

## DESEMPENHO E APLICAÇÕES DOS PROCESSOS DE ADSORÇÃO POR OSCILAÇÃO DE PRESSÃO E TEMPERATURA NA SEPARAÇÃO DE GASES

**ANA CLARA MARINS MENDES**<sup>1</sup>; Rubiane Buchweitz Fick<sup>2</sup>; Rafael Miritz Bartz<sup>3</sup>;  
Daniele Martin Sampaio<sup>4</sup>; Jéssica Torres dos Santos<sup>5</sup>; MAURIZIO SILVEIRA  
QUADRO<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas 1 – [anaclaramarinsmendes@gmail.com](mailto:anaclaramarinsmendes@gmail.com) 1

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas 2 – [rubianebfick1@gmail.com](mailto:rubianebfick1@gmail.com) 2

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas 3 – [rafaelmiritz@gmail.com](mailto:rafaelmiritz@gmail.com) 3

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas 4 – [daniele.sampaio@ufpel.edu.br](mailto:daniele.sampaio@ufpel.edu.br) 4

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas 5 – [jessica\\_jesantos@hotmail.com](mailto:jessica_jesantos@hotmail.com) 5

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas 6 – [mausq@hotmail.com](mailto:mausq@hotmail.com) 6

### 1. DESCRIÇÃO DA INOVAÇÃO

A separação e purificação de gases são etapas fundamentais nos processos industriais, particularmente na captura de CO<sub>2</sub> e na produção de hidrogênio puro. Dentre as tecnologias mais relevantes, destacam-se a Adsorção por Oscilação de Pressão (PSA - *Pressure Swing Adsorption*) e a Adsorção por Oscilação de Temperatura (TSA - *Temperature Swing Adsorption*), técnicas que empregam materiais adsorventes que eliminam impurezas de forma seletiva e asseguram maior eficácia nos processos (GOLMAKANI, 2017). Importantes para o desenvolvimento de soluções energéticas mais limpas e sustentáveis, esses sistemas são amplamente utilizados em refinarias e em tecnologias emergentes de captura de carbono (ELFVING, 2017).

A principal diferença entre PSA e TSA está no processo de regeneração do adsorvente: o PSA utiliza variações de pressão, enquanto o TSA usa oscilações de temperatura. Essa diferença afetafatores como tempo de ciclo, eficiência energética e adequação ao tipo de mistura gasosa a ser processada. De acordo com RIBOLDI (2017), o PSA oferece benefícios em processos que exigem regeneração rápida, enquanto o TSA pode ser mais eficaz em aplicações de longo prazo, com menor degradação do adsorvente (FAKHROLESLAM, 2016).

Nesse contexto, a inovação tecnológica se concentra na otimização de materiais adsorventes, como zeólitas, carvões ativados e MOFs (Metal-Organic Frameworks), para aumentar a eficiência na captura e diminuir os custos operacionais. Revisões recentes indicam que a combinação dessas tecnologias com adsorventes de última geração melhora consideravelmente o desempenho, tornando os processos de PSA e TSA competitivos em relação a outras metodologias de captura de carbono (KONG, 2024). Comparar esses métodos permite identificar suas capacidades, limitações e aplicações mais promissoras na indústria atual.

### 2. ANÁLISE DE MERCADO

As tecnologias de separação por adsorção, PSA e TSA, beneficiam setores que demandam gases de alta pureza, como saúde, biotecnologia, refino de petróleo e captura de carbono (RIBOLDI, 2017). Produtores de microalgas e fornecedores de gases industriais são particularmente favorecidos, pois necessitam de CO<sub>2</sub> concentrado e gases purificados em grande escala (FAKHROLESLAM, 2016). Esses segmentos têm demandas particulares ligadas à confiabilidade na entrega,

qualidade consistente do produto e redução de custos, fatores que são diretamente atendidos pelos processos.

Comparadas a métodos tradicionais como absorção química e processos criogênicos, que apresentam altos custos energéticos e complexidade operacional, PSA e TSA oferecem vantagens significativas em eficiência e sustentabilidade (ELFVING, 2017). Nesse contexto, o PSA e o TSA se sobressaem por serem soluções mais limpas, versáteis e de fácil integração, além de proporcionarem flexibilidade para atender tanto operações menores quanto demandas industriais de grande escala.

