

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Pedro Issao Marchezepe

**Análise Comparativa dos Impactos Ambientais na
Indústria de Barrilha: Eletrólise versus Processo
Solvay**

SÃO CARLOS -SP
2025

Pedro Issao Marchezepe

Análise Comparativa dos Impactos Ambientais na Indústria de Barrilha: Eletrólise versus Processo Solvay

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Professor André Bernardo

São Carlos-SP
2025

Marchezepe, Pedro Issao

Análise comparativa dos impactos ambientais na indústria de barrilha: eletrólise versus processo Solvay / Pedro Issao Marchezepe -- 2025.
39f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): André Bernardo
Banca Examinadora: André Bernardo, Mônica Lopes Aguiar, Thiago Faggion de Pádua
Bibliografia

1. Processo Solvay. 2. Eletrólise. 3. Indústria de Barrilha.
I. Marchezepe, Pedro Issao. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

ERRATA

MARCHEZEPE, Pedro Issao. Análise Comparativa dos Impactos Ambientais na Indústria de Barrilha: Eletrólise versus Processo Solvay. 2025. 39. Graduação - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
Indicar o n° da folha	Indicar o n° da linha	Indicar o erro	Indicar a correção

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Departamento de Engenharia Química
Programa de Graduação

-
-

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Graduação do candidato Pedro Issao Marchezepe, realizada em 17/02/2025:

Prof. Dr. André Bernardo
UFSCar

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar
UFSCar

Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua
UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, amigos e professores que me auxiliaram durante toda a faculdade.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, que sempre me apoiou em momentos difíceis e auxiliou mesmo que à distância a minha faculdade. À minha namorada Letícia, que sempre me deu suporte nas crises durante o trabalho e que sempre acreditou em mim, em momentos que nem eu mesmo acreditava. À República Alcateia, que virou minha família em São Carlos e sempre me apoiaram e ajudaram no meu desenvolvimento profissional e pessoal. A todos os amigos que fiz ao longo do curso e amigos do COTIL, que também sempre estiveram ao meu lado independentemente da situação. A todos meus professores, que dedicam a vida para uma profissão tão linda e se dispõem a passar o conhecimento para todos. À todas essas pessoas, esse trabalho contém uma parte de cada um, pois tudo que sou é por conta de vocês!

“A ciência produz um estado incomparavelmente lírico neste homem.”

Ernest Solvay

RESUMO

O processo Solvay é a principal rota industrial para a produção de carbonato de sódio, baseada na absorção de gás carbônico por uma solução amoniacal de cloreto de sódio. O trabalho traz uma análise ambiental do processo de eletrólise como uma alternativa ao processo Solvay na fabricação de compostos químicos relacionados à indústria de barrilha. O principal produto do processo Solvay, o carbonato de sódio, é base de produtos fundamentais para uma série de outras áreas industriais, como a fabricação de detergentes, cerâmicas, papel, indústria têxtil, metalurgia, sabões, petroquímica, e em estações de água ou efluentes. Porém o impacto ambiental do processo ou de suas alternativas é muito diferente, e o intuito deste trabalho foi realizar uma comparação em termos de emissão de carbono, eficiência energética e gerenciamento de subprodutos. Apesar de sua importância histórica e grande utilização, o processo Solvay está sendo criticado em relação ao impacto ambiental causado, e em um futuro próximo pode ter que ser substituído por tecnologias mais limpas. Já o processo de eletrólise é questionado por causa de uma diferença de demanda entre soda cáustica e cloro, já que ambos são produzidos. A demanda por NaOH é maior em muitas regiões em comparação com Cl₂; isso leva à necessidade de encontrar aplicações alternativas ou como armazenar e dar vazão ao excesso de cloro produzido. A partir da revisão de artigos, textos acadêmicos e relatórios técnicos, foi possível obter dados de emissão de carbono, gasto de energia e os subprodutos de cada processo, com o processo Solvay sendo mais eficiente no gasto de energia, com gastos entre 2694 e 3778 kWh/ton. E com a eletrólise emitindo menores quantidades de carbono, entre 0,13 e 0,19 ton CO₂/ton, e gerando menos subprodutos. A propensão do trabalho foi de eleger a eletrólise como uma alternativa mais sustentável.

Palavras-chave: Processo Solvay. Eletrólise. Indústria de Barrilha. Impacto Ambiental. Análise Comparativa.

ABSTRACT

The Solvay process is the main industrial route for the production of sodium carbonate, based on the absorption of carbon dioxide by an ammoniacal solution of sodium chloride. This study provides an environmental analysis of the electrolysis process as an alternative to the Solvay process in the manufacturing of chemical compounds related to the soda ash industry. The main product of the Solvay process, sodium carbonate, serves as the foundation for essential products in various industrial sectors, such as detergent manufacturing, ceramics, paper production, the textile industry, metallurgy, soaps, petrochemicals, and water or wastewater treatment plants. However, the environmental impact of the process and its alternatives varies significantly. This study aims to compare them in terms of carbon emissions, energy efficiency, and by-product management. Despite its historical importance and widespread use, the Solvay process has been criticized for its environmental impact, and in the near future, it may need to be replaced by cleaner technologies. Meanwhile, the electrolysis process faces challenges due to the demand imbalance between caustic soda and chlorine, as both are produced simultaneously. The demand for NaOH is higher in many regions compared to Cl₂, leading to the need to find alternative applications or storage solutions for the excess chlorine produced. Through a review of articles, academic texts, and technical reports, data on carbon emissions, energy consumption, and by-products of each process were gathered. The Solvay process proved to be more energy-efficient, with consumption ranging between 2694 and 3778 kWh/ton. In contrast, electrolysis emits lower amounts of carbon, between 0.13 and 0.19 tons of CO₂ per ton, and generates fewer by-products. As a result, this study leans toward identifying electrolysis as a more sustainable alternative.

Keywords: Solvay Process. Electrolysis. Soda Ash Industry. Environmental Impact. Comparative Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -Fluxograma simplificado do processo Solvay	4
Figura 2 - Fluxograma simplificado do processo de fabricação de barrilha pela eletrólise	8
Figura 3 - Esquema simplificado da célula eletrolítica usando membrana para separar o ânodo e cátodo	11
Quadro 1 - Comparação de subprodutos e seus gerenciamentos	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões de Carbono por kWh	14
Tabela 2 - Comparação de consumo de energia elétrica	17
Tabela 3 - Comparação das Emissões de Carbono	18

LISTA DE ABREVIATURAS

Na_2CO_3 .	Carbonato de Sódio
CO_2 .	Dióxido de Carbono
NaOH .	Hidróxido de Sódio
Cl_2 .	Cloro
CAGR.	Taxa de crescimento anual composta
H_2O .	Água
NaCl .	Cloreto de Sódio
NH_3 .	Amônia
NaHCO_3 .	Bicarbonato de Sódio
NH_4Cl .	Cloreto de Amônio
CaCO_3 .	Carbonato de Cálcio
CaO .	Óxido de Cálcio
Ca(OH)_2 .	Hidróxido de Cálcio
CaCl_2 .	Cloreto de Cálcio
ASR.	Resíduo de Amônia-Soda
Mg(OH)_2 .	Hidróxido de Magnésio
CaSO_4 .	Sulfato de Cálcio
kWh.	Quilowatt-hora
GJ.	Gigajoule
ton.	Tonelada
°C.	Celsius
MWh.	Megawatt-hora
H_2 .	Hidrogênio
vol.	Volume
Cl^- .	Íons Cloro
OH^- .	Hidroxila
Na^+ .	Íons Sódio
Eq.	Equação

LISTA DE SIGLAS

PVC - Policloreto de Vinil

PTFE - Politetrafluoretileno

Abiclor - Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Escopo	1
1.2	Objetivo	1
2	Revisão de Literatura	2
2.1	Carbonato de Sódio e Mercado	2
2.2	Processo Solvay	3
2.3	Subprodutos do Processo Solvay	4
2.4	Consumo de Energia do Processo Solvay	5
2.5	Emissão de Carbono do Processo Solvay	6
2.6	Processo de Eletrólise	7
2.7	Célula de Diafragma	8
2.8	Célula de Mercúrio	9
2.9	Célula de Membrana	9
2.10	Cloro-Soda e o Mercado	11
2.11	Subprodutos da Eletrólise	11
2.12	Consumo de Energia da Eletrólise	13
2.13	Emissão de Carbono da Eletrólise	13
3	Materiais e Métodos	15
4	Resultados e Discussão	16
5	Conclusões/Considerações Finais	19
	Referências	21

1 INTRODUÇÃO

1.1 Escopo

A produção industrial de álcalis, particularmente o carbonato de sódio (Na_2CO_3), também conhecida como barrilha, ocupa um papel estratégico em diversos setores industriais. Este composto é amplamente utilizado na fabricação de vidro, detergentes, papel, produtos químicos, tratamento de água, cerâmica e metalurgia. A relevância da barrilha para a indústria global é inquestionável, com uma demanda crescente estimada em milhões de toneladas anuais, impulsionada pela urbanização, industrialização e aumento de demandas por produtos manufaturados (GOTA QUÍMICA, 2025).

