

# Relatório Técnico: Modelo de Dimensionamento Preliminar de Dry Cooler para Eletrolisador

Modelo Desenvolvido em Python

November 28, 2025

## Abstract

Este relatório descreve o modelo matemático desenvolvido em Python para o dimensionamento preliminar de um **Dry Cooler (Resfriador a Ar)** destinado ao resfriamento das correntes gasosas ( $H_2$  e  $O_2$ ) de alta pressão (40 bar) provenientes de um eletrolisador. O modelo baseia-se nos princípios de Termodinâmica e Transferência de Calor, calculando a área de troca térmica necessária para atingir uma temperatura de saída definida e estimando o gasto energético associado ao ventilador. As decisões de projeto consideram o **pior cenário** de operação em Enschede, Países Baixos.

## 1 Descrição e Objetivo do Modelo

O código implementa uma função, `dry_cooler_model`, que atua como uma ferramenta de simulação para estimar os requisitos mínimos de um trocador de calor.

### 1.1 Dados de Entrada (Inputs)

- `gas_name`: Nome do gás ( $H_2$  ou  $O_2$ ).
- `m_dot_g`: Vazão mássica do gás (kg/s).
- `T_g_in`: Temperatura de entrada do gás ( $80^\circ C$ ).
- `T_g_out`: Temperatura de saída desejada do gás ( $40^\circ C$  ou  $30^\circ C$ ).
- `P_g`: Pressão do gás (40 bar).
- `T_a_in`: Temperatura de entrada do ar ambiente. Definida como a **temperatura máxima de projeto** para o pior cenário ( $32^\circ C$ ).
- `U_value`: Coeficiente Global de Transferência de Calor ( $W/(m^2 \cdot K)$ ).
- `m_dot_a`: Vazão mássica do ar (kg/s). Se não fornecida, é calculada internamente.

## 1.2 Saídas Esperadas do Programa (Outputs)

O programa retorna um dicionário com as seguintes estimativas de dimensionamento:

- $Q\_dot\_kW$ : Carga térmica a ser removida do gás (kW).
- $Area\_m2\_Design$ : Área de transferência de calor mínima necessária ( $m^2$ ).
- $W\_fan\_kW\_Design$ : Potência elétrica máxima consumida pelo ventilador (kW).
- $T\_a\_out\_C$ : Temperatura de saída do ar de resfriamento ( $^{\circ}C$ ).
- $LMTD\_C$ : Diferença de Temperatura Média Logarítmica Corrigida ( $^{\circ}C$ ).

## 2 Cálculos Fundamentais Realizados

O modelo segue as equações clássicas da engenharia de calor para dimensionamento de trocadores.

### 2.1 Carga de Calor ( $\dot{Q}$ )

A carga térmica removida do gás é dada pela termodinâmica dos fluidos:

$$\dot{Q} = \dot{m}_g \cdot c_{p,g} \cdot (T_{g,in} - T_{g,out})$$

Onde  $c_{p,g}$  é o calor específico do gás a pressão constante.

### 2.2 Diferença de Temperatura Média Logarítmica (LMTD)

O LMTD ( $\Delta T_{ml}$ ) é crucial para representar a força motriz média da transferência de calor:

$$\Delta T_{ml} = F \cdot \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

Onde  $\Delta T_1 = T_{g,in} - T_{a,out}$  e  $\Delta T_2 = T_{g,out} - T_{a,in}$  (para contracorrente), e  $F$  é o fator de correção.

### 2.3 Área de Transferência de Calor ( $A$ )

A área de transferência é calculada pela equação fundamental dos trocadores de calor, permitindo o dimensionamento do equipamento:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{ml}}$$

### 2.4 Potência do Ventilador ( $\dot{W}_{fan}$ )

O gasto energético do *dry cooler* é dominado pela potência elétrica do ventilador, calculada a partir da vazão volumétrica do ar ( $\dot{V}_a$ ) e da queda de pressão do ar ( $\Delta P_a$ ):

$$\dot{W}_{fan} = \frac{\dot{V}_a \cdot \Delta P_a}{\eta_{fan}}$$

Onde  $\eta_{fan}$  é a eficiência do ventilador e  $\dot{V}_a = \dot{m}_a / \rho_a$ .

## 3 Decisões de Projeto e Análise da Queda de Pressão

### 3.1 Análise de Queda de Pressão ( $\Delta P$ )

A queda de pressão em um trocador de calor tem impacto direto no gasto energético e, em menor grau, na termodinâmica do processo.

