



UNIVERSIDADE FRANCISCANA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
ÁREA DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
Programa de Pós-Graduação em Nanociências

VINÍCIUS RODRIGUES OVIEDO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA NANOZEÓLITA
HIERÁRQUICA UTILIZANDO NANOCELULOSE BACTERIANA COMO
TEMPLATE**

Santa Maria, RS

2025

VINÍCIUS RODRIGUES OVIEDO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA NANOZEÓLITA
HIERÁRQUICA UTILIZANDO NANOCELULOSE BACTERIANA COMO
TEMPLATE**

Pré-projeto de Doutorado apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em Nanociências
da Universidade Franciscana para fins de
seleção.

Orientador: Prof. Dr. **WILLIAM LEONARDO DA SILVA**

Santa Maria, RS

2025

RESUMO

O oxigênio é fundamental no atendimento médico, sendo indispensável para tratamentos diversos em estabelecimentos assistenciais de saúde. Apesar da abundância do oxigênio na atmosfera, sua aplicação médica exige purificação para garantir alta qualidade e segurança. Tecnologias baseadas no processo de adsorção por alternância de pressão (PSA) tornaram-se estratégicas por permitir a produção local de oxigênio com concentrações típicas entre 93 e 95%, por meio da separação do nitrogênio do ar ambiente. Zeólitas convencionais, como as 13X e 5A, são os adsorventes mais utilizados nesses sistemas, mas apresentam limitações relacionadas à saturação, necessidade de substituição e restrições difusionais inerentes à sua micro-porosidade, impactando a eficiência em ciclos prolongados e demandas elevadas. Recentemente, o avanço na nanociência tem possibilitado o desenvolvimento de materiais como zeólitas hierárquicas e nanozeólitas, que apresentam porosidade otimizada, maior acessibilidade e melhor regeneração, favorecendo o desempenho em processos de PSA. Paralelamente, a produção de *kombucha* tem gerado membranas de nanocelulose bacteriana (NCB) como subproduto, material que pode ser aproveitado como *template* para síntese de nanozeólitas hierárquicas, oferecendo uma alternativa sustentável e inovadora. Diante disso, este projeto propõe a produção de NCB a partir de resíduos da fermentação da *kombucha* e sua aplicação como *template* para a síntese de nanozeólitas, visando a obtenção de matérias-primas ecológicas e alternativas para processos de PSA voltados à geração de oxigênio medicinal, aliando sustentabilidade, inovação e aprimoramento tecnológico.

Palavras-chave: nanozeólitas hierárquicas, nanocelulose bacteriana, *Pressure Swing Adsorption*, nanotecnologia verde, reaproveitamento de resíduos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3 METODOLOGIA.....	10
4 INTERDISCIPLINARIEDADE DO PROJETO.....	11
5 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	12
6 ORÇAMENTO	13
7 TERMO DE COMPROMISSO PARA DEDICAÇÃO AO CURSO.....	14

1 INTRODUÇÃO

Dentre os principais gases medicinais, o oxigênio é um insumo primordial em um estabelecimento assistencial de saúde (EAS), seja para manutenção da vida ou para o tratamento de condições agudas e crônicas (GRAHAM *et al.*, 2025). Apesar de se tratar de um recurso abundante na atmosfera, o oxigênio necessita passar por um processo de purificação para aplicações médicas (TARIQ *et al.*, 2024). A partir da pandemia de COVID-19, evidenciou-se ainda mais a importância do fornecimento de oxigênio medicinal com alta qualidade e de maneira contínua em EAS (ISMAIL; BANSAL, 2022).

Com o intuito de mitigar riscos de desabastecimento, tecnologias como as usinas concentradoras de oxigênio baseadas em processos de adsorção por alternância de pressão (PSA, do inglês *Pressure Swing Adsorption*) tornaram-se soluções estratégicas para a obtenção de oxigênio com concentrações típicas entre 93 e 95% (SI *et al.*, 2025). Esse processo consiste em separar o oxigênio do ar atmosférico a partir da adsorção do nitrogênio, já que a composição se dá por 78% nitrogênio, 21% oxigênio e 1% de outros gases.

