

Relatório Técnico: Simulação de Compressor de H₂ em Estágio Único

Modelo Termodinâmico Simplificado

27 de novembro de 2025

1 Introdução

Este relatório descreve um modelo simplificado para simular a compressão de H₂ em um único estágio. O objetivo principal é quantificar o consumo específico de energia e, criticamente, verificar a **temperatura de saída real** (T_{2a}) para avaliar a viabilidade de um compressor simples em comparação com a solução de múltiplos estágios.

2 Função e Interatividade do Programa

O programa Python foi desenvolvido para ser interativo, permitindo que o usuário escolha entre duas opções de execução:

1. **Exemplo Pré-Definido (40 → 140 bar):** Simula um dos cenários de compressão do sistema de armazenamento, testando a viabilidade do estágio único para o processo de enchimento.
2. **Valores Personalizados:** Permite a entrada manual de pressões (P_{in} e P_{out}) pelo usuário, possibilitando a análise de qualquer razão de compressão desejada.

O programa retorna uma tabela de resultados com o consumo energético e as temperaturas, além de gerar um **Diagrama T-s** que compara o processo ideal (isentrópico) com o processo real (irreversível) para o cenário testado.

3 Dados de Entrada Fixos e Variáveis

3.1 Parâmetros de Entrada Fixos

Os seguintes parâmetros operacionais do sistema de armazenamento são fixados no código e usados em todos os cálculos:

Tabela 1: Parâmetros Fixos do Modelo de Estágio Único

Parâmetro	Símbolo	Valor
Fluido	—	H ₂
Temperatura de Entrada	T_{in}	10,0 °C
Eficiência Isentrópica do Compressor	η_C	0,65 (65%)
Temperatura Máxima de Segurança	T_{max}	85,0 °C

3.2 Dados de Entrada Variáveis (Exemplo)

O exemplo pré-definido utiliza as seguintes condições de compressão:

- $P_{in} = 40,0$ bar
- $P_{out} = 140,0$ bar
- Razão de Compressão (P_{out}/P_{in}) = 3,5x

4 Cálculos Termodinâmicos do Estágio Único

O modelo de estágio único elimina o trabalho de inter-resfriamento e se concentra na conversão de entalpia.

4.1 Cálculos de Propriedades (CoolProp)

As propriedades do hidrogênio são acessadas utilizando a função **PropsSI** da biblioteca CoolProp, que permite o uso de equações de estado de gás real.

1. **Propriedades de Entrada (P_{in}, T_{in}):**

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

2. **Entalpia e Temperatura Isentrópica (P_{out}, s_1):**

$$h_{2s} = \text{PropsSI}('H', 'P', P_{out}, 'S', s_1, 'H2') T_{2s} = \text{PropsSI}('T', 'P', P_{out}, 'S', s_1, 'H2')$$

4.2 Cálculo do Trabalho e Temperatura Real

1. **Trabalho Específico Real (W_a):** O trabalho real é obtido corrigindo-se o trabalho isentrópico ($W_s = h_{2s} - h_1$) pela eficiência isentrópica (η_C):

$$W_a = W_s / \eta_C \quad [\text{J/kg}]$$

2. **Entalpia Real de Saída (h_{2a}):**

$$h_{2a} = h_1 + W_a$$

3. **Temperatura Real de Saída (T_{2a}):** A temperatura final real é determinada utilizando-se a entalpia real e a pressão de saída:

$$T_{2a} = \text{PropsSI}(\text{'T'}, \text{'P'}, P_{\text{out}}, \text{'H'}, h_{2a}, \text{'H2'})$$

O consumo total de energia em kWh/kg é o valor de W_a convertido para a unidade padrão.

5 Resultados Esperados e Análise de Segurança

Para o exemplo pré-definido (40 → 140 bar), os resultados calculados e a análise de segurança são os seguintes:

Tabela 2: Resultados Típicos para Compressão em Estágio Único (40 → 140 bar)

Parâmetro de Saída	Valor Obtido
Consumo Total	≈ 0,7854 kWh/kg
Temperatura Isentrópica (T_{2s})	≈ 132,32 °C
Temperatura Real (T_{2a})	≈ 199,97 °C
Status de Segurança	ACIMA DO LIMITE (85°C)

5.1 Análise de Resultados

- **Consumo de Energia:** O valor de 0,7854 kWh/kg representa o trabalho mecânico mínimo (desconsiderando o trabalho de resfriamento, que seria necessário).
- **Falha Operacional:** O resultado de $T_{2a} \approx 200^\circ\text{C}$ excede drasticamente o limite de segurança de 85°C .

Conclusão: O modelo simples demonstra que, mesmo para esta razão de compressão relativamente baixa (3,5x), a compressão de H₂ em estágio único é **inviável** devido à geração de calor excessivo. Isso valida a abordagem utilizada no modelo complexo de armazenamento, que exige o uso obrigatório de **múltiplos estágios com inter-resfriamento** para manter a temperatura do gás em níveis seguros e operacionais.