

Relatório Técnico: Análise do Compressor de H₂ em Múltiplos
Estágios

Modelo Termodinâmico baseado na Tese de Mestrado

27 de novembro de 2025

1 Introdução

Este relatório sumariza o modelo termodinâmico utilizado para simular a compressão de H₂ em um sistema de armazenamento, com foco na eficiência energética e nas configurações de múltiplos estágios. O modelo baseia-se em parâmetros críticos definidos em estudos de otimização de sistemas de armazenamento de hidrogênio.

2 Modelo do Compressor e Princípio de Funcionamento

O compressor modelado utiliza o princípio de compressão em **múltiplos estágios com inter-resfriamento** para minimizar o trabalho total de compressão e manter a segurança operacional.

2.1 A Necessidade de Múltiplos Estágios

A compressão adiabática de um gás eleva drasticamente sua temperatura. No caso do H₂, esta elevação pode danificar o equipamento e criar riscos de segurança, especialmente quando o gás está confinado. O modelo impõe um limite máximo de temperatura ($T_{\max} = 85^{\circ}\text{C}$) por estágio.

Para garantir que a temperatura não exceda este limite, a razão de pressão ($P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$) é dividida em N estágios. Após cada estágio de compressão, o gás é resfriado de volta à temperatura de entrada ($T_{\text{in}} = 10^{\circ}\text{C}$) por meio de um **inter-resfriador**.

2.2 Processo Termodinâmico (Diagrama T-s)

O processo é modelado como uma sucessão de ciclos:

1. **Compressão Real:** O gás é comprimido de P_{in} a P_{out} , estágio (trajetória diagonal no diagrama T-s: T e s aumentam devido à irreversibilidade da eficiência de 65%).
2. **Inter-resfriamento:** O gás é resfriado de volta a T_{in} (trajetória horizontal no diagrama T-s: T diminui e s aumenta ligeiramente devido à transferência de calor irreversível).

Este ciclo é repetido N vezes. O resfriamento reduz a entalpia do gás, permitindo que o estágio subsequente comece com menos energia e, consequentemente, exija menos trabalho total.

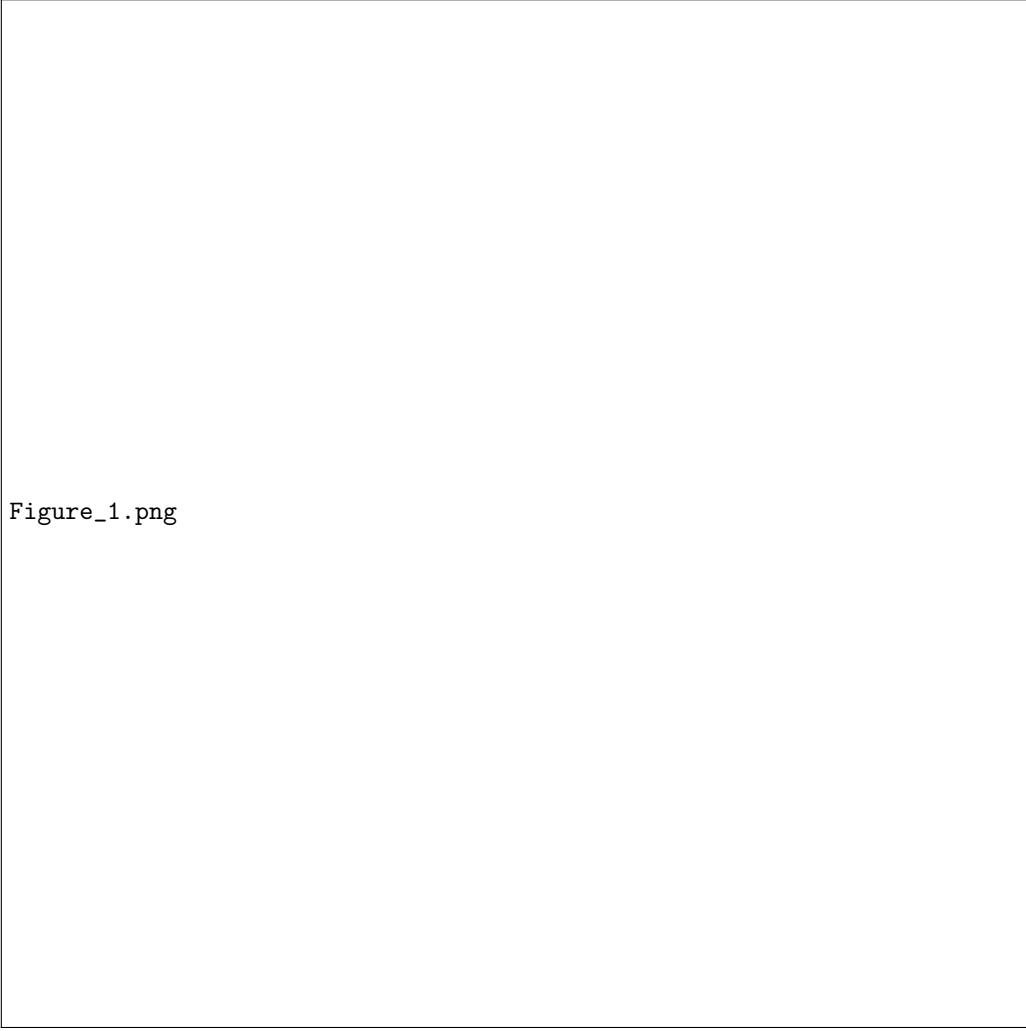


Figura 1: Diagrama T-s Conceitual: Compressão em Múltiplos Estágios com Inter-resfriamento (50 → 500 bar)