As zeólitas (aluminossilicatos cristalinos), como a 13X e 5A, são tidos como os principais adsorventes empregados em sistemas de separação de oxigênio por PSA (FALKOWASKA; ROEBUCK; BOWRON, 2025). Embora permitam a produção de oxigênio medicinal em larga escala e com boa eficiência operacional, apresentam limitações importantes: (i) saturação do adsorvente e perda de eficiência após certa quantidade de ciclos; (ii) necessidade de troca periódica; (iii) problemas de difusão (como as zeólitas convencionais são predominantemente microporosas, o transporte de moléculas dentro dos poros pode ser limitado, dificultando o desempenho sob demandas de oxigênio mais intensas).

Ao mesmo passo, a nanociência e o reaproveitamento de resíduos podem servir como estratégias para o desenvolvimento de novos materiais. Novos materiais melhoram significativamente os processos de adsorção por oscilação de pressão (PSA) para produção de oxigênio medicinal, melhorando a eficiência, a pureza e a flexibilidade operacional (AL-SHAWABKEH, 2023; ZU, 2016; VEMULA *et al.*, 2015). Zeólitas hierárquicas, por exemplo, oferecem maior acessibilidade de poros e podem permitir ciclos mais rápidos, regeneração dos adsorventes e melhor desempenho em fluxos elevados (GRECO, 2013).

Paralelamente, a *kombucha* é uma bebida produzida a partir da fermentação de uma cultura simbiótica de bactérias e leveduras, sendo caracterizada como uma bebida refrescante, com certa acidez e naturalmente carbonatada (VILLARREAL-SOTO *et al.*, 2020). Sua produção baseia-se em uma fermentação, que leva em torno de 10-14 dias, tendo como

substratos o chá verde (*Camellia sinensis*) e açúcar (JÚNIOR *et al.*, 2022). Durante esse processo, tem-se a geração de uma membrana de aspecto gelatinoso e espessura variável, como subproduto da fermentação (GUIMARÃES *et al.*, 2024). Em função de estrutura fibrosa e de o diâmetro das fibras se encontrar na escala nanométrica, esse material celulósico é denominado como nanocelulose bacteriana (NCB) (ZHONG, 2020; SIONKOWSKA; MEZYKOWSKA; PIATEK, 2019).

É importante notar que, durante a produção da *kombucha*, apenas uma porção das membranas de NCB formadas durante o processo produtivo é reutilizada como inóculo e o restante é considerado um material residual, sendo comumente descartado (AMARASEKARA; WANG; GRADY, 2020). Diante desse cenário, pressupõe-se que a NCB possa ser utilizada como *template* para a produção de nanozeólitas e estruturas hierárquicas, conforme investigado em estudos com características similares (GONG *et al.*, 2022; BESSA, 2021; LEAL *et al.*, 2021), onde se utilizou a NCB como *template* e visou-se a produção de matérias-primas alternativas para o processo de PSA.

Diante do exposto, este projeto tem como objetivo produzir NCB utilizando resíduos da produção de *kombucha* e utilizá-la como *template* na síntese de nanozeólitas hierárquicas, com o foco de aplicação voltado ao processo de PSA e oxigênio medicinal.

1.1 JUSTIFICATIVA

O oxigênio é um gás medicinal fundamental no dia a dia de um EAS, sendo primordial a gestão eficiente desse insumo. Nesse sentido, tem-se duas formas de obtenção em ambiente hospitalar: (i) via aquisição com fornecedor certificado ou (ii) por meio de uma usina concentradora de oxigênio, que permite ao EAS produzir seu próprio oxigênio nos padrões requeridos pela ANVISA. Atualmente, as zeólitas convencionas vêm cumprindo seu papel no processo de obtenção de oxigênio via PSA. No entanto, a busca por materiais inovadores nesse ramo utilizando nanociência e nanotecnologia ainda é pouco explorada. Ao mesmo passo, tem-se também a NCB como um biopolímero que pode servir como *template* para a produção de nanozeólitas hierárquicas, em função de sua estrutura fibrilar cujo diâmetro (das fibras) se encontra na escala nanométrica. Cabe ressaltar que a NCB pode ser obtida a partir de resíduos da produção de *kombucha* e, com a produção de nanozeólitas hierárquicas assistidas por *template*, propõe-se a obtenção de materiais alternativos para o processo de PSA. Desse modo, têm-se uma pesquisa fundamentada em aspectos econômicos relacionado a indústria de oxigênio medicinal, sustentabilidade, síntese verde e reaproveitamento de resíduos para a produção de novas nanotecnologias.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Sintetizar e caracterizar nanozeólitas hierárquicas utilizando biopolímeros verdes (NCB) como *template*, visando a obtenção de um nanomaterial alternativo para o processo de PSA.