Historicamente, o processo Solvay tem sido a principal rota industrial para a produção de carbonato de sódio desde o século XIX (GHORBEL; SLAMA, 2018). Este método, baseado na absorção de gás carbônico por uma solução amoniacal de cloreto de sódio, é amplamente adotado devido à sua eficiência operacional e à capacidade de atender às demandas em larga escala. Contudo, o impacto ambiental significativo associado a este processo, incluindo emissões de dióxido de carbono (CO_2), geração de resíduos sólidos e líquidos, e alto consumo de energia, tem levantado preocupações crescentes. O cloreto de cálcio (CaCl_2), um dos principais subprodutos, frequentemente apresenta desafios logísticos e ambientais, especialmente em países onde sua reutilização ou descarte sustentável é limitado (XAVIER, 2021).

Paralelamente, o processo de eletrólise, embora mais comumente associado à produção de hidróxido de sódio (NaOH) e cloro (Cl_2), tem emergido como uma alternativa tecnológica para a produção de carbonato de sódio. A combinação de eletrólise com carbonatação, que envolve a reação de NaOH com CO_2 , oferece vantagens potenciais em termos de sustentabilidade. Este método permite a captura de dióxido de carbono e sua conversão em um produto útil, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o processo de eletrólise com tecnologia de células de membrana apresenta maior eficiência energética e reduz os impactos ambientais relacionados ao uso de substâncias tóxicas, como mercúrio e amianto, presentes em tecnologias obsoletas (LI et al., 2021).

A importância de avaliar e comparar esses dois métodos reside no crescente foco global em soluções tecnológicas mais sustentáveis. Nesse contexto, o presente trabalho busca compreender através da literatura, e realizar uma análise detalhada e comparativa dos impactos ambientais do processo Solvay e do processo de eletrólise, com foco em três aspectos principais: eficiência energética, emissões de carbono e gestão de subprodutos.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise comparativa dos impactos ambientais associados ao processo Solvay e ao processo de eletrólise, com foco na produção de carbonato de sódio. A análise será abordada em três áreas principais:

- **Eficiência energética:** Quantificação do consumo energético em cada processo, com ênfase nos valores nominais de consumo de energia para cada rota, independente da fonte de energia.
- **Emissões de carbono:** Avaliação das emissões de CO_2 associadas a cada método, considerando tanto emissões diretas quanto indiretas.
- **Gestão de subprodutos:** Identificação e análise do impacto ambiental e do potencial de reutilização ou descarte sustentável dos resíduos gerados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Carbonato de Sódio e Mercado

O carbonato de sódio, Na_2CO_3 ou Barrilha, é um pó branco, translúcido, inodoro e facilmente solúvel em água. Para os humanos é relativamente inofensivo à saúde não tendo efeitos acentuados na pele e não se acumula no trato pulmonar (por ser solúvel em água), para o meio ambiente também não é um produto agressivo ou venenoso, um dos cuidados que se deve ter o contato com cursos de águas naturais, pois por ser facilmente solubilizado atua aumentando o pH da água (EMBRAPA, 2025).

Suas aplicações são diversas e é necessário em diversos setores da indústria química, em geral na preparação de carbonatos, fosfatos, fabricação de detergentes, cerâmicas, papel, indústria têxtil, metalurgia, sabões, petroquímica, e em estações de água ou efluentes (GOTA QUÍMICA, 2025).

Segundo a *Business Research*, o tamanho do mercado global para o carbonato de sódio em 2021 foi de aproximadamente U\$15 Bilhões, e com projeções para atingir cerca de U\$22 Bilhões até 2027, com uma taxa de crescimento anual (CAGR) de 6,85% até 2027. Apesar da COVID-19 ter causado impactos na demanda pelo produto, atualmente pode-se observar um aumento de demanda impulsionado pela crescente industrialização e urbanização, tendendo-se a aumentar a necessidade na indústria de vidros, sabão, detergentes e tratamento da água (BUSINESS RESEARCH INSIGHTS, 2025).

O mercado global de carbonato de sódio é dominado por grandes players devido à alta demanda em indústrias como vidro, detergentes, e química. Em 2023, o mercado global foi estimado em mais de 60 milhões de toneladas anuais, com os principais produtores concentrados na América do Norte (graças às reservas de trona nos EUA) e na China, que utiliza predominantemente o processo Solvay.

Os EUA possuem uma grande reserva de trona, essa sendo um mineral com a fórmula química $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ que contém 70,39% de carbonato de sódio, e a partir dela pode-se produzir o carbonato por meio do processo de extração (Sibhat et al., 2024).

No Brasil, a produção interna é limitada, um exemplo é a empresa a Continental Industries Group, Inc. em parceria com a WE Soda que atua como distribuidora de barrilha na América Latina (CONTINENTAL INDUSTRIES, 2025), porém, o país é dependente de importações. Em 2023, o Brasil importou cerca de 800 mil toneladas de carbonato de sódio, sendo os principais fornecedores os Estados Unidos e a China. O valor médio das importações ficou em torno de 320 a 400 dólares por tonelada, dependendo do fornecedor e das variações de mercado (COMEX STAT, 2025).

As importações brasileiras são concentradas em portos estratégicos, principalmente no Sudeste, para atender às indústrias localizadas em regiões industriais. A estabilidade relativa do volume importado reflete a maturidade da demanda nacional, alinhada ao crescimento moderado de setores consumidores. Contudo, o preço do carbonato de sódio tem variado devido a flutuações cambiais e custos logísticos, além de interrupções ocasionais na cadeia de suprimentos globais (COMEX STAT, 2025).

Embora o Brasil seja dependente de importações, a demanda por carbonato de sódio representa uma oportunidade para investimentos em produção local, especialmente com tecnologias mais limpas. A crescente preocupação com a sustentabilidade global e local tem gerado debates sobre a viabilidade de utilizar resíduos industriais no país, como os subprodutos do processo Solvay, para reduzir a necessidade de importação e os impactos ambientais (BUSINESS RESEARCH INSIGHTS, 2025).

No entanto, a alta dependência de mercados externos torna o Brasil vulnerável a crises globais, como aumentos de frete marítimo ou mudanças nas políticas comerciais de grandes exportadores. A diversificação de fornecedores ou o desenvolvimento de capacidades locais podem mitigar esses riscos. Por exemplo, investimentos em alternativas tecnológicas para reaproveitamento de subprodutos do processo Solvay podem alinhar o Brasil às tendências globais de sustentabilidade e ainda reduzir custos (BUSINESS RESEARCH INSIGHTS, 2025).

2.2 Processo Solvay

O processo Solvay, criado em 1863 por Ernest Solvay (SOLVAY, 2025), foi o processo sucessor do processo LeBlanc na fabricação de carbonato de sódio criado por volta de 1773. No início o novo método teve dificuldades em se estabelecer, porém no ano de 1915 o novo processo de fabricação através da amônia-soda conseguiria se estabelecer, reduzindo os custos de fabricação por um terço do preço original (GHORBEL; SLAMA, 2018).

A matéria-prima necessária para iniciar o processo Solvay necessita das seguintes matérias primas: a salmoura (solução de cloreto de sódio), amônia e calcário (carbonato de cálcio). A salmoura e o calcário não conseguem obter uma reação favorável, na verdade ocorre uma reação reversa, então é necessário realizar algumas etapas para preparação das matérias primas (GHORBEL; SLAMA, 2018).

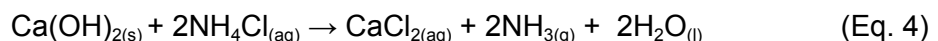
Inicialmente a salmoura (corrente 1) é aquecida para torná-la saturada, e então é colocada com a amônia em forma de solução (corrente 15), injeta-se dióxido de carbono na parte inferior da coluna (corrente 7 e 10), e o bicarbonato de sódio, produto dessa reação, é precipitado (corrente 5).



O calcário é aquecido (corrente 9) e produz óxido de cálcio (corrente 11) e dióxido de carbono (corrente 10), sendo que o gás produzido é destinado a reação de obtenção do bicarbonato de sódio, visto anteriormente.