O mercado para essas tecnologias tem um grande potencial de crescimento, impulsionado pela expansão de setores estratégicos, como saúde, biotecnologia, refino de petróleo e captura de carbono. A demanda crescente por gases de alta pureza, motivada pela transição energética global e pela busca por processos mais sustentáveis, fortalece a atratividade dos sistemas de adsorção. Simultaneamente, os avanços no desenvolvimento de adsorventes, como zeólitas, carvões ativados e MOFs, aumentam a eficiência da captura e reduzem os gastos operacionais, consolidando a competitividade dessas alternativas (KONG, 2024).

Nesse cenário, a análise de mercado revela que as tecnologias PSA e o TSA oferecem vantagens em relação aos métodos concorrentes: menor consumo de energia no PSA, maior durabilidade dos adsorventes no TSA e ambos demonstram flexibilidade de uso em diversos segmentos (ELFVING, 2017). Essas características estratégicas ampliam o *Total Addressable Market* (TAM) ao atender setores que com alta demanda volumétrica de gases, reforçam o *Serviceable Available Market* (SAM), particularmente entre produtores de gases e empresas de biotecnologia, e consolidam o *Serviceable Obtainable Market* (SOM), assegurando um espaço competitivo sustentável para o desenvolvimento dessas tecnologias no médio e longo prazo (KONG, 2024).

### 3. ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

O modelo de negócios as tecnologias PSA e TSA baseia-se na geração de lucros por meio do fornecimento de gases de alta pureza para diversos setores. A ideia é vender oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono purificados por meio de um sistema de produção contínua, com preços competitivos em comparação com fornecedores tradicionais (GOLMAKANI, 2017). A estratégia de distribuição inclui tanto o fornecimento direto em cilindros para atender às necessidades hospitalares e laboratoriais quanto a instalação de unidades modulares em empresas de biotecnologia e refino, o que possibilita uma maior proximidade com o cliente final. Ademais, colaborações estratégicas com produtores de microalgas e indústrias que necessitam de insumos energéticos limpos podem expandir o impacto e fortalecer a inovação no setor (KONG, 2024).

Em termos de propriedade intelectual, a inovação ainda não tem um registro formal, mas a possibilidade de patente surge com o avanço dos sistemas modulares. Além de atrair investidores e parceiros interessados em expandir a aplicação comercial dos processos de PSA e TSA em novos setores, o registro da tecnologia é fundamental para proteger o mercado.

No que diz respeito à maturidade tecnológica (*Technology Readiness Level - TRL*), a inovação está no nível 4 (EMBRAPA, 2025), com protótipos laboratoriais e testes preliminares de campo. No entanto, ainda é necessário escalonar e validar em um ambiente industrial. Essa fase é crucial para validar em ambiente industrial

a viabilidade técnica e financeira do sistema, bem como para fornecer informações confiáveis para futuras colaborações comerciais.

Entre os principais desafios identificados, destacam-se o custo inicial elevado para implementação dos sistemas, a necessidade de otimizar os ciclos de adsorção para diferentes misturas gasosas e a concorrência com métodos já consolidados. Além disso, há riscos relacionados à durabilidade dos adsorventes em operação contínua e à adaptação às normas de segurança aplicáveis, especialmente no setor hospitalar (ELFVING, 2017). Para mitigar esses riscos, a estratégia envolve investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, seleção criteriosa de materiais adsorventes, realização de parcerias institucionais para validar os sistemas e criação de um plano de manutenção preventiva que assegure confiabilidade e longevidade da tecnologia (BASHIR, 2025).

#### 4. RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTO

A implementação combinada dos métodos PSA e TSA apresenta potencial significativo para contribuir tanto no âmbito ambiental quanto social. Ao otimizar a captura de CO<sub>2</sub> proveniente de processos industriais e do ar ambiente, essa tecnologia favorece a mitigação de emissões e pode ser integrada à produção de microalgas, que utilizam o CO<sub>2</sub> como insumo essencial (RIBOLDI, 2017). Além disso, possibilita a separação eficiente de gases de interesse, como oxigênio e nitrogênio, atendendo demandas hospitalares e industriais. Essa versatilidade amplia os benefícios sociais e econômicos ao mesmo tempo em que fortalece as vias de descarbonização e sustentabilidade (SIFAT, 2019).

Do ponto de vista financeiro, espera-se que a tecnologia apresente retorno positivo a médio prazo, considerando o aumento da demanda por tecnologias de captura de carbono e sua aplicabilidade em diferentes setores. Inicialmente, os investimentos serão direcionados à consolidação dos sistemas, aquisição de adsorventes e otimização de processos, mas espera-se que a ampliação da escala promova a redução dos custos operacionais e aumente a margem de lucro. Ademais, a incorporação progressiva da tecnologia em setores estratégicos tende a consolidar novas fontes de receita e ampliar o alcance comercial.