1.2.2 Objetivos Específicos

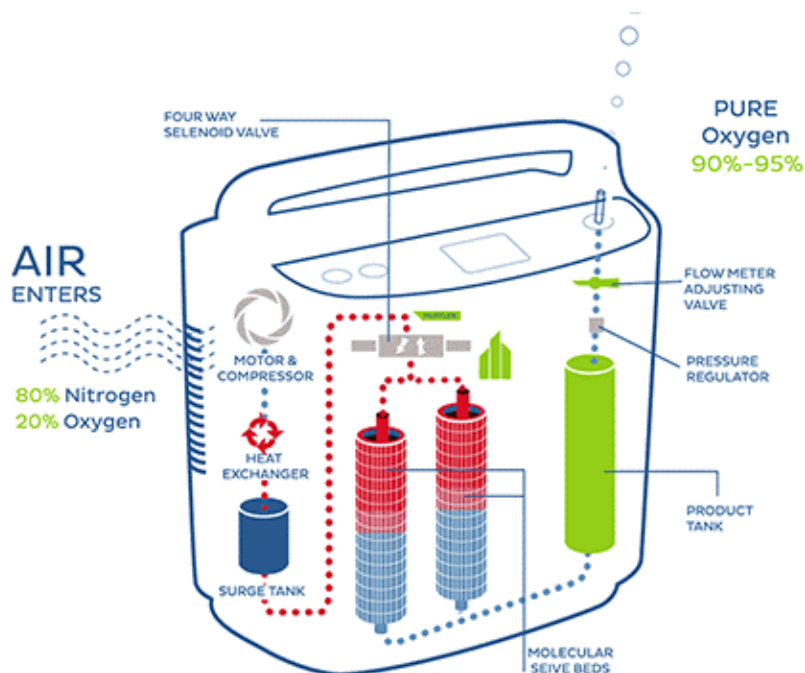
- Sintetizar e caracterizar estrutural, textural, morfológicamente a NCB;
- Sintetizar (utilizando a NCB como *template*) e caracterizar estrutural, textural, morfológica e elementarmente as nanozeólitas hierárquicas;
- Comparar e avaliar a aplicabilidade do nanomaterial proposto na pesquisa frente a zeólitas comerciais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A tecnologia de PSA é amplamente empregada para a produção de oxigênio medicinal e industrial, sendo particularmente valorizada em contextos em que a resposta rápida à demanda é essencial, como evidenciado durante a pandemia de COVID-19. Sucintamente, o processo de PSA utiliza zeólitas como peneiras moleculares seletivas para a adsorção de nitrogênio, levando à produção de oxigênio com pureza de até 95%. Este método apresenta vantagens notáveis quando comparado à separação criogênica, especialmente devido ao tempo de partida rápido e ao menor custo energético (JAIN; BHATIA, 2023; SULC, 2022).

Em poucas palavras, o PSA funciona da seguinte forma: (i) o ar atmosférico é utilizado como matéria-prima e é comprimido ao adentrar no concentrador de oxigênio; (ii) o nitrogênio é adsorvido pelas zeólitas; (iii) o oxigênio purificado é fornecido na saída do concentrador. É importante destacar que, nesse processo, duas colunas contendo zeólitas são utilizadas em paralelo, de forma que, quando uma se encontra pressurizada (adsorvendo nitrogênio do ar) a outra se encontra em repouso (dessorvendo nitrogênio retido previamente e sendo preparada para o próximo ciclo de adsorção) (CALIL, 2002). A Figura 1 ilustra a estrutura básica de um concentrador de oxigênio grau médico, com operação via PSA.

Figura 1 – Princípio de obtenção de oxigênio via PSA (as zeólitas servem como peneiras moleculares).



Fonte: Adaptado de WinSuport (2021).

Nos sistemas médicos atuais, zeólitas tipo A (5A) e X (13X, NaX, LiX) estão entre os materiais mais empregados, sendo capazes de reter seletivamente nitrogênio sob diferentes condições de pressão, enquanto o oxigênio é liberado para uso clínico (YADAV *et al.*, 2023). Além disso, recentes avanços na miniaturização e modificação dos adsorventes buscam otimizar a eficiência, a seletividade e o rendimento do processo PSA para atender a requisitos cada vez mais rigorosos de pureza e eficiência energética (SI *et al.*, 2025).

