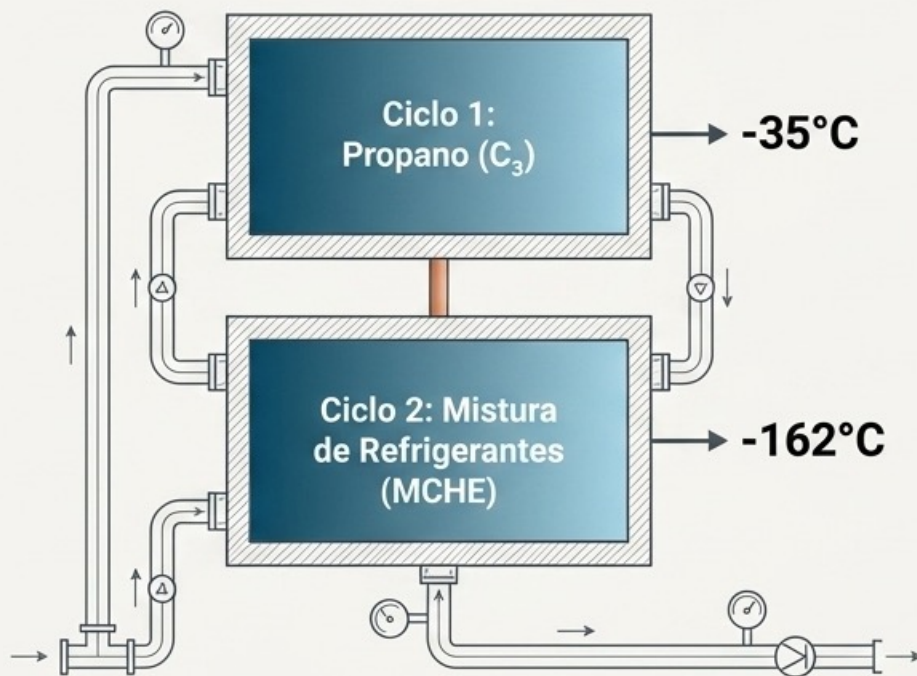
A seleção da tecnologia de refrigeração reflete um balanço restrito entre a capacidade de produção (MTPA) e a complexidade operacional da planta.



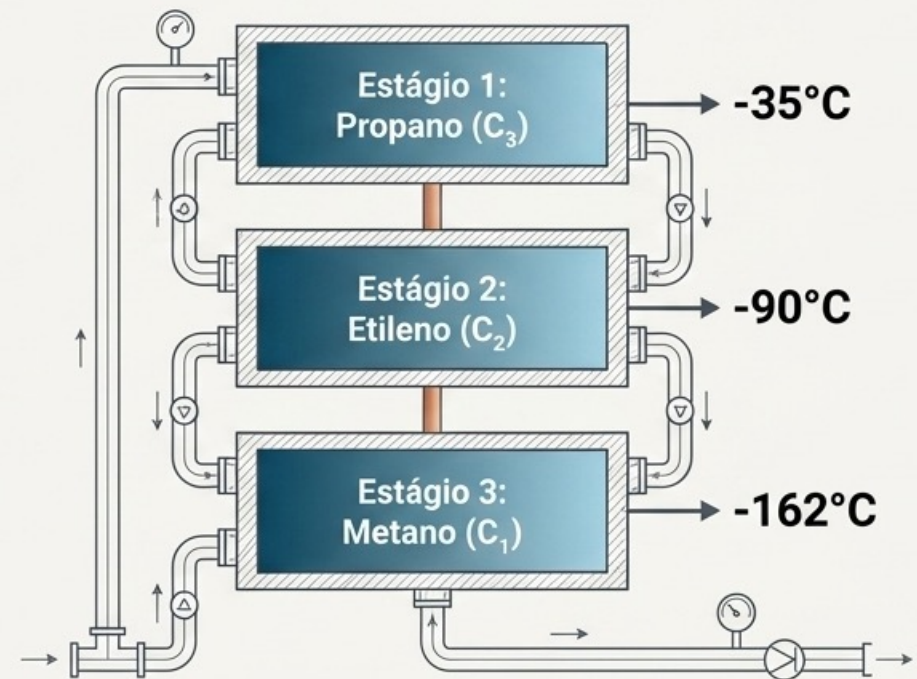
Arquitetura de Refrigeração: C3-MR vs. Cascata Otimizada

Processos de grande escala utilizam estágios sucessivos de resfriamento. O **C3-MR** equilibra um ciclo puro com uma **mistura dinâmica**, enquanto a **Cascata** opera exclusivamente com fluidos puros em patamares térmicos definidos.