Em perspectiva de futuro, a convergência dos processos PSA e TSA representa uma oportunidade de desenvolvimento contínuo e expansão para diferentes segmentos (PAHINKAR, 2017). Essa sinergia possibilitará o aumento da eficiência de captura, a adaptação a distintos fluxos gasosos e a implementação em larga escala tanto para aplicações industriais quanto ambientais. Assim, a inovação tende a se consolidar como uma solução versátil e escalável, capaz de atender às crescentes exigências regulatórias e contribuir para metas globais de neutralidade de carbono.

#### 5. CONCLUSÕES

Portanto, a inovação baseada na integração dos processos PSA e TSA demonstra um potencial expressivo para aprimorar a captura e a separação de gases, com destaque para o dióxido de carbono, atendendo tanto às demandas ambientais quanto às industriais. Os resultados esperados incluem maior eficiência operacional, redução de emissões e aplicação versátil, que vai desde a produção de microalgas até o fornecimento de gases puros para setores hospitalares e industriais. Além disso, o desenvolvimento tecnológico, apoiado por pesquisas

recentes (BASHIR, 2025), reforça a viabilidade da implementação em diferentes escalas.

Nesse contexto, torna-se essencial a participação ativa de investidores, instituições de pesquisa e parceiros estratégicos para impulsionar as próximas etapas, que incluem ampliação de testes em campo, registro de propriedade intelectual e expansão para novos mercados (SIFAT, 2019). A colaboração entre esses agentes pode acelerar a transição dessa tecnologia para aplicações comerciais e ambientais em larga escala, contribuindo para a sustentabilidade, a inovação industrial e o cumprimento das metas de redução de carbono.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASHIR, F.I.; ARENDSEN, B.J.C.P.; BOCKEN, J.H.M.; BEZEM, G.M.W.; VAN DER BERG, H.E.; VERBRAAK, F.D.M. *Performance and Cost Analysis of Pressure Swing Adsorption for Recovery of H<sub>2</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> from Steelworks Off-Gases*. **Energies**, v. 18, n. 10, p. 2440, 2025.

ELFVING, J.; STÅLNACKE, J.O.; SKAUGEN, E.; STÅLNACKE, B.J.H.; OLSEN, S.O.; THEISEN, H.G. *Modelling of equilibrium working capacity of PSA, TSA and TVSA processes for CO<sub>2</sub> adsorption under direct air capture conditions*. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 22, p. 270-277, 2017.

EMBRAPA. **Escala dos níveis de maturidade tecnológica TRL/MRL**. Acessado em 20 jul. 2025. Online. Disponível em: <https://www.embrapa.br/escala-dos-niveis-de-maturidade-tecnologica-trl-mrl>.

FAKHROLESLAM, M.; FATEMI, S. *Comparative simulation study of PSA, VSA, and TSA processes for purification of methane from CO<sub>2</sub> via SAPO-34 core-shell adsorbent*. **Separation Science and Technology**, v. 51, n. 14, p. 2326-2338, 2016.

GOLMAKANI, A.; FATEMI, S.; TAMNANLOO, J. *Investigating PSA, VSA, and TSA methods in SMR unit of refineries for hydrogen production with fuel cell specification*. **Separation and Purification Technology**, v. 176, p. 73-91, 2017.

KONG, M.; TANG, Y.J.; ZHANG, G.Y.; TANG, M.G.; SUN, Y.; HUANG, C.; PENG, D.P.; WU, H.T. *A review on development of post-combustion CO<sub>2</sub> capture technologies: Performance of carbon-based, zeolites and MOFs adsorbents*. **Fuel**, v. 371, p. 132103, 2024.

PAHINKAR, Darshan G.; GARIMELLA, Srinivas; ROBBINS, Thomas R. *Feasibility of Temperature Swing Adsorption in Adsorbent-Coated Microchannels for Natural Gas Purification*. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 56, n. 18, p. 5403–5416, 2017.

RIBOLDI, Luca; BOLLAND, Olav. *Overview on pressure swing adsorption (PSA) as CO<sub>2</sub> capture technology: state-of-the-art, limits and potentials*. **Energy Procedia**, v. 114, p. 2390-2400, 2017.

SIFAT, Najmus S.; HASELI, Yousef. *A critical review of CO<sub>2</sub> capture technologies and prospects for clean power generation*. **Energies**, v. 12, n. 21, p. 4143, 2019.