As zeólitas (convencionais) são materiais cristalinos microporosos extensivamente empregados como adsorventes e catalisadores, devido à sua estrutura regular e área superficial elevada. Recentemente, o desenvolvimento de nanozeólitas e zeólitas hierárquicas tornou-se proeminente, com o objetivo de ampliar o acesso a sítios ativos e melhorar a difusão de moléculas, superando limitações inerentes às zeólitas tradicionais (PAGIS *et al.*, 2022; KOOHSARYAN; ANBIA, 2016).

Nesse contexto, nanozeólitas e materiais hierárquicos tendem a apresentar maior número de sítios acessíveis e distribuição hierárquica de poros, favorecendo tanto adsorção eficaz de adsorvatos, particularmente em processos de separação gasosa e purificação (PAGIS *et al.*, 2022, PÉREZ-BOTELLA; VALENCIA; REY, 2022). A combinação de micro e mesoporosidade nas nanozeólitas hierárquicas eleva o desempenho em processos de adsorção, conforme demonstrado por estudos comparativos de isótopos de N₂ e separação de hidrocarbonetos ou gases industriais (MEDEIROS-COSTA *et al.*, 2019).

A NCB se trata de um exopolissacarídeo produzido via fermentação de bactérias acéticas do gênero *Komagateibacter* (SAYAH *et al.*, 2024) e possui estrutura química formada por cadeias lineares de D-glicopirranose compostas de ligações glicosídicas do tipo β -1,4-D-glicopirranose (GORGIEVA, 2020). Como características principais tem-se a, e estrutura tridimensional baseada em uma rede de nanofibras com diâmetros entre 20 e 100 nm (HOSTAMABADI *et al.*, 2024; GOPI *et al.*, 2018). Isso a confere propriedades como: (i) ausência das fases lignina e hemicelulose presentes na celulose vegetal; (ii) maior grau de cristalinidade, (iii) elevada hidrofilicidade e; (iv) biocompatibilidade (PÁEZ *et al.*, 2024).

O uso de *templates* para síntese de nanozeólitas permite controle refinado sobre morfologia, tamanho de cristalito e distribuição de poros, estratégias essenciais para obtenção de propriedades hierárquicas. Matrizes de NCB têm sido exploradas como *templates* naturais, propiciando a formação de nanoestruturas zeolíticas com porosidade e morfologia direcionadas (BESSA, 2021). Tal abordagem viabiliza a obtenção de materiais híbridos com potencial em adsorção, catálise heterogênea e purificação de gases, incluindo síntese de nanomateriais inorgânicos baseados em NCB como *template* (KACXMAREK;

BIALKOWSKA, 2025; BESSA, 2021; MENCHACA-NAL *et al.*, 2016).

As nanozeólitas têm mostrado melhora significativa no desempenho de processos PSA para separação gasosa, especialmente para oxigênio e hidrogênio. Estudos recentes indicam que o tamanho nanométrico e a estrutura hierárquica dessas zeólitas aumentam a eficiência da adsorção ao reduzir a resistência difusional e aumentar a acessibilidade aos sítios ativos, promovendo maior pureza e recuperação do gás produzido (LI *et al.*, 2025).

Conforme a literatura, sugere-se que a integração de nanozeólitas em colunas PSA promove otimização do ciclo, diminuindo tempo de pressurização e purga, além de melhorar a estabilidade operacional do processo (SI *et al.*, 2025; SHROTRI; BIRJE; NANDANWAR, 2024, CLATWORTHY *et al.*, 2023). Assim, a incorporação de nanozeólitas emerge como estratégia-chave para desenvolvimento de concentradores de oxigênio e purificadores de gás mais eficientes e sustentáveis.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Chá verde (*Camellia sinensis*), SCOBY (membrana precursora na produção de *kombucha*), hidróxido de sódio (NaOH) e hipoclorito de sódio (NaClO). Como precursores das nanozeólitas serão utilizados materiais residuais como sílica da casca de arroz e lodo industrial.