C3-MR (APCI)



Cascata Otimizada (OCP)



Fase 2: O Superávit Térmico (Regasificação e Recepção)

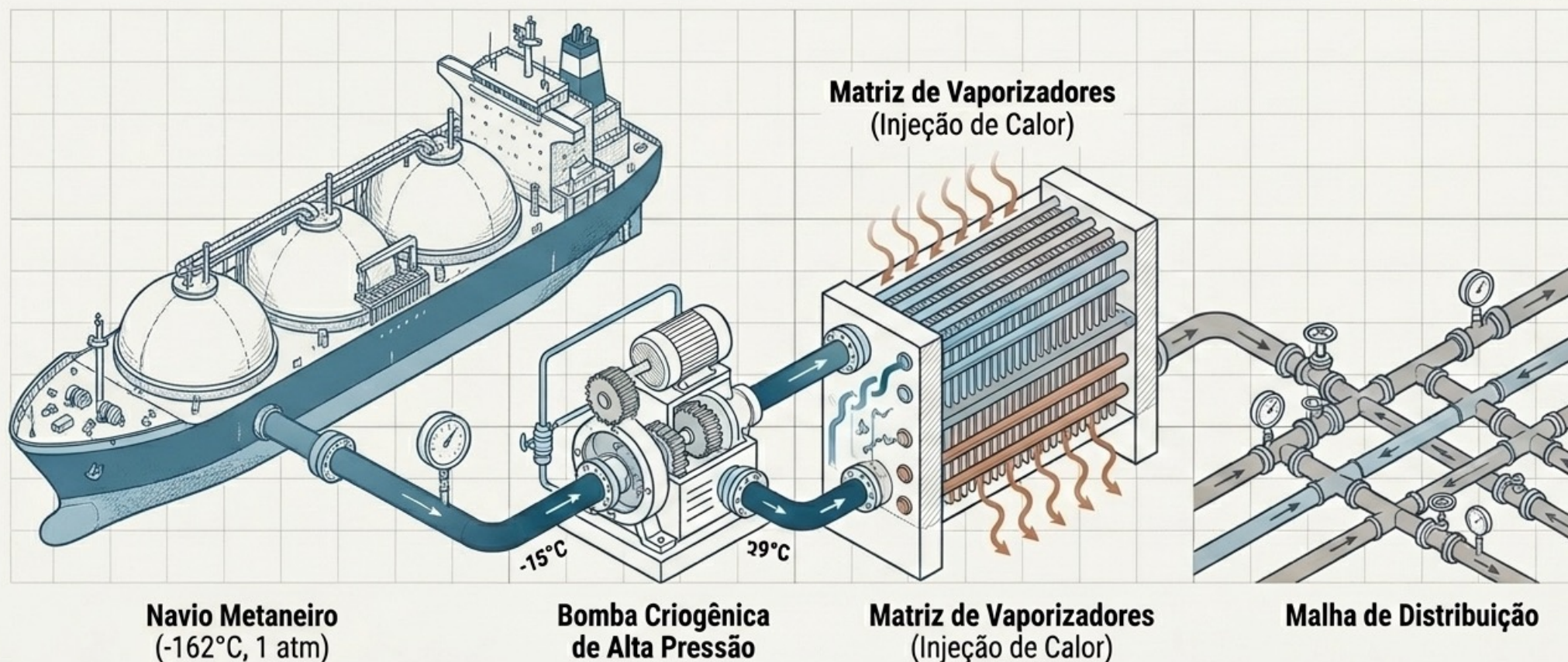
80-120 bar

Pressurização Primária

Nos terminais importadores, a reinjeção de calor para o retorno ao estado gasoso é antecedida por compressão mecânica. O metano em fase líquida é pressurizado para atender aos parâmetros da malha de distribuição de gás.