Após a produção de óxido de cálcio, este é convertido em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para tratamento com água (corrente 12) seguindo a Eq. 3, este será utilizado para recuperação da amônia (corrente 15), utilizada para a saturação da salmoura como descrito na Eq. 1.



Em paralelo com a recuperação da amônia, ocorre a decomposição do bicarbonato de sódio produzido pela Eq. 5 e a obtenção do produto final, o carbonato de sódio (Na_2CO_3) (corrente 8), juntamente com o dióxido de carbono (corrente 7), que também é reaproveitado no início do processo.

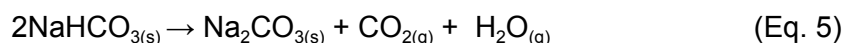
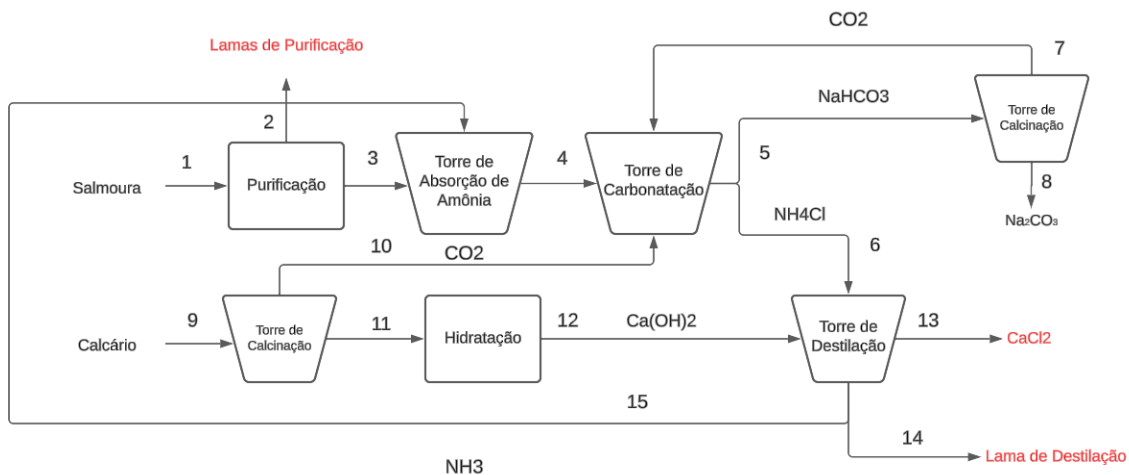


Figura 1 - Diagrama de blocos simplificado do processo Solvay



Fonte: O próprio autor. Adaptado de: (YANG et al., 2024)

Quando pensamos em matérias primas e subprodutos gerados para a produção de 1t de carbonato de sódio, necessitamos de: 1,5t de salmoura, 1,5t de calcário, 50t de água e apenas 2 kg de amônia (XAVIER, 2021). Já para os subprodutos, temos o dióxido de carbono, amônia, os dois primeiros são reutilizados no processo, o carbono para o borbulhamento para a precipitação de bicarbonato de sódio e a amônia que é recuperada para a produção de bicarbonato de sódio, mas na prática é necessário repor amônia para compensar pequenas perdas (RSMC, 2025). Além desses subprodutos que são reaproveitados, o processo Solvay gera sólidos que não são reaproveitados, entre os principais estão o cloreto de cálcio (CaCl_2) e as lamas de purificação e de destilação.

2.3 Subprodutos do Processo Solvay

O processo Solvay é amplamente utilizado para a produção de carbonato de sódio, mas gera grandes quantidades de subprodutos sólidos e líquidos que impactam negativamente o meio ambiente. Entre os principais resíduos estão o cloreto de cálcio (CaCl_2), as lamas de purificação e de destilação e efluentes alcalinos contendo partículas insolúveis e sais dissolvidos (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007).

Um dos principais subprodutos líquidos é o cloreto de cálcio, gerado durante a recuperação de amônia do cloreto de amônio (NH_4Cl) no processo de destilação. A demanda por cloreto de cálcio é limitada, sendo utilizado principalmente como agente desidratante e em países com clima frio, o descongelamento de neve nas ruas (XAVIER, 2021). Essa solução é frequentemente descartada em rios e mares devido às dificuldades logísticas e econômicas de armazenamento ou tratamento. Essa prática resulta em altos níveis de salinidade nas águas receptoras, prejudicando a fauna e a flora aquática (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007; RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024).

Os resíduos sólidos do processo Solvay, também referenciadas na literatura como “resíduo de amônia-soda” (ASR), são divididos em lamas de purificação de salmoura e lamas de destilação. A lama de purificação de salmoura contém carbonato de cálcio (CaCO_3), hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e sulfato de cálcio (CaSO_4), enquanto a lama de destilação, inclui excesso de CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCl_2 e CaSO_4 . Esses materiais são frequentemente depositados em corpos d'água ou terrenos próximos às fábricas, formando depósitos sedimentares que alteram o equilíbrio químico e físico do ambiente local. Por exemplo, o descarte no lago Traunsee, na Áustria, causou mudanças significativas na

qualidade da água, com aumento na turbidez e no pH (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007; YANG et al., 2024).

O resíduo de amônia-soda (ASR), possui alta alcalinidade (pH 10-12) e pode causar a alcalinização de solos, tornando-os inférteis e afetando negativamente a biodiversidade. Além disso, o ASR frequentemente contém partículas finas que podem ser dispersas no ar, causando poluição atmosférica, e íons cloreto que podem se infiltrar no solo e nas águas subterrâneas, contaminando recursos hídricos (YANG et al., 2024).

Outro impacto ambiental significativo está relacionado às emissões de dióxido de carbono (CO_2) provenientes da calcinação do calcário (CaCO_3) no processo Solvay. Para cada tonelada de carbonato de sódio produzida, cerca de 0,4 toneladas de CO_2 são emitidas. Este subproduto gasoso contribui para o aumento do efeito estufa e mudanças climáticas. Embora esforços estejam sendo feitos para capturar e reutilizar o CO_2 em aplicações industriais, a maioria das fábricas ainda enfrenta desafios tecnológicos e econômicos para implementar essas soluções (RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024; YANG et al., 2024).

Há um estudo para reutilizar esses subprodutos, como o uso de ASR na produção de materiais de construção, porém essa solução ainda é limitada por desafios técnicos e econômicos. Por exemplo, a alta concentração de íons cloreto no ASR compromete a durabilidade dos materiais de construção produzidos com este resíduo, dificultando sua aplicação em larga escala (YANG et al., 2024).

Portanto, enquanto o processo Solvay continua a ser essencial para a produção global de carbonato de sódio, suas implicações ambientais sublinham a necessidade urgente de avanços tecnológicos e regulamentações mais rigorosas para mitigar seus impactos. O desenvolvimento de métodos mais limpos e a reutilização eficiente dos subprodutos podem representar passos significativos rumo a uma produção mais sustentável (RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024).

2.4 Consumo de Energia do Processo Solvay

O processo Solvay é o método mais amplamente utilizado para a produção de barrilha (Na_2CO_3), representando cerca de 59% da produção mundial. Contudo, esse processo possui um alto consumo de energia, consumindo entre 9,7 e 13,6 GJ para produzir uma tonelada de barrilha. Convertendo as unidades para kWh, obtemos que a energia gasta para produção de 1 ton de carbonato de sódio está entre 2.695 e 3778 kWh (9,7 - 13,6 GJ). Essa alta demanda energética está ligada principalmente à calcinação do calcário (CaCO_3), que ocorre em temperaturas entre 950 e 1100 °C, e ao processo de regeneração da amônia, ambos essenciais para a operação. (WU et al., 2019).

O consumo energético do processo Solvay é substancialmente superior ao mínimo teórico necessário para a reação química, que é de apenas 0,52 GJ/ton de Na_2CO_3 . Esse excesso de energia consumida está associado não apenas às reações endotérmicas, mas também às ineficiências nos equipamentos industriais e à necessidade de calor para operações complementares, como secagem e purificação. (WU et al., 2019).

O alto consumo energético também se traduz em custos operacionais elevados, o que pode limitar a viabilidade econômica do processo, especialmente em regiões com regulamentações ambientais mais rígidas ou custos crescentes de energia.

A busca por alternativas mais eficientes, como o processo de eletrólise de membrana com ciclo de prótons (PCME), mostra-se essencial para reduzir tanto o impacto

ambiental quanto os custos energéticos, promovendo uma produção de barrilha mais sustentável e economicamente viável (WU et al., 2019).