3.2 SÍNTESE DA NANOCELULOSE BACTERIANA

A síntese da NCB consistirá em três etapas principais: (i) preparação da infusão de *Camellia sinensis* e sacarose; (ii) preparação/fermentação do meio de cultura *kombucha-like*; (iii) purificação e secagem da membrana de NCB via lixiviação química com NaOH e branqueamento (*bleaching*) com NaClO (BODEA *et al.*, 2021; PILAI, 2021).

3.3 SÍNTESE DA NANOZEÓLITA

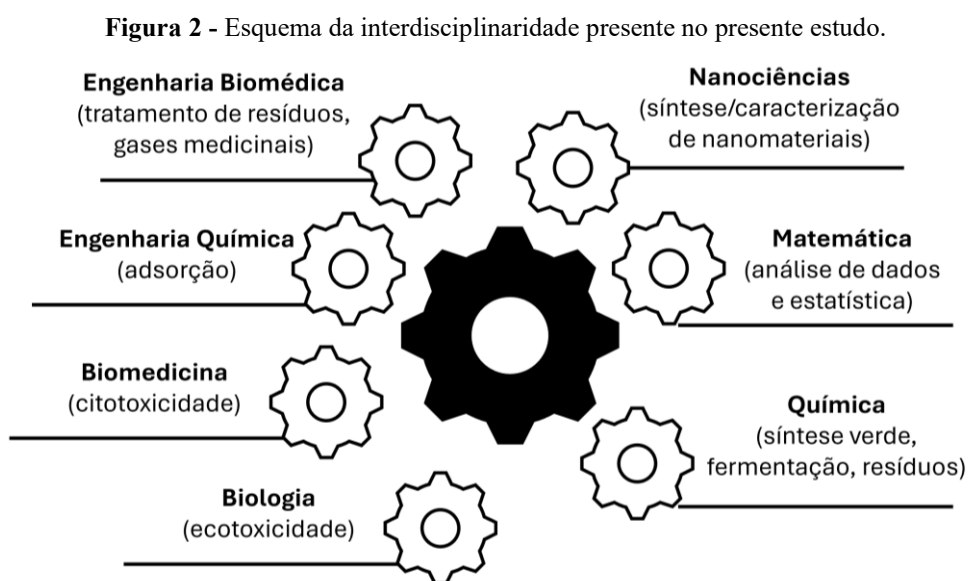
A síntese das nanozeólitas se dará via método hidrotérmico utilizando a sílica obtida da casca de arroz e lodo industrial residual da região de Santa Maria como precursores, seguindo estudos prévios de Oviedo *et al.* (2024). Os precursores serão tratados via lixiviação química. Posteriormente, o hidrogel de NCB será impregnado com a nanozeólita, via agitação magnética e posterior secagem, conforme descrito em (BESSA, 2021).

3.4 CARACTERIZAÇÃO

Os materiais obtidos serão caracterizados estruturalmente via Difração de Raios-X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Quanto a morfologia, serão avaliados via microscopia eletrônica de varredura (MEV). Já em relação a área superficial, será utilizada a técnica de porosimetria de nitrogênio. Além disso, prevê-se ensaios de cito e ecotoxicidade.

4 INTERDISCIPLINARIEDADE DO PROJETO

O presente estudo possui caráter interdisciplinar por integrar conhecimentos de engenharia biomédica e química (tratamento de resíduos, adsorção e gases medicinais); nanociências (síntese e caracterização de nanomateriais); matemática (análise de dados e estatística descritiva e inferencial); química (fermentação, síntese verde e reaproveitamento de resíduos); biologia (ecotoxicidade); e biomedicina (citotoxicidade). A Figura 2 representa um esquema da interdisciplinaridade que envolve este estudo.



Fonte: Construção do autor.

5 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

A Tabela 1 apresenta um cronograma de atividades a serem desenvolvidas durante a realização deste projeto de pesquisa.

- a) Revisão de literatura;
- b) Síntese dos nanomateriais;
- c) Caracterização dos nanomateriais;
- d) Desenvolvimento do protótipo do PSA;
- e) Qualificação do projeto de tese;
- f) Avaliação da ecotoxicidade;
- g) Publicação dos resultados;
- h) Participação em eventos científicos;
- i) Defesa do doutorado.

Tabela 1 – Cronograma das atividades previsto para o projeto de doutorado.

