

# Modelagem de Válvula de Estrangulamento Isoentálpica para Fluxo de Hidrogênio

Modelo de Simulação de Eletrólise

1 de dezembro de 2025

## Conteúdo

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

## 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	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{in}$	$\rho_{out}$