-162°C para $\geq 0^\circ\text{C}$

Objetivo Térmico

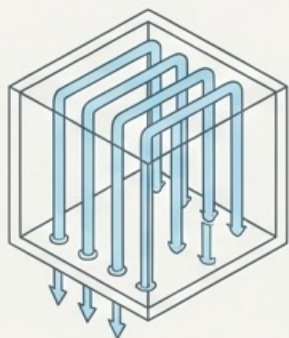


Árvore de Decisão: Tecnologias de Vaporização

A seleção do trocador de calor térmico depende intrinsecamente da temperatura da água do mar local e das metas de OPEX (Custo Operacional).

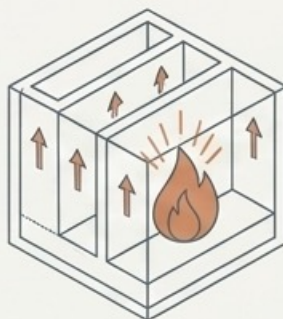
Rack Aberto (ORV)

- 70% do mercado
- Fluido: Água do Mar em queda livre
- OPEX Mínimo
- Limitante: Risco de congelamento se água $< 5^{\circ}\text{C}$



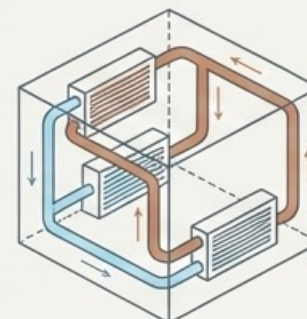
Combustão Submersa (SCV)

- 25% do mercado
- Fluido: Gases de combustão submersos
- OPEX Alto (queima de gás)
- Vantagem: Imunidade a variações climáticas



Fluido Intermediário (IFV)

- Aplicações específicas
- Fluido: Circuito fechado de propano + água
- Vantagem: **Previne congelamento ($>18^{\circ}\text{C}$)**



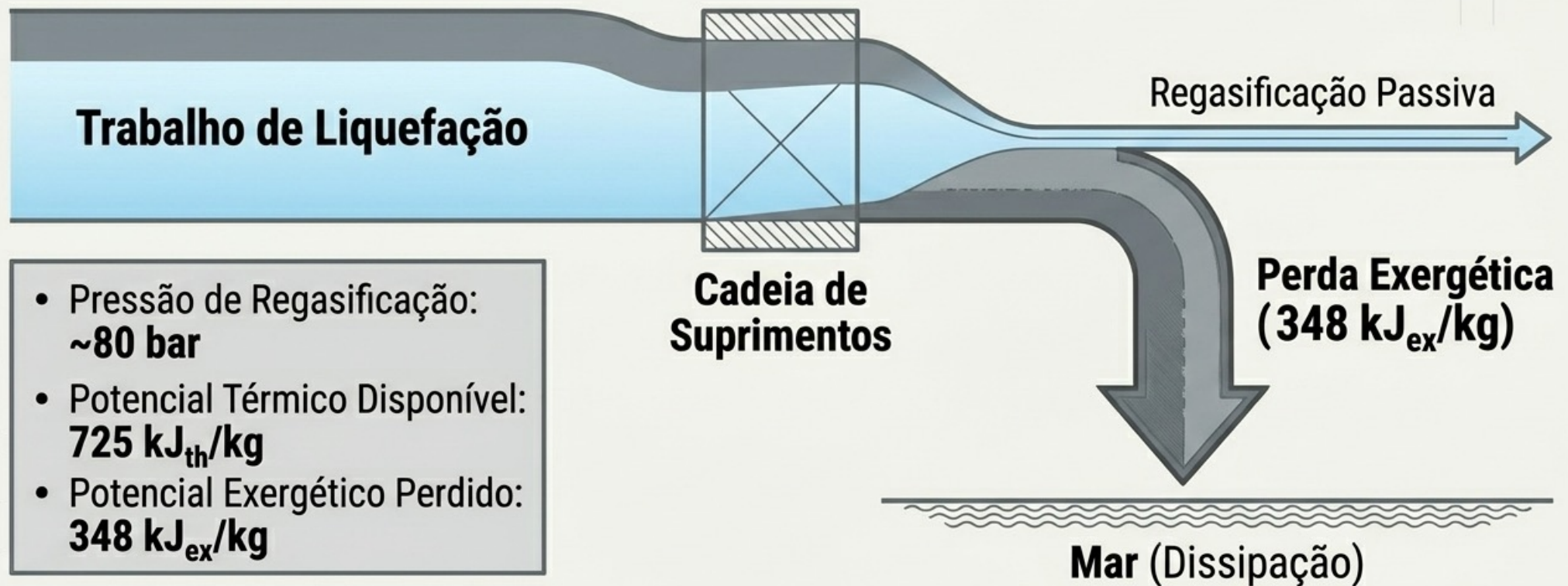
Otimização Dinâmica de Terminais (Operação Conjunta ORV-SCV)