	2025	2026	2027	2028	2029			
Atividades	Semestre							
	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º
a)								
b)								
c)								
d)								
e)								
f)								
g)								
h)								
i)								

Fonte: Construção do autor.

6 ORÇAMENTO

A pesquisa será desenvolvida na Universidade Franciscana contando com a infraestrutura dos laboratórios da universidade. Os materiais necessários para a realização da síntese dos nanomateriais verdes encontram-se disponíveis no Laboratório de Operações Unitárias, prédio 11 do conjunto II. As técnicas caracterização dos sistemas nanoestruturados serão efetuadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos, Central Analítica e Laboratório de Síntese de Materiais Nanoestruturados da UFN e em parceria com os laboratórios da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), resultando nos custos informados na Tabela 2. Adicionalmente, a Tabela 3 inclui o orçamento dos gastos em futuros congressos para apresentação parcial e completo do projeto e artigos que serão elaborados ao longo do curso de Pós-Graduação.


Tabela 2 – Custos previstos para o projeto de doutorado.

Análise	Preço (R\$)	Previsto
MEV-EDS	300/hora	2
FTIR	20/amostra	3
Porosimetria de N ₂	60/amostra	3
Participação em eventos	350/evento	4
Reagentes químicos	220	1
Total	R\$ 2.460,00	

Fonte: Construção do autor.

7 TERMO DE COMPROMISSO PARA DEDICAÇÃO AO CURSO

Eu, Vinícius Rodrigues Oviedo, me comprometo, se selecionado no Programa de Pós-Graduação em Nanociências, a dedicar no mínimo 20 h semanais no desenvolvimento do Projeto de Doutorado junto as instalações da UFN.


MSc. Vinícius Rodrigues Oviedo

REFERÊNCIAS

- AL-SHAWABKEH, A. F.; AL-NAJDAWI, N.; OLIMAT, A. N. High purity oxygen production by pressure vacuum swing adsorption using natural zeolite. **Results in Engineering**, v. 18, p. 1–13, 2023.
- AMARASEKARA, A. S.; WANG, D.; GRADY, T. L. A comparison of kombucha scoby bacterial cellulose purification methods. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 2, p. 1–7, 2020.
- BESSA, R.; PEREIRA, A. L.; ROSA, M.; ANDERSON, M.; LOIOLA, A. Hierarchization of zeolites a and x using bacterial cellulose as macroporous support. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 32, n. 9, p. 1822–1831, 2021.
- BODEA, I. M.; BETEG, F. I.; POP, C. R.; DAVID, A. P.; DUDESCU, M. C.; VILAU, C.; STANILA, A.; ROTAR, A. M.; CATUNESCU, G. M. Optimization of moist and oven-dried bacterial cellulose production for functional properties. **Polymers**, v. 13, n. 13, p. 1–25, 2021.
- CALIL, S. J. **Equipamentos Médico-hospitalares e o Gerenciamento da Manutenção – capacitação à distância**. Campinas: Editora MS, 2002. 379 p.
- CLATWORTHY, E. B.; GHOJAVAND, S.; GUILLET-NICOLAS, R.; GILSON, J.-P.; LLEWELLYN, P. L.; NESTERENKO, N.; MINTOVA, S. Dynamic adsorption of CO₂ by cha zeolites – size matters. **Chemical Engineering Journal**, v. 471, p. 1–8, 2023.
- FALKOWSKA, M.; ROEBUCK, L.; BOWRON, D. Molecular insights into preferential N₂ adsorption on zeolite 13x via total neutron scattering. **Adsorption**, v. 31, n. 5, p. 1–14, 2025.
- GONG, J.; TONG, F.; ZHANG, C.; NOBANDEGANI, M. S.; YU, L.; ZHANG, L. Bacterial cellulose assisted synthesis of hierarchical pompon-like SAPO34 for CO₂ adsorption. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 331, p. 1–8, 2022.
- GOPI, S.; BALAKRISHNAN, P.; GEETHAMMA, V. G.; PIUS, A.; THOMAS, S. Applications of cellulose nanofibrils in drug delivery. In: **Applications of Nanocomposite Materials in Drug Delivery**. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 75–95.
- GORGIEVA, S. Bacterial cellulose as a versatile platform for research and development of biomedical materials. **Processes**, v. 8, n. 5, p. 1–26, 2020.
- GRAHAM, H. R.; KING, C.; RAHMAN, A. E.; KITUTU, F. E.; GREENSLADE, L.; AQEEL, M.; BAKER, T.; BRITO, L. F. d. M. Reducing global inequities in medical oxygen access: the lancet global health commission on medical oxygen security. **The Lancet Global Health**, v. 13, n. 3, p. e528–e584, 2025.
- GRECCO, S. d. T. F.; RANGEL, M. d. C.; URQUIETA-GONZÁLEZ, E. A. Zeólitas hierarquicamente estruturadas. **Química Nova**, v. 36, n. 1, p. 131–142, 2013.
- GUIMARÃES, A. C.; LEONARSKI, E.; CESCO, K.; POLETTO, P. Bacterial cellulose from kombucha: Assessing inoculum age and concentration, and its conversion via enzymatic hydrolysis into cellobiose and glucose. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 59, p. 1–8, 2024.

