

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°C).
- `T_g_out`: Temperatura de saída desejada do gás (40°C ou 30°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°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 (ΔT_{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 (ΔP_a):

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

Onde η_{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 (ΔP)

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 (H₂ ou O₂ a 40 bar):** A queda de pressão do gás (ΔP_{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 (ΔP_{ar}):** A queda de pressão do ar (ΔP_{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 ΔP_{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 (ρ_a) são utilizados como referências preliminares:

- $c_{p,H_2} = 14300 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $c_{p,O_2} = 918 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $c_{p,ar} = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

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*.