Em regiões de alta variação térmica sazonal, a operação híbrida dos vaporizadores mitiga os gargalos termodinâmicos do ORV no inverno, reduzindo drasticamente os custos operacionais (combustível) em relação à operação exclusiva via SCV.

Diferencial de Temperatura: (ΔT)		Redução de Custo:
3,0 °C ----->		70 – 77%
2,5 °C ----->		60 – 67%
2,0 °C ----->		45 – 50%
1,5 °C ----->		35 – 38%

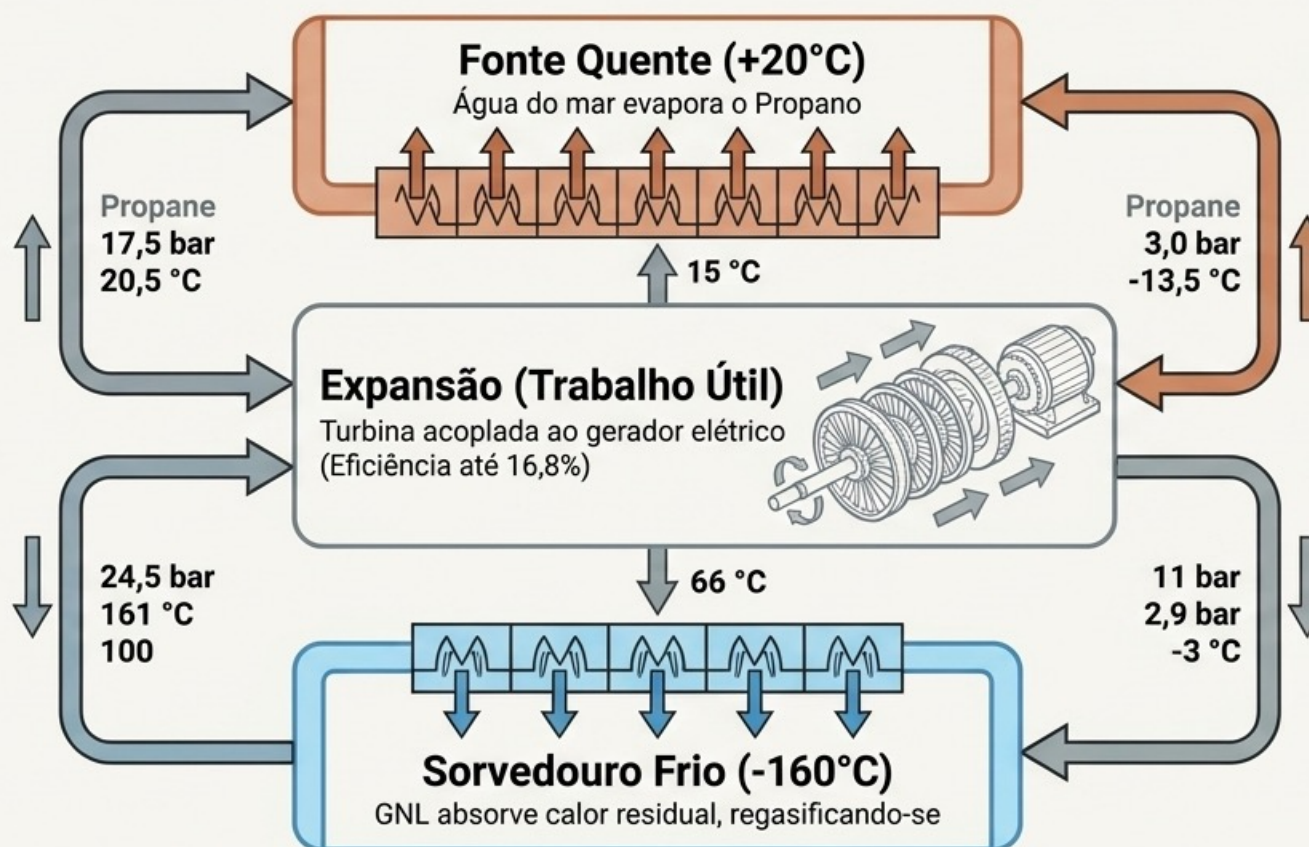
O Paradigma da Perda Exergética