- **Lado do Gás ( $\text{H}_2$  ou  $\text{O}_2$  a 40 bar):** A queda de pressão do gás ( $\Delta P_{gs}$ ) através dos tubos é tipicamente **insignificante** do ponto de vista energético ( $\dot{W} \approx \dot{V}_{gs} \Delta P_{gs}$ ) devido à pressão de operação extremamente alta (40 bar). Qualquer perda de pressão dentro do *dry cooler* é minúscula comparada à pressão absoluta. Portanto, a modelagem **não precisa** incluir o cálculo da queda de pressão do gás para fins de estimativa de potência. O impacto na termodinâmica (propriedades  $c_p$ ) é igualmente desprezível.
- **Lado do Ar ( $\Delta P_{ar}$ ):** A queda de pressão do ar ( $\Delta P_{ar}$ ) sobre o feixe de tubos e aletas é **fundamental**. É o parâmetro primário, juntamente com a vazão volumétrica do ar ( $\dot{V}_a$ ), que define a **potência máxima do ventilador** ( $\dot{W}_{fan}$ ). Desta forma, o cálculo do gasto energético **depende diretamente** de uma estimativa precisa para  $\Delta P_{ar}$ . No modelo, este valor é estimado (500 Pa) com base em referências para baterias de aletas.

### 3.2 Modelo de Trocador Escolhido

O modelo adotado é o **Trocador de Casco e Tubos Aletados (Finned Tube)**, operando em configuração de **Fluxo Cruzado**.

- **Justificativa:** Este tipo é o padrão para *dry coolers* devido à sua robustez, capacidade de operar com fluidos de alta pressão (o gás vai por dentro dos tubos) e a eficiência na troca de calor com ar, graças ao uso extensivo de aletas, que compensam o baixo coeficiente de transferência de calor do ar.

### 3.3 Valores de Referência e Pior Cenário

#### 3.3.1 Temperatura de Projeto ( $T_{a,in}$ )

Para o dimensionamento na localização em Enschede (Países Baixos), o valor de  $T_{a,in} = 32^\circ\text{C}$  é adotado.

- **Justificativa:** Este valor representa uma temperatura ambiente próxima ao pico de verão (pior cenário). O equipamento é dimensionado para cumprir a meta ( $T_{g,out}$ ) sob as condições mais difíceis, garantindo a operação nos dias mais quentes.

#### 3.3.2 Calores Específicos e Parâmetros Físicos

Valores de calores específicos ( $c_p$ ) e densidade do ar ( $\rho_a$ ) são utilizados como referências preliminares:

- $c_{p,\text{H}_2} = 14300 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $c_{p,\text{O}_2} = 918 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $c_{p,ar} = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

### 3.4 Coeficiente Global de Transferência de Calor ( $U$ )

O coeficiente  $U$  é o parâmetro mais crítico e dependente do projeto físico:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(hA)_{gs}} + \frac{1}{(hA)_{metal}} + \frac{1}{(hA)_{ar}} + R_{fouling}$$

- **Importância:** Ele representa a resistência total à transferência de calor. No caso de um *dry cooler*, a resistência do lado do ar (com baixo coeficiente de convecção,  $h_{ar}$ ) é dominante, mesmo com as aletas.
- **Dependência e Obtenção:** Depende diretamente da geometria (diâmetro do tubo, altura e espaçamento da aleta), materiais, e das vazões e propriedades dos fluidos. O valor utilizado no modelo ( $U = 35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) é um valor de referência tipicamente baixo para trocadores gás-ar aletados. Para valores de projeto precisos, são necessárias correlações específicas (ex: Colburn, Sieder-Tate) ou dados de fornecedores.

### 3.5 Fator de Correção do LMTD ( $F$ )

- **Importância:** O fator  $F$  corrige o LMTD calculado para contracorrente ideal, adaptando-o para a configuração geométrica real (Fluxo Cruzado, Múltiplos *Passes*).
- **Dependência e Obtenção:** Depende das razões de capacidade térmica do fluido quente ( $R$ ) e de efetividade de temperatura ( $P$ ). É tipicamente obtido através de gráficos de projeto ou correlações para o arranjo de fluxo cruzado específico. O valor de  $F = 0.85$  é uma estimativa inicial para um arranjo comum de *dry cooler*.