

Modelagem de Válvula de Estrangulamento Isoentálpica para Fluxo de Hidrogênio

Modelo de Simulação de Eletrólise

1 de dezembro de 2025

Conteúdo

1	Introdução ao Modelo	1
1.1	Premissas Termodinâmicas	1
2	Cálculos e Ferramentas	1
2.1	Entradas do Modelo	2
2.2	Procedimento de Cálculo com CoolProp	2
3	Resultados do Modelo	2

1 Introdução ao Modelo

O componente modelado é uma **válvula de estrangulamento simples** (ou válvula de expansão), essencial para o controle de pressão no fluxo de **Hidrogênio** (H_2) resultante de um processo de eletrólise.

O processo termodinâmico que descreve o fluxo através desta válvula é o **estrangulamento** (throttling), que é modelado como um processo **isoentálpico** (entalpia constante) e adiabático.

1.1 Premissas Termodinâmicas

- **Processo Adiabático:** Não há troca de calor (Q) com o ambiente.
- **Sem Trabalho de Eixo:** Não há trabalho útil (W) realizado pela ou sobre a válvula.
- **Variação de Energia Cinética/Potencial Desprezível:** Considera-se que a diferença de velocidade e altura entre a entrada e a saída é insignificante.

Com base na Primeira Lei da Termodinâmica para um volume de controle em estado estacionário (steady-state), e aplicando as premissas acima, a equação de balanço de energia se simplifica para:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eixo} + \dot{m} \left[(h_{in} - h_{out}) + \frac{1}{2} (v_{in}^2 - v_{out}^2) + g (z_{in} - z_{out}) \right] = 0$$

Onde, assumindo $\dot{Q} \approx 0$, $\dot{W}_{eixo} \approx 0$, $\Delta v^2 \approx 0$ e $\Delta z \approx 0$, temos:

$$h_{out} = h_{in}$$

Este é o princípio do processo **isoentálpico**, onde a entalpia específica (h) na saída é igual à entalpia específica na entrada.

2 Cálculos e Ferramentas

Os cálculos das propriedades termodinâmicas são realizados utilizando a biblioteca **CoolProp** do Python, que emprega equações de estado de gases reais, sendo essencial para o hidrogênio, que exibe o **Efeito Joule-Thomson**.

2.1 Entradas do Modelo

O estado inicial do fluido é definido por duas propriedades termodinâmicas independentes:

1. Temperatura de Entrada (T_{in})
2. Pressão de Entrada (P_{in})

Além disso, é definida a Pressão de Saída (P_{out}), que é o objetivo da válvula.

2.2 Procedimento de Cálculo com CoolProp

O procedimento em Python para determinar o estado de saída ($T_{out}, \rho_{out}, s_{out}$) é o seguinte:

1. **Cálculo da Entalpia de Entrada (h_{in}):**

$$h_{in} = \text{CoolProp.PropsSI('H', 'T', } T_{in}, 'P', P_{in}, \text{'hydrogen'})$$

2. **Definição da Entalpia de Saída (h_{out}):**

$$h_{out} = h_{in} \quad (\text{Condição Isoentálpica})$$

3. **Cálculo da Temperatura de Saída (T_{out}):** A temperatura de saída é determinada utilizando a entalpia constante (h_{out}) e a pressão de saída definida (P_{out}).

$$T_{out} = \text{CoolProp.PropsSI('T', 'P', } P_{out}, 'H', h_{out}, \text{'hydrogen'})$$

O efeito de resfriamento ou aquecimento na expansão (diferença $T_{out} - T_{in}$) é o **Efeito Joule-Thomson**, que para o hidrogênio, em condições típicas de temperatura ambiente, resulta em **aquecimento** devido à sua baixa temperatura de inversão.

3 Resultados do Modelo

Os resultados são organizados em propriedades de entrada e saída, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades Termodinâmicas de Entrada e Saída da Válvula

Propriedade	Símbolo	Entrada (IN)	Saída (OUT)
Temperatura	T [K]	T_{in}	T_{out}
Pressão	P [Pa]	P_{in}	P_{out}
Entalpia Específica	h [J/kg]	h_{in}	$h_{out} \approx h_{in}$
Entropia Específica	s [J/(kg·K)]	s_{in}	s_{out}
Densidade	ρ [kg/m ³]	ρ_{in}	ρ_{out}