

Relatório Técnico de Otimização Operacional: Coalescedor vs. Adsorção (TSA/PSA)

Análise de Engenharia de Processos para Purificação de H₂

November 29, 2025

1 Introdução e Objetivo

Este relatório tem como objetivo principal analisar o **custo-benefício operacional** e a **sequência de tratamento** mais eficaz para sistemas de purificação de hidrogênio (H₂) de alta pureza (Classe $\geq 99.999\%$), tipicamente produzidos por eletrólise (PEM ou SOEC). A análise se concentra na relação crítica entre o pré-tratamento (Coalescedor Fibroso) e a purificação final por Adsorção (TSA/PSA).

2 Justificativa Técnica e Seleção do Coalescedor

Devido ao fato de o fluxo de H₂ ter passado por separação primária (Knock-Out Drum) e resfriamento (Chiller), a principal impureza líquida remanescente é a **névoa fina e aerossóis** ($\leq 5 \mu\text{m}$).

O modelo recomendado é o **Coalescedor Fibroso de Cartucho de Alta Eficiência** (remoção de $\leq 0.1 \mu\text{m}$), pois é o único capaz de remover microgotículas de água em níveis exigidos para proteger os leitos adsorventes.

2.1 1. Análise de Custo-Benefício: Coalescedor vs. TSA

A otimização de custos em um sistema de purificação de alta pureza deve sempre priorizar a **proteção do equipamento mais caro e difícil de substituir** no *downstream*.

Table 1: Comparativo de Custos e Consequências de Falha no Sistema de Purificação

Fator Custo	de Coalescedor de Cartucho (Filtro)	TSA / PSA (Leitos Adsorventes)
Custo de Troca	Baixo (Custo do cartucho).	Muito Alto (Custo de adsorventes, como peneiras moleculares, e engenharia).
Ação de Manutenção	Troca rápida, rotineira e planejada.	Parada longa para recarga e reativação.

Fim da Tabela

...continuação da Tabela 1 ...

Fator Custo	de Coalescedor de Cartucho (Filtro)	TSA / PSA Adsorventes)	(Leitos
Impacto de Falha	Aumento da ΔP e potencial contaminação de curto prazo.	Dano Irreversível (Cegamento do leito por líquido/sólidos), exigindo recarga total ou perda de eficiência.	
Prioridade Operacional	Sacrifício Planejado: Atua como um consumível para proteger o investimento maior.	Ativo de Alto Valor: Deve ser protegido por um pré-filtro (coalescedor).	
Conclusão: O custo-benefício pende fortemente para a proteção dos leitos adsorventes. A troca mais frequente e barata do coalescedor garante a longevidade e a eficiência máxima do TSA/PSA.			

Fim da Tabela

3 Sequência de Processo e Purificação Final

3.1 2. Sequência de Tratamento (H_2 Saturado)

O coalescedor de alta eficiência é o **estágio final de pré-tratamento** e prepara o gás para a purificação em nível molecular.

Após o coalescedor fibroso ($\leq 0.1 \mu m$), o fluxo de gás pode ser levado **diretamente** para a unidade de adsorção (TSA/PSA).

- **Função do Coalescedor:** Garante que o gás esteja **livre** de contaminantes em **fase líquida** (aerossóis) e **fase sólida** (particulados).
- **Função do TSA/PSA:** Remove os contaminantes em **fase gasosa** (H_2O vapor residual, CO_2 , N_2), atingindo a pureza final de ppb (partes por bilhão).

3.2 3. Escolha do Método de Adsorção (TSA vs. PSA)

A seleção do método de adsorção é ditada pelo principal contaminante a ser removido para atingir o ponto de orvalho de célula a combustível.

Table 2: Comparativo entre Métodos de Adsorção para Purificação Final de H₂

Característica	PSA (Adsorção por Pressão)	TSA (Adsorção por Temperatura)
Mecanismo Regeneração	de Variação de Pressão (Despressurização).	Variação de Temperatura (Aquecimento e Resfriamento).
Afinidade Remoção	de Impurezas de Baixa Afinidade (ex: N ₂ , O ₂ , CH ₄).	Impurezas de Alta Afinidade (H ₂ O vapor, CO ₂).
Ideal para Eletrólise	H ₂ Remoção de impurezas gasosas leves.	Remoção de Vestígios Profundos de Água (secagem intensa).
Recomendação	Solução de purificação completa e versátil.	Altamente eficaz para atingir o ponto de orvalho ultra-baixo exigido por Células a Combustível.

Fim da Tabela