ISMAIL, J.; BANSAL, A. Medical oxygen: A lifesaving drug during the covid-19 pandemic—source and distribution. **Indian Journal of Pediatrics**, v. 89, n. 6, p. 607–615, 2022.

JAIN, V.; BHATIA, V. Out of breath in pandemic – is pressure swing adsorption (PSA) technology a solution for saving lives? **Journal of Family Medicine and Primary Care**, v. 12, n. 3, p. 426–429, 2023.

KACZMAREK, M.; BIAŁKOWSKA, A. M. Enzymatic functionalization of bacterial nanocellulose: current approaches and future prospects. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 23, n. 1, p. 1–28, 2025.

KOOHSARYAN, E.; ANBIA, M. Nanosized and hierarchical zeolites: A short review. **Chinese Journal of Catalysis**, v. 37, n. 4, p. 447–467, 2016.

LEAL, A. N. R.; LIMA, A. d. C. A. D.; AZEVEDO, M. G. F. d. A.; SANTOS, D. K. D. d. N.; ZAIDAN, L. E. M. C.; LIMA, V. F. D.; FILHO, I. J. C. Removal of Remazol Black B dye using bacterial cellulose as an adsorbent. **Scientia Plena**, v. 17, n. 3, p. 1–21, 2021.

LI, X.; YANG, X.; SHANG, H.; LIU, J.; JIN, X.; WANG, X.; WANG, Y.; LI, J.; YANG, J. Critical role of zeolite adsorbents in a displacement–adsorption separation process of methane–nitrogen gas. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 64, n. 5, p. 2966–2976, 2025.

MEDEIROS-COSTA, I. C.; LAROCHE, C.; PÉREZ-PELLITERO, J.; COASNE, B. Characterization of hierarchical zeolites: Combining adsorption/intrusion, electron microscopy, diffraction and spectroscopic techniques. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 287, p. 167–176, 2019.

MENCHACA-NAL, S.; LONDOÑO-CALDERÓN, C.; CERRUTTI, P.; FORESTI, M.; PAMPILLO, L.; BILOVOL, V.; CANDAL, R.; MARTÍNEZ-GARCÍA, R. Facile synthesis of cobalt ferrite nanotubes using bacterial nanocellulose as template. **Carbohydrate Polymers**, v. 137, p. 726–731, 2016.

OVIEDO, L. R.; DRUZIAN, D. M.; MONTAGNER, G. E.; RUIZ, Y. P. M.; GALEMBECK, A.; PAVOSKI, G.; ESPINOSA, D. C. R.; NORA, L. D. D.; SILVA, W. L. da. Supported heterogeneous catalyst of the copper oxide nanoparticles and nanozeolite for binary dyes mixture degradation: Machine learning and experimental design. **Journal of Molecular Liquids**, v. 402, p. 1–12, 2024.

PAGIS, C.; LAPRUNE, D.; ROIBAN, L.; EPICIER, T.; DANIEL, C.; TUEL, A.; FARRUSSENG, D.; COASNE, B. Morphology and topology assessment in hierarchical zeolite materials: adsorption hysteresis, scanning behavior, and domain theory. **Inorganic Chemistry Frontiers**, v. 9, n. 12, p. 2903–2916, 2022.

PILLAI, M. M.; TRAN, H. N.; SATHISHKUMAR, G.; MANIMEKALAI, K.; YOON, J.; LIM, D.; NOH, I.; BHATTACHARYYA, A. Symbiotic culture of nanocellulose pellicle: A potential matrix for 3d bioprinting. **Materials Science and Engineering: C**, v. 119, p. 1–8, 2021.