2.5 Emissão de Carbono do Processo Solvay

A produção de carbonato de sódio pelo processo Solvay gera impactos ambientais significativos, sendo a emissão de dióxido de carbono (CO_2) uma das principais preocupações. Esse gás é liberado em diversas etapas, mas sua maior contribuição vem da calcinação do calcário, uma reação essencial para obter o CO_2 utilizado na carbonatação da salmoura (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007; RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024).

Na calcinação do carbonato de cálcio (CaCO_3), ele é decomposto em óxido de cálcio (CaO) e CO_2 . Essa reação ocorre em temperaturas entre 950°C e 1.100°C , exigindo altos níveis de energia térmica, geralmente proveniente de combustíveis fósseis, o que agrava as emissões totais de gases de efeito estufa. Cada tonelada de carbonato de sódio produzida gera entre 0,2 e 0,4 toneladas de CO_2 , dependendo da eficiência do processo e da pureza dos materiais utilizados (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007; RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024).

Outra fonte de emissões está relacionada à energia necessária para aquecer os reatores e manter a operação das unidades industriais. O uso de energia elétrica e térmica, frequentemente gerada a partir de combustíveis fósseis, contribui significativamente para o impacto ambiental do processo Solvay. Assim, a eficiência energética e a origem das fontes de energia desempenham papéis críticos na mitigação das emissões de carbono (RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024). Para avaliar a emissão de carbono relacionada à energia elétrica, é necessário realizar a conversão de GJ para kWh, e enfim calcular a emissão de carbono média para cada kWh consumido. Obtém-se que a energia gasta para produção de 1 ton de carbonato de sódio está entre 2695 e 3778 kWh (entre 2,695 e 3,778 MWh), quando aplicamos a Eq. 06, com um fator médio de emissões anuais de $3,85 \times 10^{-5} \text{ tCO}_2/\text{kWh}$, obtemos uma emissão de carbono na faixa de 0,104 a 0,145 tCO_2/kWh (MCTI, 2024).

$$3,85 \times 10^{-5} \frac{\text{tCO}_2}{\text{kWh}} \times \text{kWh gasto} = \text{emissão de CO}_2 \quad (\text{Eq. 6})$$

Uma alternativa que tem sido explorada para reduzir essas emissões é a captura e reutilização do CO_2 gerado na calcinação. A reciclagem parcial do dióxido de carbono dentro do próprio processo já é praticada, mas ainda não é suficiente para neutralizar completamente as emissões. Além disso, esforços estão sendo feitos para capturar CO_2 de fontes externas, como plantas industriais vizinhas, para utilizá-lo na produção de carbonato de sódio, substituindo parcialmente o calcário como fonte de carbono. Essa abordagem pode reduzir tanto os custos quanto a emissão de carbono do processo (RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024; YANG et al., 2024).

No entanto, implementar soluções como a captura de carbono e a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis enfrenta desafios econômicos e tecnológicos. A transição para métodos de produção mais limpos exige investimentos significativos em infraestrutura e adaptação tecnológica, que nem sempre são viáveis para todas as instalações (RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024; YANG et al., 2024).

Embora o processo Solvay continue sendo indispensável para atender à demanda global de carbonato de sódio, é evidente que suas emissões de carbono precisam ser controladas. A integração de práticas mais sustentáveis, como a utilização de fontes renováveis de energia e tecnologias de captura e armazenamento de carbono, é essencial

para minimizar os impactos ambientais e alinhar a produção industrial com os objetivos de mitigação das mudanças climáticas (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007; RAHIMPOUR; FAHMI; ZINATLOO-AJABSHIR, 2024).

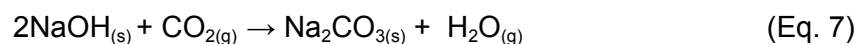
2.6 Processo de Eletrólise

No processo de eletrólise para a produção de cloro e hidróxido de sódio necessitamos de três recursos: sal e água (salmoura) e eletricidade para atuar na eletrólise. Nesse processo a salmoura é exposta a corrente elétrica e as moléculas de sal e água são separadas para formação de moléculas de hidróxido de sódio (NaOH), cloro (Cl₂) e hidrogênio (H₂) (SILVA, 2022).

Atualmente são utilizados industrialmente três tecnologias de eletrólise diferentes para a eletrólise: a de mercúrio, a de diafragma e a de membrana. Segundo os dados da Associação Brasileira da Indústria de Alcalis, Cloro e Derivados (Abiclor) no Brasil a tecnologia mais utilizada no setor de cloro-soda é a de diafragma, correspondendo a 63% da capacidade instalada, seguido da tecnologia de membrana (23%) e por fim a de mercúrio (14%) (ABICLOR, 2025).

Quando olhamos para o cenário mundial, para a produção de hidróxido de sódio e cloro a maior predominância é pela tecnologia de células de membrana, representando aproximadamente 81% da capacidade global instalada. Esse método é amplamente preferido devido à sua alta eficiência, pureza dos produtos e menor impacto ambiental. Em contrapartida as células de diafragma, são menos eficientes e com uma qualidade de produtos gerados menos. Por fim as células de mercúrio, historicamente utilizadas no setor estão praticamente sendo descontinuadas devido aos graves problemas ambientais e saúde, relacionados à utilização do mercúrio (LI et al., 2021).

A carbonatação do hidróxido de sódio (NaOH) é um processo em que o NaOH reage com o dióxido de carbono (CO₂), resultando na formação de carbonato de sódio (Na₂CO₃), sendo esse nosso produto desejado. A reação é descrita por:



Em condições específicas de alta umidade, a reação pode progredir para formar bicarbonato de sódio (NaHCO₃), representado pela equação abaixo:



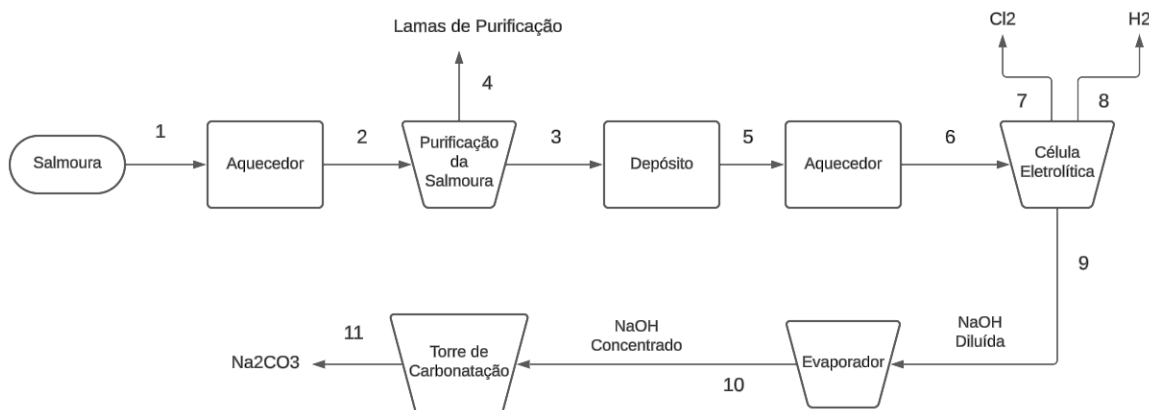
No entanto, em processos industriais otimizados, o calor liberado na primeira reação (altamente exotérmica) reverte a formação de bicarbonato de sódio, garantindo que a maior parte do produto final seja carbonato de sódio. (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

O rendimento da captura de CO₂ com NaOH pode ultrapassar 90% quando aplicado a correntes gasosas ricas em CO₂, como gases de combustão. Para capturas atmosféricas, onde a concentração de CO₂ é menor (cerca de 0,04% vol.), o rendimento gira em torno de 40%, dependendo do design do reator. (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

A conversão do NaOH no processo é considerada próxima a 100% em condições teóricas ideais, assumindo um processo adiabático. Isso significa que toda a quantidade de NaOH utilizada é efetivamente convertida em Na₂CO₃, resultando em alta eficiência na utilização do reagente (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

Para cada tonelada de CO₂ capturado, o consumo estimado é de aproximadamente 1,82 toneladas de NaOH, sendo necessário realizar um controle rigoroso da pressão e da umidade relativa do gás para evitar perdas de eficiência ou formação de subprodutos indesejados (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

Figura 2 - Diagrama de blocos simplificado do processo de fabricação de barrilha pela eletrólise



Fonte: O próprio autor. Adaptado de: (Ribeiro; Ferreira; Oliveira, 2022)

2.7 Célula de Diafragma

O método de células de diafragma consiste na utilização de um cátodo perfurado de aço ou ferro, e um ânodo de titânio recoberto de platina ou óxido de platina. O diafragma poroso de fibras de asbesto (amianto), misturado com outras fibras como as de teflon ou politetrafluoretileno (PTFE), esse diafragma funciona como um separador entre o cátodo e o ânodo (BNDES, 2009).

