

Relatório Técnico: Modelagem de Desempenho de Dry Cooler (Método $\epsilon - \text{NTU}$)

Baseado no Dimensionamento de 5 MW PEM

November 28, 2025

1 Introdução e Objetivo

Este relatório detalha a modelagem do desempenho térmico dos Dry Coolers, utilizando o método da **Eficácia (ϵ) - NTU (Número de Unidades de Transferência)**. O objetivo é prever a **Temperatura de Saída do Gás ($T_{g,out}$)** sob condições operacionais variáveis (temperatura ambiente e vazão de ar), tomando como base a Área de Troca Térmica dimensionada no relatório anterior.

1.1 Dados de Entrada Fixos (Dimensionados)

Os seguintes parâmetros, provenientes da etapa de dimensionamento no pior cenário ($T_{a,in} = 32^\circ\text{C}$, $T_{g,out} = 40^\circ\text{C}$), são tratados como fixos na modelagem:

- **Área Mínima de Projeto (A):** $\text{H}_2 : 29.77 \text{ m}^2 \mid \text{O}_2 : 15.29 \text{ m}^2$.
- **Coefficiente Global (U):** $35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.
- **Vazão Mássica do Gás (\dot{m}_g):** $\text{H}_2 : 0.02472 \text{ kg/s} \mid \text{O}_2 : 0.19778 \text{ kg/s}$.
- **Temperatura de Entrada ($T_{g,in}$):** 80°C .

2 Metodologia: Método $\epsilon - \text{NTU}$

O método $\epsilon - \text{NTU}$ é empregado quando o desempenho do trocador é o foco da análise (cálculo de T_{out}) e a geometria (A e U) é conhecida.

2.1 Cálculo do Número de Unidades de Transferência (NTU)

O NTU é um parâmetro adimensional que representa o tamanho térmico do trocador. É calculado pela razão entre a taxa de condução total (resistência do trocador) e a capacidade térmica mínima (C_{min}).

$$\text{NTU} = \frac{U \cdot A}{C_{min}}$$

Onde $C = \dot{m} \cdot c_p$ é a capacidade térmica do fluido, e $C_{min} = \min(C_{gs}, C_{ar})$.

2.2 Cálculo da Razão de Capacidade (R)

A razão de capacidade é a relação entre as capacidades térmicas mínima e máxima:

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

2.3 Cálculo da Eficácia (ϵ)

A eficácia (ϵ) é a razão entre a transferência de calor real (\dot{Q}_{real}) e a máxima termodinamicamente possível (\dot{Q}_{max}). Para o trocador de **Fluxo Cruzado**, utiliza-se uma aproximação conservadora (fórmula de Contracorrente), que é robusta para simulações:

$$\epsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - Re^{-NTU(1-R)}}$$

2.4 Cálculo da Temperatura de Saída do Gás ($T_{g,out}$)

A taxa de transferência de calor real (\dot{Q}_{real}) é obtida pela eficácia e a taxa máxima:

$$\dot{Q}_{real} = \epsilon \cdot \dot{Q}_{max} = \epsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{g,in} - T_{a,in})$$

A temperatura de saída do gás é então determinada pela equação de balanço de energia no lado do gás:

$$T_{g,out} = T_{g,in} - \frac{\dot{Q}_{real}}{C_{gs}}$$

3 Cenários de Simulação e Resultados

Foram simulados dois cenários operacionais para avaliar o desempenho dos trocadores em dias frios ($T_{a,in} = 20^\circ\text{C}$), comparando a operação com vazão de ar total (100%) e vazão de ar reduzida (50%), visando economia de energia.

3.1 1. Modelagem: Dia Frio (20°C) - Vazão de Ar Total (100%)

Neste cenário, a vazão mássica de ar é mantida na vazão de projeto.

3.2 2. Modelagem: Dia Frio (20°C) - Vazão de Ar Reduzida (50%)

Neste cenário, a vazão mássica de ar é reduzida à metade (50%), visando diminuir o consumo de energia do ventilador.

Table 1: Resultados da Modelagem - Vazão de Ar 100%

Parâmetros de Saída	Hidrogênio (H ₂)	Oxigênio (O ₂)
Área Utilizada (m ²)	29.77	15.29
T Entrada Ar Op. (°C)	20	20
Vazão Mássica Gás (kg/s)	0.02472	0.19778
Vazão Ar Op. (kg/s)	0.704	0.361
NTU	0.05	0.05
Eficácia (ϵ)	0.05	0.05
T Saída Gás (T_{g,out}) (°C)	77.29	68.31
Q Real (kW)	1.52	3.70

Table 2: Resultados da Modelagem - Vazão de Ar 50%

Parâmetros de Saída	Hidrogênio (H ₂)	Oxigênio (O ₂)
Área Utilizada (m ²)	29.77	15.29
T Entrada Ar Op. (°C)	20	20
Vazão Mássica Gás (kg/s)	0.02472	0.19778
Vazão Ar Op. (kg/s)	0.352	0.180
NTU	0.10	0.10
Eficácia (ϵ)	0.09	0.09
T Saída Gás (T_{g,out}) (°C)	75.32	62.58
Q Real (kW)	2.77	5.53