3 Cálculos Termodinâmicos Detalhados

3.1 Referências Termodinâmicas e Bibliotecas

Todos os cálculos de propriedades termofísicas do H₂ (entalpia h , entropia s) foram realizados utilizando a biblioteca de código aberto **CoolProp**. O CoolProp fornece valores precisos de gases reais, essenciais para modelar o comportamento do hidrogênio em altas pressões e temperaturas. A função principal utilizada é a `PropsSI(Output, State1, Value1, State2, Value2, Fluid)`.

3.2 Etapas de Cálculo (Por Estágio, i)

O cálculo do consumo de energia baseia-se na Primeira Lei da Termodinâmica para volumes de controle em regime permanente.

- Propriedades no Estado de Entrada (Estado 1):** A entalpia (h_1) e a entropia (s_1) são calculadas nas condições de entrada/inter-resfriamento ($P_{\text{in},i}$ e T_{in}).

$$h_1 = \text{CP.PropsSI('H', 'P', } P_{\text{in},i}, \text{'T', } T_{\text{in}}, \text{'H2'}) s_1 = \text{CP.PropsSI('S', 'P', } P_{\text{in},i}, \text{'T', } T_{\text{in}}, \text{'H2'})$$

- Entalpia Isentrópica de Saída (Estado 2s):** O trabalho isentrópico (ideal) é determinado pela entalpia que o gás alcançaria mantendo a entropia constante ($s_{2s} = s_1$).

$$h_{2s,i} = \text{CP.PropsSI('H', 'P', } P_{\text{out},i}, \text{'S', } s_1, \text{'H2'})$$

- Trabalho Real e Entalpia Real (Estado 2a):** O trabalho real ($W_{a,i}$) e a entalpia real de saída ($h_{2a,i}$) são calculados utilizando a eficiência isentrópica ($\eta_C = 0,65$).

$$W_{s,i} = h_{2s,i} - h_1 W_{a,i} = W_{s,i}/\eta_C h_{2a,i} = h_1 + W_{a,i}$$

4. **Calor Removido no Inter-resfriador ($Q_{removido,i}$):** Este cálculo é realizado apenas para os estágios que serão seguidos por um novo estágio de compressão (ou seja, não no último estágio).

$$h_{cooled,i} = \text{CP.PropsSI}('H', 'P', P_{out,i}, 'T', T_{in}, 'H2') Q_{removido,i} = h_{2a,i} - h_{cooled,i}$$

3.3 Consumo Total de Energia

O trabalho total de compressão em J/kg é a soma dos trabalhos reais de cada estágio. O trabalho de resfriamento é derivado do calor removido pelo chiller (COP=3,0). O resultado é convertido para kWh/kg:

$$W_{\text{total}} = \left(\sum_{i=1}^N W_{a,i} \right) + \frac{\sum Q_{\text{removido},i}}{COP} \quad [\text{J/kg}]$$

4 Dados de Entrada do Modelo

Os seguintes parâmetros fixos foram utilizados na simulação, com base nas referências da tese:

Tabela 1: Parâmetros Fixos do Modelo Termodinâmico

Parâmetro	Símbolo	Valor
Fluido	—	H ₂
Temperatura de Entrada (H ₂)	T_{in}	10,0 °C
Temperatura Máxima por Estágio	T_{max}	85,0 °C
Eficiência Isentrópica do Compressor	η_C	0,65 (65%)
Coeficiente de Desempenho do Chiller	COP	3,0

5 Resultados da Simulação

A simulação foi executada para os dois cenários de compressão definidos no esquema de armazenamento.

Tabela 2: Resultados da Simulação para Cenários Otimizados

Parâmetro	Enchimento (40 → 140 bar)	Esvaziamento (50 → 500 bar)
P_{in}	40,0 bar	50,0 bar
P_{out}	140,0 bar	500,0 bar
Estágios Calculados	2	3
Consumo Específico	≈ 1,2556 kWh/kg	≈ 3,7287 kWh/kg

5.1 Conclusão dos Resultados

O cenário de **Esvaziamento** (50 → 500 bar) é o processo termodinamicamente mais intensivo, exigindo **3** estágios de compressão** e resultando em um consumo específico de ≈ 3,73 kWh/kg. Este valor reflete o alto trabalho necessário para atingir a pressão final de 500 bar.

O cenário de **Enchimento** (40 → 140 bar) é menos intensivo, exigindo apenas **2** estágios** com consumo de ≈ 1,26 kWh/kg.

A soma das energias é significativa, confirmando que a compressão para armazenamento e distribuição é um dos principais fatores de custo energético no sistema.