A vaporização passiva do GNL nos sistemas convencionais representa uma destruição irreversível da exergia aplicada durante a fase de liquefação. O frio criogênico do metano sob alta pressão constitui um elevado potencial de trabalho mecânico.



Fase 3: Otimização de Fronteira (Ciclo Rankine Orgânico - ORC)

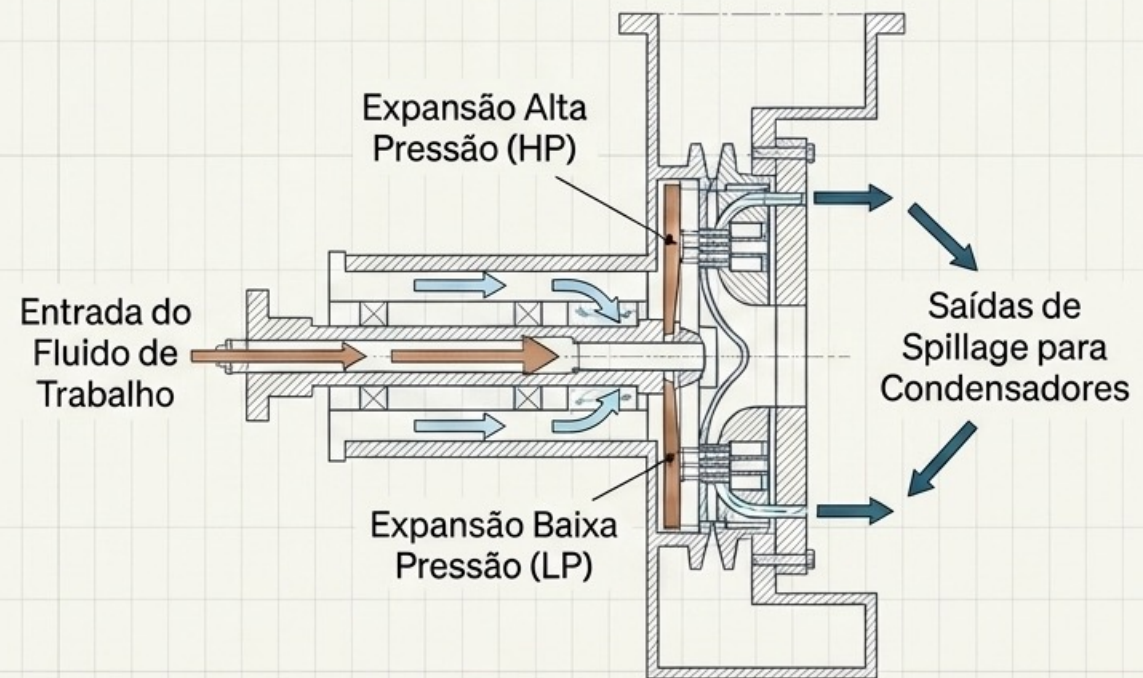
A integração do Ciclo Rankine Orgânico (ORC) reverte a lógica da vaporização. A água do mar e o GNL criam um gradiente térmico massivo, movimentando um fluido orgânico de trabalho (Propano) em circuito fechado para gerar eletricidade ativa antes da injeção na rede.



