

Relatório Técnico de Dimensionamento Preliminar de Dry Cooler

Sistema: Resfriamento de Correntes Gasosas (H_2 e O_2) de Eletrolisador PEM (5 MW)

November 28, 2025

1 Introdução e Hipóteses de Dimensionamento

Este relatório detalha o dimensionamento preliminar de dois Dry Coolers (Resfriadores a Ar) destinados ao resfriamento das correntes de Hidrogênio (H_2) e Oxigênio (O_2) que saem de um eletrolisador PEM de 5 MW. O dimensionamento tem como objetivo calcular a **Área Mínima de Troca Térmica** e a **Potência Máxima do Ventilador** necessárias para operar sob as condições mais críticas (pior cenário).

1.1 Hipóteses Fundamentais

As seguintes hipóteses foram adotadas para a simplificação e execução do dimensionamento:

- **Modelo Termodinâmico:** Os gases (H_2 e O_2) são tratados como fluidos com propriedades de calor específico (c_p) constantes, avaliadas em condições médias de pressão (40 bar) e temperatura (80°C).
- **Fluxo:** O trocador opera em regime de **Fluxo Cruzado**.
- **Perdas de Pressão:** A queda de pressão no lado do gás (ΔP_{gs}) é **desprezível** devido à alta pressão absoluta (40 bar). A queda de pressão no lado do ar (ΔP_{ar}) é utilizada apenas para o cálculo da potência do ventilador.

2 Definição do Pior Cenário

O dimensionamento é regido pelas condições que impõem a maior dificuldade ao sistema de resfriamento, ou seja, a **máxima carga térmica** (\dot{Q}) e a **menor força motriz térmica** (ΔT).

2.1 Pior Cenário de Vazão (Carga Térmica Máxima)

A máxima carga térmica (\dot{Q}_{max}) ocorre quando o eletrolisador opera em sua capacidade máxima de produção:

- **Potência Elétrica Máxima** (P_{el}): 5.0 MW.
- **Máxima Eficiência** ($E_{spec,min}$): 56.18 kWh/kg_{H2}.

A vazão mássica máxima de H₂ (\dot{m}_{H_2}) é calculada por:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{P_{el}}{E_{spec,min}}$$

1. Conversão de Unidades: $E_{spec,min} \approx 202,248 \text{ kJ/kg}_{H_2}$.
2. Cálculo da Vazão: $\dot{m}_{H_2} \approx \mathbf{0.02472 \text{ kg/s}}$.
3. Vazão de Oxigênio: A vazão de O₂ é calculada estequiométricamente ($\dot{m}_{O_2} \approx 8 \times \dot{m}_{H_2} \approx \mathbf{0.19778 \text{ kg/s}}$).

2.2 Pior Cenário Térmico (Força Motriz Mínima)

- **Temperatura de Entrada do Gás (T_{g,in})**: Adotada a temperatura máxima de operação do PEM: **80°C**.
- **Temperatura de Entrada do Ar (T_{a,in})**: Adotada a temperatura ambiente de pico de projeto (pior cenário para a troca de calor) para Enschede: **32°C**.
- **Meta de Resfriamento (T_{g,out})**: Temperatura de saída desejada: **40°C**.

3 Cálculos e Equações Fundamentais

O dimensionamento é baseado na equação fundamental de transferência de calor em trocadores.

3.1 Carga Térmica (\dot{Q})

O calor a ser removido de cada gás é o principal fator de dimensionamento:

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

3.2 Área Mínima de Troca Térmica (A)

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

Onde U é o Coeficiente Global de Transfência de Calor e ΔT_{ml} é a Diferença de Temperatura Média Logarítmica corrigida (LMTD).

3.3 Potência Máxima do Ventilador (\dot{W}_{fan})

A potência consumida pelo ventilador (gasto energético operacional) é determinada pela vazão volumétrica do ar (\dot{V}_a) e a queda de pressão do ar (ΔP_a):

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

4 Escolha e Justificativa do Dry Cooler

O modelo de Dry Cooler escolhido para esta aplicação é o **Trocador de Casco e Tubos Aletados (Finned Tube)**.

4.1 Justificativa da Escolha

O principal motivo da escolha é a necessidade de operar com gases a **40 bar** e a baixa eficiência natural da transferência de calor para o ar.

- **Segurança e Pressão:** A geometria de tubos garante a contenção segura do fluido de processo de alta pressão.
- **Otimização do Lado do Ar:** As aletas aumentam a área superficial no lado do ar, compensando o baixo coeficiente de convecção do ar e tornando o resfriamento a ar viável.

4.2 Comparaçāo com Alternativa (PFHE)

A escolha impacta diretamente os parâmetros de projeto U e ΔP_a utilizados no modelo:

Table 1: Comparação de Tipos de Trocadores para Aplicação Gás-Ar

Os valores de referência $U = 35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e $\Delta P_a = 500 \text{ Pa}$ foram adotados.

5 Resultados de Dimensionamento

Os resultados abaixo representam os requisitos mínimos de projeto para que os Dry Coolers atinjam a meta de **40°C** sob o pior cenário térmico ($T_{a,in} = 32^\circ\text{C}$), utilizando os parâmetros de projeto definidos.

Table 2: Resultados do Dimensionamento (Pior Cenário)

Parâmetros de Saída	Hidrogênio (H_2)	Oxigênio (O_2)
Modelo Dry Cooler	Casco e Tubos Aletados (Fluxo Cruzado)	Casco e Tubos Aletados (Fluxo Cruzado)
Vazão Mássica (kg/s)	0.02472	0.19778
Carga Térmica (kW)	14.14	7.26
Área Mínima (A) (m^2)	29.77	15.29
Potência Máx. Fan (kW)	0.471	0.242
Coef. Global U ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)	35	35
Queda de Pressão Ar (Pa)	500	500