PÁEZ, M. A.; CASA-VILLEGAS, M.; ALDAS, M.; LUNA, M.; CABRERA-VALLE, D.; LÓPEZ, O.; FERNÁNDEZ, D.; CRUZ, M. A.; FLOR-UNDA, O.; GARCÍA, M. D.; CERDA-MEJÍA, L. Insights into agitated bacterial cellulose production with microbial consortia and agro-industrial wastes. **Fermentation**, v. 10, n. 8, p. 1–20, 2024.

PÉREZ-BOTELLA, E.; VALENCIA, S.; REY, F. Zeolites in adsorption processes: State of the art and future prospects. **Chemical Reviews**, v. 122, n. 24, p. 17647–17695, 2022.

RADEK, S.; MIROSLAV, K. Experimental study of oxygen separation in oxygen-pressure swing adsorption unit. **Chemical Engineering Transactions**, IT, v. 94, p. 481–486, 2022.

ROSTAMABADI, H.; BIST, Y.; KUMAR, Y.; YILDIRIM-YALCIN, M.; CEYHAN, T.; FALSAFI, S. R. Cellulose nanofibers, nanocrystals, and bacterial nanocellulose: Fabrication, characterization, and their most recent applications. **Future Postharvest and Food**, v. 1, n. 1, p. 5–33, 2024.

SAYAH, I.; GERVASI, C.; ACHOUR, S.; GERVASI, T. Fermentation techniques and biotechnological applications of modified bacterial cellulose: An up-to-date overview. **Fermentation**, v. 10, n. 2, p. 1–25, 2024.

SHROTRI, A. R.; BIRJE, A. R.; NANDANWAR, S. U. Pressure swing adsorption of li exchange hierarchical x zeolite for pure hydrogen from binary gas mixture. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier BV, v. 73, p. 138–147, 2024.

SI, H.; HONG, Q.; CHEN, X.; JIANG, L. Pressure swing adsorption for oxygen production: Adsorbents, reactors, processes and perspective. **Chemical Engineering Journal**, v. 509, p. 1–10, 2025.

SIONKOWSKA, A.; MEZYKOWSKA, O.; PIATEK, J. Bacterial nanocelullose in biomedical applications: a review. **Polymer International**, v. 68, n. 11, p. 1841–1847, 2019.

TARIQ, M.; SIDDHANTAKAR, A.; SHERMAN, J. D.; CIMPRICH, A.; YOUNG, S. B. Life cycle assessment of medical oxygen. **Journal of Cleaner Production**, v. 444, p. 1–9, 2024.

VEMULA, R. R.; KOTHARE, M.; SIRCAR, S. Transformative design of medical oxygen concentrator by rapid pressure swing adsorption. In: **Biotech, Biomaterials and Biomedical: TechConnect Briefs 2015**. Austin, TX: The Nano Science and Technology Institute (NSTI), 2015. p. 297–297.

VILLARREAL-SOTO, S. A.; BOUAJILA, J.; BEAUFORT, S.; BONNEAUD, D.; SOUCHARD, J.; TAILLANDIER, P. Physicochemical properties of bacterial cellulose obtained from different kombucha fermentation conditions. **Journal of Vinyl and Additive Technology**, v. 27, n. 1, p. 183–190, 2020.

WinSuport. 2021. Disponível em: <https://winsupport-ic.com/media-detail/news/241.html>. Acesso em: 15 jul. 2025.

YADAV, V. K.; CHOUDHARY, N.; INWATI, G. K.; RAI, A.; SINGH, B.; SOLANKI, B.; PAITAL, B.; SAHOO, D. K. Recent trends in the nanozeolites-based oxygen concentrators

and their application in respiratory disorders. **Frontiers in Medicine**, v. 10, p. 1–13, 2023.

ZHONG, C. Industrial-scale production and applications of bacterial cellulose. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, Frontiers Media SA, v. 8, p. 1–19, 2020.

ZHU, X.; LIU, Y.; YANG, X.; LIU, W. Study of a novel rapid vacuum pressure swing adsorption process with intermediate gas pressurization for producing oxygen. **Adsorption**, v. 23, n. 1, p. 175–184, 2016.