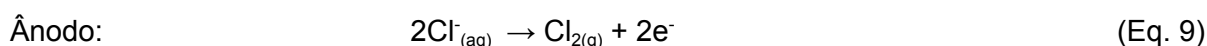
O diafragma permite a passagem dos íons por migração elétrica, mas reduz a difusão dos produtos. Com o uso o diafragma vai se entupindo, sendo necessário a manutenção do mesmo, e substituição constante manter a eficiência, quando começa ocorrer o entupimento observa-se uma necessidade de elevação da voltagem e uma maior pressão hidrostática na salmoura, aumentando os custos do processo (BNDES, 2009).

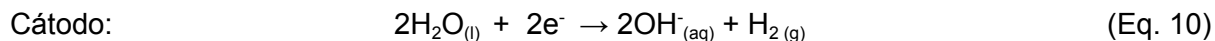
No caso de utilização dessas membranas semipermeáveis, não é necessário a etapa de purificação para a remoção do cloro, uma vez que a membrana deixa passar o hidróxido de sódio, enquanto retêm o cloreto de sódio, aumentando assim a pureza da soda cáustica (BNDES, 2009).

Algumas características do processo: as matérias primas necessitam ser de uma alta pureza, a soda cáustica necessita de um tratamento para aumentar sua concentração, os produtos são impuros, os custos de manutenção do diafragma são elevados e o amianto é um material prejudicial à saúde.

O diafragma de amianto vem sendo substituído por um material fabricado com zircônio e PTFE, chamado “polyramix”, que possui maior vida útil e maior eficiência energética (BNDES, 2009).

As reações químicas que ocorrem no cátodo, ânodo e a reação global são as seguintes:





2.8 Célula de Mercúrio

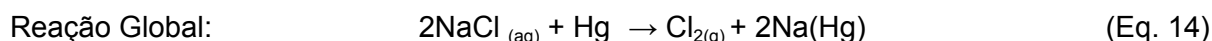
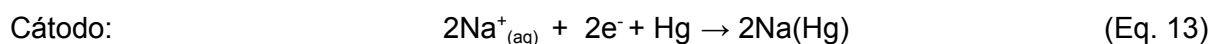
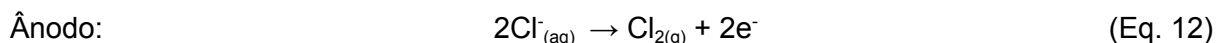
A eletrólise utilizando células de mercúrio foi o primeiro método em escala industrial para a produção de cloro gasoso, desenvolvida em 1892 de forma independente por H. Y. Castner e C. Kellner (SILVA, 2022).

Neste processo, o mercúrio fica depositado na parte inferior da cuba eletrolítica, atuando como cátodo, e onde obtemos nossa fusão de mercúrio e sódio, no ânodo obtemos o gás cloro. A amálgama de sódio-mercúrio que se obtém na primeira célula eletrolítica entra na segunda célula eletrolítica, onde a amálgama se torna o ânodo e o cátodo é composto de aço, ferro ou grafita (Ribeiro; Ferreira; Oliveira, 2022), e então o mercúrio é devolvido para a cuba primária em um processo cíclico. Por fim obtém-se uma soda cáustica de alta concentração e o cloro gasoso puro (BNDES, 2009).

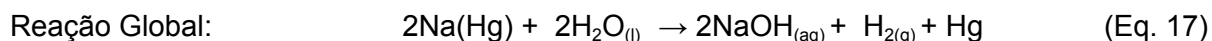
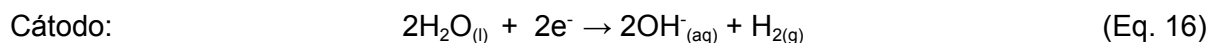
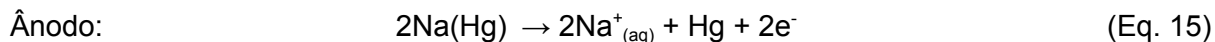
Nesse processo o mercúrio é constantemente perdido em pequenas quantidades, para efluentes e emissões que causam danos ao meio ambiente, elevando a concentração de metilmercúrio em alguns peixes a doses letais.

Algumas principais características desse processo são: maior consumo de energia elétrica, a soda cáustica não necessita de uma operação de concentração suplementar (sendo assim um produto de excelente qualidade), as matérias primas não necessitam de uma alta pureza (BNDES, 2009).

As reações químicas que ocorrem no cátodo, ânodo e a reação global para a primeira célula eletrolítica são as seguintes:



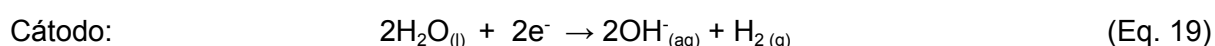
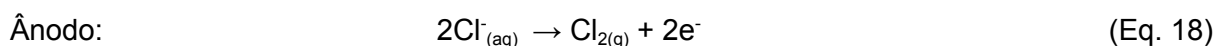
As reações químicas que ocorrem no cátodo, ânodo e a reação global para a segunda célula eletrolítica são as seguintes:



2.9 Célula de Membrana

A eletrólise de salmoura utilizando células eletrolíticas de membrana é uma tecnologia consolidada para a produção de hidróxido de sódio (NaOH). Essa abordagem, que representa a maioria das novas instalações globais para a produção de NaOH, destaca-se por sua eficiência e pureza do produto final, eliminando os riscos ambientais associados a métodos mais antigos, como as células de mercúrio e de diafragma (SIMON et al., 2014).

O processo é realizado em uma célula eletrolítica composta por dois compartimentos: o do ânodo e o do cátodo, separados por uma membrana de troca catiônica. A salmoura saturada (NaCl) é alimentada no compartimento do ânodo. Sob a aplicação de uma corrente elétrica, os íons de cloreto (Cl⁻) sofrem oxidação no ânodo, produzindo gás cloro (Cl₂). No cátodo, a água é reduzida para formar gás hidrogênio (H₂) e íons hidróxido (OH⁻). Os íons sódio (Na⁺) migram através da membrana para o lado do cátodo, onde se combinam com os íons OH⁻ para formar NaOH. As reações do processo podem ser expressas como:



A membrana de troca catiônica é um componente central dessa tecnologia, sendo projetada para permitir a passagem seletiva de íons Na⁺ enquanto impede o transporte de íons Cl⁻ e outras espécies. Geralmente, essas membranas são fabricadas com polímeros perfluorados reforçados, como o politetrafluoretileno (PTFE), que conferem alta resistência mecânica e química, bem como baixa resistência elétrica. Esses materiais são capazes de operar em ambientes altamente corrosivos, garantindo estabilidade e eficiência ao processo (LI et al., 2021).

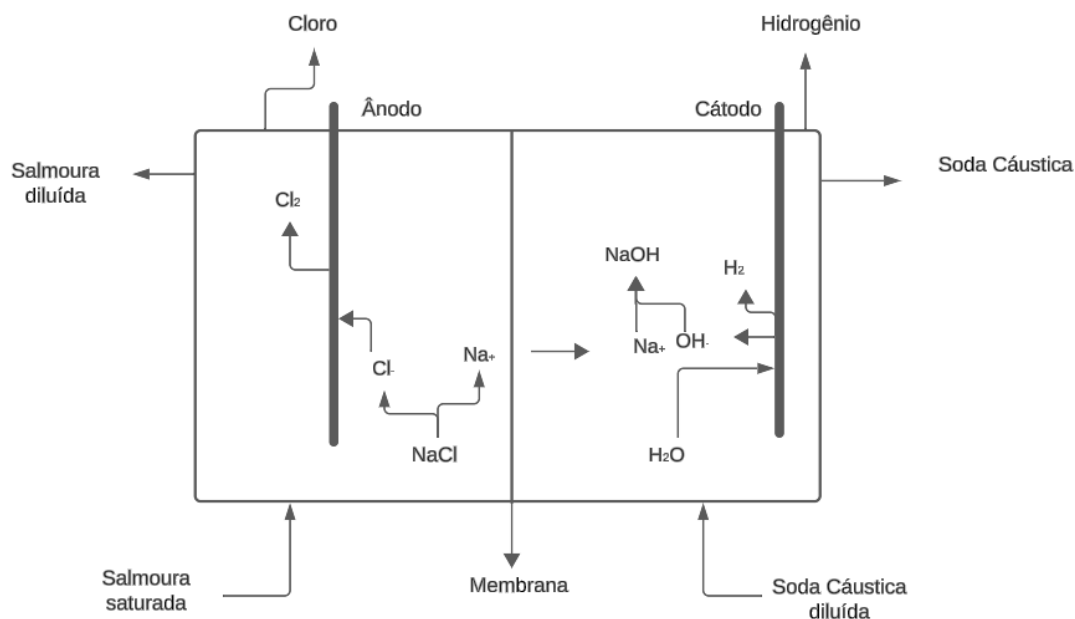
Um dos principais atrativos do método de membrana é a pureza do NaOH produzido, que atinge concentrações de 32% a 35% em peso, adequadas para aplicações industriais sensíveis. Essa pureza supera a dos métodos anteriores, como as células de diafragma, que frequentemente apresentavam contaminações cruzadas entre os produtos gerados (LI et al., 2021).