Mecânica Avançada: Turbina Radial (ROT)

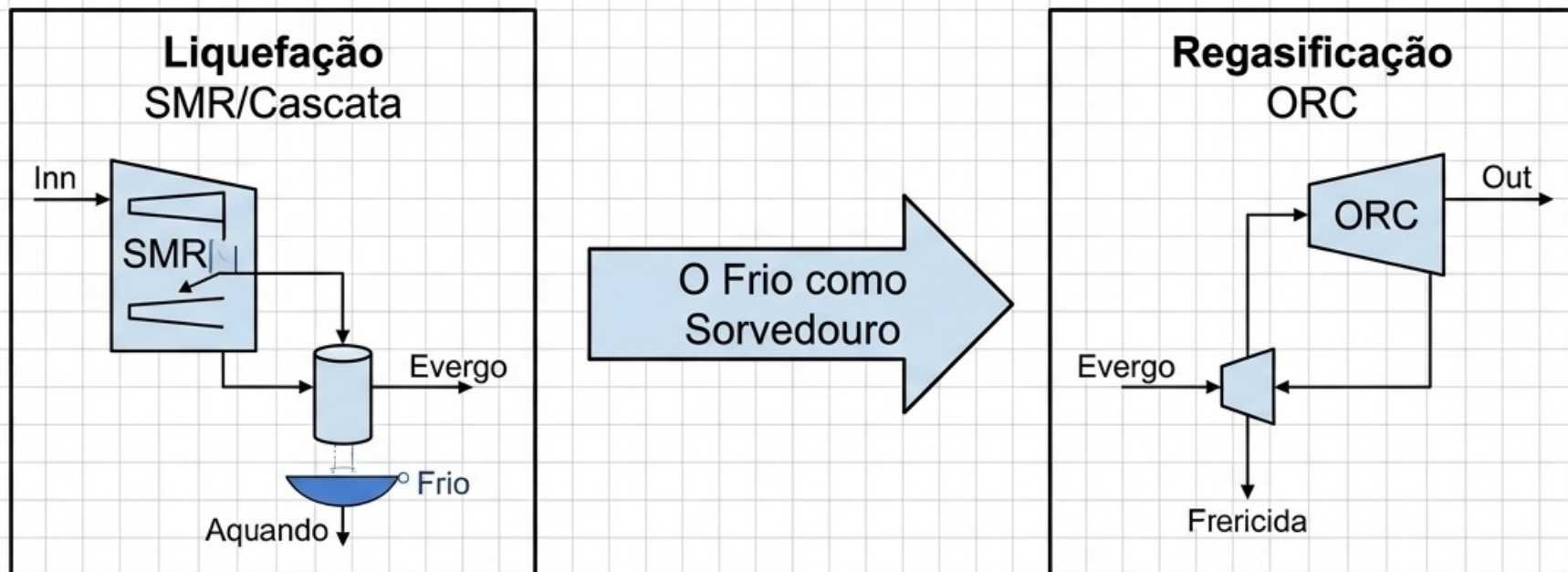
O aproveitamento máximo do gradiente térmico criogênico requer a aproximação das curvas de condensação e evaporação. Turbinas Radiais permitem a extração de potência através de múltiplos níveis de pressão em uma única máquina.

- **Vazamentos controlados entre estágios (*spillages*).**
- **Acomodação de altas taxas de expansão volumétrica de forma radial.**
- **Mancais isolados longe das zonas criogênicas extremas.**



Síntese: O Fechamento do Ciclo Térmico

A fronteira da engenharia do GNL reside no fechamento do ciclo de Carnot global. Através de sistemas ORC, o déficit térmico transforma-se em um ativo de recuperação exérgica, maximizando a eficiência de ponta a ponta.





www.gt2.com.br