A eficiência do transporte de íons Na⁺ através da membrana é determinada pela corrente aplicada e segue a lei de Faraday. Estudos mostram que a eficiência de corrente na eletrólise de salmoura varia entre 50% e 55%, dependendo de fatores como densidade de corrente, fluxo da salmoura e características da membrana. Essa eficiência é impactada por fenômenos como transporte reverso de íons e formação de bolhas gasosas, que podem reduzir a área ativa da membrana (Sibhat et al., 2024).

Além da eficiência, a eletrólise com membrana oferece vantagens como maior segurança operacional e menor impacto ambiental. Diferentemente das células de mercúrio, que utilizavam materiais altamente tóxicos, o método de membrana elimina esses riscos e atende às exigências ambientais modernas. Da mesma forma, supera as células de diafragma, que empregavam asbestos, uma substância reconhecidamente prejudicial à saúde (LI et al., 2021).

Por sua confiabilidade, eficiência e alta qualidade do produto final, a tecnologia de membrana tornou-se a principal escolha para a produção de NaOH em larga escala. Embora desafios como a durabilidade das membranas e a otimização de custos operacionais ainda existam (LI et al., 2021).

Figura 3 - Esquema simplificado da célula eletrolítica usando membrana para separar ânodo e cátodo.



Fonte: Próprio autor, adaptado de: (Ribeiro; Ferreira; Oliveira, 2022)

2.10 Cloro-Soda e o Mercado

A aparência inicial do cloro resultante da eletrólise é de um gás amarelo-esverdeado, com um odor forte e irritante, para ser manipulado ele é pressurizado a baixas temperaturas para se transformar em um líquido de cor âmbar.

Já a soda cáustica obtida pela eletrólise da salmoura se dá livre de impurezas que prejudicam a eficiência e rendimento do processo evolutivo, para fins comerciais ela apresenta-se em forma de solução aquosa, límpida e contendo cerca de 50% de hidróxido de sódio (NaOH) em peso. Pode-se também ser comercializada na forma de soda cáustica rayon em escamas, obtida através da evaporação da soda cáustica líquida, ou da fusão do produto anidro e do processo de escamação (BNDES, 2009).

A indústria de cloro-soda é fundamental para diversos setores, fornecendo produtos essenciais como cloro e soda cáustica, utilizados na fabricação de PVC, papel, alumínio, entre outros. O mercado global tem apresentado crescimento constante, impulsionado pela demanda crescente em setores como construção civil e produtos de consumo. Estima-se que o tamanho do mercado atinja 271,88 milhões de toneladas em 2024, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 3,17% até 2029, alcançando 317,80 milhões de toneladas (Mordor Intelligence, 2025).

No Brasil, a indústria de cloro-álcalis possui uma capacidade instalada de aproximadamente 1,5 milhão de toneladas por ano, representando cerca de 2% da capacidade mundial. Em 2020, a produção brasileira de cloro foi de 786,2 mil toneladas, uma redução de 8,3% em relação a 2019 (VALOR ECONÔMICO, 2023; ABICLOR, 2025).

2.11 Subprodutos da Eletrólise

A eletrólise no processo cloro-álcali gera três principais produtos: cloro, soda cáustica (hidróxido de sódio) e hidrogênio. Contudo, os subprodutos e os resíduos associados a esses processos podem causar impactos ambientais significativos. O método tradicional, que utiliza células de diafragma e células de mercúrio, são prejudiciais ao meio

ambiente devido ao uso de substâncias tóxicas como amianto e mercúrio (YANG; XIE; WANG, 2016).

No caso do processo de células de diafragma, o amianto é utilizado na fabricação dos diafragmas. Essa substância, quando liberada no meio ambiente, pode permanecer suspensa no ar por longos períodos e causar doenças graves, incluindo câncer de pulmão, mesotelioma e asbestose. Durante a decomposição do diafragma, tratamento de células operacionais e descarte de amianto, partículas dessa fibra mineral podem ser emitidas, contaminando o solo e os corpos d'água ao redor das instalações industriais (YANG; XIE; WANG, 2016).

Já no processo de células de mercúrio, o mercúrio líquido é empregado como um catalisador, formando amálgamas com sódio. Esse metal é altamente tóxico e representa risco tanto para os trabalhadores quanto para o ambiente. O vapor de mercúrio, por exemplo, pode ser absorvido pelos pulmões, atravessando barreiras biológicas como o cérebro e a placenta, o que pode levar a graves distúrbios neurológicos. Casos emblemáticos de contaminação incluem o desastre de Minamata, no Japão, onde milhares de pessoas sofreram envenenamento por mercúrio devido ao consumo de peixes contaminados (YANG; XIE; WANG, 2016).

Os resíduos do processo, como a lama de purificação de salmoura (semelhante ao processo Solvay), também são problemáticos. A salmoura utilizada na célula de membrana deve ser mais pura, sendo assim há maior geração de lama dessa célula de eletrólise, porém ela é considerada menos perigosa em comparação com as dos processos de diafragma e mercúrio, apesar disso todas elas contribuem para a degradação do solo e da água, tornando essas áreas inférteis e impactando ecossistemas locais (YANG; XIE; WANG, 2016).

Além dos resíduos sólidos, os processos de eletrólise geram emissões gasosas, incluindo cloro residual. O gás cloro possui um odor extremamente forte, asfixiante e irritante, podendo causar vários danos irreversíveis aos seres humanos e à natureza. Em contato com substâncias orgânicas presentes em corpos d'água, são formados subprodutos da cloração (ácidos haloacéticos, trihalometanos) que uma vez presentes na água que bebemos e ingeridos, podem causar tumores, e afetar o sistema nervoso, fígados e rins (HIDROGERON, 2025).

Diante desses impactos, tecnologias mais modernas, como o processo de célula de membrana, têm ganhado destaque por serem menos agressivas ao meio ambiente. Essa tecnologia não utiliza amianto nem mercúrio e requer menos energia para produzir os mesmos produtos, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa associadas à geração de energia elétrica. No entanto, o alto grau de pureza necessário para a salmoura utilizada no processo de membrana resulta em maior geração de efluentes líquidos, exigindo sistemas de tratamento mais avançados para minimizar os impactos ambientais (YANG; XIE; WANG, 2016).

Apesar das melhorias tecnológicas, o legado ambiental dos processos de diafragma e mercúrio ainda exige atenção. Muitas plantas industriais ao redor do mundo enfrentam desafios relacionados à remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas, assim como ao descarte seguro de mercúrio acumulado. Essas questões ressaltam a importância de legislações ambientais rigorosas e da adoção de práticas industriais sustentáveis para mitigar os danos já causados e prevenir impactos futuros (YANG; XIE; WANG, 2016).

Durante a carbonatação, o calor liberado da reação é significativo e pode ser aproveitado para outras aplicações industriais, como geração de vapor de baixa pressão. Esse calor é coproduzido e representa uma oportunidade de recuperação energética

(MEDINA-MARTOS et al., 2022). Além disso, o vapor de água gerado pela reação contribui para manter a umidade do sistema, facilitando a continuidade do processo sem a necessidade de suprimentos externos de água.

Por outro lado, a regeneração do NaOH a partir do Na_2CO_3 , caso seja necessária, é um processo energeticamente intensivo, geralmente envolvendo calcinação e consumo adicional de energia térmica e elétrica (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

2.12 Consumo de Energia da Eletrólise

O consumo de energia na eletrólise depende significativamente da eficiência do processo e do tipo de célula eletrolítica utilizada. Em sistemas industriais modernos, o consumo energético está frequentemente entre 2.200 e 2.800 kWh por tonelada de cloro produzida, dependendo da tecnologia empregada e das condições operacionais (Ribeiro; Ferreira; Oliveira, 2022). A conversão deste gasto energético em energia elétrica equivale a aproximadamente 7,9 a 10,1 GJ por tonelada.

De acordo com a literatura, a célula de membrana, uma das tecnologias mais eficientes, apresenta um consumo de energia geralmente na faixa inferior, próximo a 2.200 kWh/t (DU et al., 2018). Este valor é menor quando comparado às células de diafragma ou células de mercúrio, que consomem entre 2.700 e 3.200 kWh por tonelada de cloro. Esta redução no consumo energético deve-se à eliminação de correntes de fuga e melhorias na eficiência da separação iônica na célula de membrana.

O custo energético em processos de eletrólise também representa uma parcela significativa do gasto operacional total, variando de 40% a 60% nos casos de produção em larga escala (MEDINA-MARTOS et al., 2022). Considerando as variações de representatividade do gasto de energia da eletrólise, pode-se colocar o valor de kWh total para a produção (excluindo a carbonatação) entre 3.667 e 5.500 kWh para a célula de membrana, e para as demais entre 4500 e 8000 kWh.

Em sistemas industriais, a carbonatação utilizando CO_2 e hidróxido de sódio (NaOH) ocorre frequentemente em reatores agitados ou colunas de carbonatação. Estudos apontam que o consumo energético típico para produzir uma tonelada de Na_2CO_3 a partir de soluções de NaOH está entre 872 e 1.319 kWh por tonelada de CO_2 capturado, dependendo das condições específicas do processo (RUIZ et al., 2021).

Outro aspecto importante é a energia necessária para manter as condições ideais de pressão e temperatura nos reatores durante a carbonatação. Pressões moderadas de até 7 bar são frequentemente utilizadas para melhorar a solubilidade do CO_2 na solução, o que, embora aumente o consumo de energia elétrica, também incrementa a eficiência do processo em até 20% (RUIZ et al., 2021)

2.13 Emissão de Carbono da Eletrólise

No processo de eletrólise, o hidróxido de sódio (NaOH) é produzido a partir de salmoura (NaCl) e atua como reagente primário na captura de CO_2 durante a carbonatação. Em condições ideais, a eletrólise gera NaOH em uma proporção estequiométrica que permite a captura de 1 mol de CO_2 por 2 mols de NaOH. Isso corresponde a um consumo de aproximadamente 1,82 toneladas de NaOH para capturar 1 tonelada de CO_2 (0,55 ton de CO_2 /ton NaOH), considerando a eficiência operacional típica de processos industriais (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

A carbonatação, que converte CO_2 capturado em Na_2CO_3 , é realizada pela reação direta entre NaOH e CO_2 . Para cada tonelada de Na_2CO_3 produzida, cerca de 0,59

toneladas de CO₂ são fixadas quimicamente, enquanto o restante é consumido energeticamente nas etapas de pré-tratamento e reações secundárias (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

A eficiência energética e o impacto ambiental desse processo dependem significativamente da fonte de energia. Quando a eletricidade utilizada é derivada de fontes renováveis, o balanço de emissões de carbono pode ser neutro ou até mesmo negativo, dado que o processo evita as emissões associadas ao método Solvay (CHOI et al., 2021) (MEDINA-MARTOS et al., 2022). Em contrapartida, se a eletricidade for proveniente de fontes fósseis, o processo pode gerar emissões líquidas de até 1,2 toneladas de CO₂ por tonelada de Na₂CO₃, dependendo da eficiência energética e da composição do mix elétrico (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

Para calcular as emissões de carbono, podemos utilizar do mesmo raciocínio e coeficiente de emissão para o processo Solvay, aplicando uma conversão de emissão média para cada kWh consumido, utilizando a Eq. 06. Sendo assim, obtêm-se as faixas de emissão para cada célula de eletrólise os valores obtidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Emissões de Carbono por kWh

Célula	kWh/ton	tCO ₂ /kWh
Célula de Membrana	2.200	0,0847
Célula de Membrana e Diafragma	2.700 - 3.200	0,104 - 0,123
Carbonatação	872 - 1.319	0,034 -0,05

Fonte: Próprio Autor

A integração das etapas de eletrólise e carbonatação oferece um balanço de carbono promissor, especialmente em cenários com energia renovável. Para cada tonelada de Na₂CO₃ produzida, estima-se que as emissões líquidas possam ser reduzidas em até 50% em comparação ao processo Solvay, dependendo das condições de operação e da infraestrutura energética disponível. Além disso, o calor gerado durante a reação de carbonatação pode ser reaproveitado, reduzindo ainda mais a dependência de combustíveis fósseis (MEDINA-MARTOS et al., 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem de pesquisa utilizada neste estudo foi mista, integrando métodos qualitativos e quantitativos. Esta escolha é justificada pela necessidade de uma análise abrangente que contemple tanto os aspectos numéricos dos impactos ambientais quanto os impactos qualitativos de cada subproduto, como inovações tecnológicas e práticas de gestão do mesmo. Os métodos quantitativos permitiram a determinação de parâmetros como emissão de carbono e gasto nominal de energia de cada processo, enquanto a análise qualitativa explorou as práticas de gestão de subprodutos e suas implicações.

A amostragem para este estudo foi composta de dados obtidos de estudos de caso e revisões bibliográficas detalhadas de indústrias representativas de barrilha que utilizam os processos de eletrólise e Solvay.

Para a coleta de dados, foram utilizadas revisões de documentos acadêmicos, artigos e relatórios técnicos relevantes ao tema, priorizando pesquisas recentes para garantir que as informações reflitam as condições atuais dos processos Solvay e a eletrólise.

Os dados coletados foram interpretados mediante a revisão do conteúdo selecionado, e uma análise comparativa, foi efetuada para confrontar os resultados obtidos para ambos os métodos de produção, buscando identificar qual apresenta os melhores indicadores de eficiência energética, emissão de carbono e gerenciamento de subprodutos.

Para a emissão de carbono e gasto energético foram considerados os valores nominais obtidos da literatura para realização do comparativo, sendo que para as emissões de carbono também foram consideradas as emissões oriundas da fonte de eletricidade, independente do fornecimento ser de fontes renováveis. A partir dos valores nominais obtidos, o maior valor (para ambos os casos) é o com menor atrativo ambiental, visto que maiores emissões e gastos energéticos podem prejudicar com maior intensidade o meio ambiente.

Para os subprodutos a análise comparativa foi de maneira qualitativa, observando se os subprodutos obtidos por cada rota são reutilizados ou descartados, se há valor de revenda no mercado e se há demandas para tais subprodutos gerados. No final da análise, o processo que tem mais subprodutos com maiores aplicações de mercado e reutilização é considerado mais atrativo ambientalmente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Subprodutos

A produção de carbonato de sódio pelos processos Solvay e de eletrólise, resulta na geração de diversos subprodutos que necessitam de tratamento adequado para mitigar os impactos ambientais (Quadro 1). No processo Solvay, os subprodutos principais incluem cloreto de cálcio (CaCl_2), lamas contendo carbonato de cálcio (CaCO_3), hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e sulfato de cálcio (CaSO_4) (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007). O descarte inadequado de cloreto de cálcio em corpos d'água pode aumentar a salinidade, afetando negativamente a fauna e flora aquática. O tratamento e descarte desses subprodutos incluem a reutilização parcial do cloreto de cálcio e o uso de lamas em materiais de construção (YANG et al., 2024)., embora a presença de cloretos limite sua aplicação em larga escala. Há maneiras de reutilizar as lamas como um fertilizante, porém é necessário remover a maioria do cloro presente nas lamas (ROUX; BOULENGUER; OZIL, 2007).

No processo de eletrólise, os subprodutos principais são hidrogênio gasoso (H_2), cloro gasoso (Cl_2) e as lamas de purificação. A emissão do gás cloro sem controle, pode causar vários danos irreversíveis aos seres humanos e à natureza. Em contato com substâncias orgânicas presentes em corpos d'água, são formados subprodutos da cloração que, uma vez presentes na água, podem causar danos permanentes aos seres que consumirem (HIDROGERON, 2025).

Tecnologias modernas, como as células de membrana, podem minimizar a geração de subprodutos tóxicos, e o hidrogênio é frequentemente reutilizado como fonte de energia nas próprias instalações, reduzindo o impacto ambiental. Já para o cloro, ele pode ser pressurizado a baixa temperatura para se transformar em um líquido âmbar, podendo ser comercializado nessa forma, sendo utilizado em diversas indústrias como de fabricação de PVC, agroquímicos, tratamento de água e indústrias farmacêuticas (BNDES, 2009).

Quadro 1 - Comparação de subprodutos e seus gerenciamentos

Processo	Subproduto	Tratamento/Descarte
Solvay	Cloreto de Cálcio (CaCl_2)	Descarte
	Lamas de Purificação e Destilação	Descarte/Tratamento para Reutilização
Eletrólise	Cloro Gasoso (Cl_2)	Reutilização
	Hidrogênio Gasoso (H_2)	Reutilização
	Lamas de Purificação	Descarte

Fonte: Próprio autor

Consumo Energético

O consumo energético dos processos Solvay e de eletrólise difere significativamente (Tabela 2). No processo Solvay, o consumo energético varia entre 9,7 e 13,6 GJ (2.695 - 3778 kWh) por tonelada de carbonato de sódio produzido, devido à calcinação de calcário e à regeneração de amônia (WU et al., 2019). Esse processo é altamente dependente de combustíveis fósseis, o que impacta negativamente a eficiência energética. Algumas

plantas têm implementado sistemas de captura de CO₂ para melhorar a sustentabilidade, mas essas soluções ainda enfrentam desafios significativos.

Por outro lado, o processo de eletrólise apresenta um consumo energético variável entre 2.200 e 2.800 kWh por tonelada de cloro produzido, com as células de membrana sendo as mais eficientes (Ribeiro; Ferreira; Oliveira, 2022). A tecnologia de membrana reduz significativamente o consumo de energia em comparação com as células de diafragma e de mercúrio. Esta eficiência do gasto energético reduz o custo operacional e melhora o perfil ambiental do processo, tornando-o mais viável em longo prazo.

Para a rota de produção via eletrólise é necessário fazer uma estimativa de gasto energético do processo como um todo, segundo estudos, o gasto de energia da eletrólise corresponde entre 40-60% do gasto total do processo (MEDINA-MARTOS et al., 2022), sendo assim podemos chegar em valores entre 3.667 e 8000 kWh, dependendo da célula utilizada, sendo que a mais eficiente neste quesito é a célula de membrana, mantendo o gasto entre 3.667 e 5.000kWh, os dados de cada célula estão na Tabela 2.

Somado ao processo de eletrólise, a carbonatação também gera um consumo de energia considerável se utilizada com uma captura de carbono. Os valores variam de 872 a 1.319 kWh por tonelada de carbonato de sódio produzido, apesar de aumentar significativamente o consumo de energia, é necessário colocar na balança o quanto de CO₂ pode-se capturar, pois assim o processo pode ficar com uma emissão de carbono neutra, também ajudando na melhora do perfil ambiental do processo (RUIZ et al., 2021)..

Tabela 2 - Comparação de consumo de energia elétrica

Processo	Etapa/Processo	Consumo Energético (kWh/ton)
Solvay	Todo o processo	2.694 - 3.778
Eletrólise	Processo até a Eletrólise (Célula de Membrana)	3.667 - 5.500
	Processo até a Eletrólise (Célula de Mercúrio e Diafragma)	4500 - 8000
	Carbonatação	872 - 1.319

Fonte: Próprio autor

Emissões de Carbono

As emissões de carbono são um fator crucial na comparação entre os dois processos e são apresentados na Tabela 3, importante ressaltar que para ambos os processos foram calculadas aproximações para as emissões de carbono do processo como um todo, desde o consumo de energia até o produto final, sendo assim o processo Solvay emite aproximadamente 0,5 - 0,545 ton de CO₂ para cada tonelada de carbonato de sódio produzido, as emissões ocorrem principalmente devido à calcinação do calcário. Se somadas as emissões geradas pelo fornecimento de energia elétrica, obtidas pela Eq. 06, as emissões de CO₂ para o processo Solvay fica em torno de 0,59 - 0,68 ton de CO₂. Embora existam esforços para capturar e reutilizar o CO₂ gerado, esses sistemas ainda são limitados por desafios técnicos e econômicos.

Já no processo de eletrólise, as emissões de CO₂ são menores, e com as transições de fontes de energia renováveis e a integração com sistemas de captura de carbono, o

método de produção de carbonato de sódio via eletrólise pode transformar a indústria em um modelo mais sustentável. As emissões na eletrólise foram calculadas a partir das emissões de CO₂ associadas à geração de energia elétrica de cada processo/célula utilizada utilizando a Eq. 06, estão entre 0,13 e 0,28 ton de CO₂ para cada tonelada de cloro produzido, e durante a carbonatação a emissão está entre 0,03 e 0,05 ton de CO₂ para cada tonelada de carbonato de sódio. Se somar as emissões de CO₂ da rota de produção via eletrólise, utilizando a célula de membrana, com os dados de emissão da carbonatação, chegamos em valores totais de 0,16 a 0,24 ton CO₂, nesse quesito a célula de membrana se mostra ambientalmente mais sustentável, com menores emissões de CO₂ durante seu processo.

Porém, conforme a literatura (CHOI et al., 2021), o balanço entre as emissões de CO₂ do processo podem ser neutras quando utilizamos métodos de captura de carbono durante a carbonatação, podendo assim transformar o processo mais amigável ambientalmente, melhorando as emissões de carbono do processo.

Tabela 3 - Comparação das Emissões de Carbono

Processo	Etapa/Processo	Emissão de Carbono (ton CO ₂ /ton)
Solvay	Todo o Processo	0,59 - 0,68
Eletrólise	Processo até a Eletrólise (Célula de Membrana)	0,13 - 0,19
	Processo até a Eletrólise (Célula de Mercúrio e Diafragma)	0,16 - 0,28
	Carbonatação	0,03 - 0,05

Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa dos impactos ambientais associados ao processo Solvay e ao processo de eletrólise para a produção de carbonato de sódio revelou percepções significativas que refletem a necessidade de uma transição tecnológica na indústria de barrilha. Os três focos deste trabalho - eficiência energética, emissões de carbono e gestão de subprodutos - mostraram não só as vantagens e limitações de cada método, mas também os caminhos potenciais para uma produção mais sustentável.

Em termos de eficiência energética de cada processo, o processo Solvay apresenta uma vantagem, sendo que para todo o processo são gastos em torno de 2.694 - 3.778 kWh para cada tonelada de carbonato de sódio produzido. Enquanto a eletrólise utilizando a célula de membrana, que é a mais eficiente dentre as outras células neste quesito, apresenta um consumo de 3.667 a 5.500 kWh para cada tonelada de carbonato de sódio produzido, além da do gasto durante a carbonatação, sendo esse em torno de 872 a 1.319 kWh/ton. Esse resultado já era esperado, visto que é de conhecimento geral que a eletrólise gera altos consumos de energia para a indústria química.

No que tange às emissões de carbono, os resultados mostram que o processo Solvay atinge maiores patamares de emissão durante todo o processo, ficando entre 0,59 e 0,68 ton CO₂ para cada tonelada de carbonato de sódio produzido. Esses valores de emissão são tanto as emissões diretas, como a calcinação do calcário, como também as emissões indiretas, aquelas oriundas da fonte de eletricidade. Em contrapartida, o processo de eletrólise por meio da célula de membrana se destaca nos valores de emissão, ficando entre 0,16 e 0,21 ton CO₂ para cada tonelada de carbonato de sódio produzido, porém o processo de carbonatação apresenta um potencial promissor para reduzir ou até mesmo neutralizar as emissões de carbono do processo.

No último pilar da análise, a gestão de subprodutos, também podemos destacar a eletrólise que acaba gerando subprodutos indesejados como as lamas de purificação, que são descartadas, porém também traz subprodutos que possuem valor econômico e podem ser comercializados e utilizados em outras aplicações industriais. Essa característica agrega valor ao processo e reduz a necessidade de descarte inadequado de resíduos. Enquanto isso, o processo Solvay acaba gerando apenas subprodutos indesejáveis, como o cloreto de cálcio, e as lamas de purificação e destilação, que atualmente não possuem valor comercial e são descartadas muitas vezes sem nenhum tratamento em corpos d' água e solos, tornando-os inférteis e contaminados.

Diante desses resultados, é evidente que o processo de eletrólise, embora que ainda seja menos difundido que o método Solvay, apresenta vantagens significativas quando avaliados sob a ótica da sustentabilidade. Capaz de reduzir emissões líquidas de carbono e minimizar a geração de resíduos representa um alinhamento estratégico com metas globais de mitigação das mudanças climáticas com os princípios da economia circular. Entretanto, a viabilidade da implementação desse processo em larga escala está diretamente vinculada à disponibilidade de energia renovável e sistemas de captura de carbono.

Por outro lado, o processo Solvay ainda desempenha um papel crucial no atendimento à demanda mundial de carbonato de sódio. Contudo, as limitações ambientais e custos associados às suas emissões e resíduos indicam a necessidade de modernização e integração de tecnologias focadas em reduzir os impactos ambientais do processo.

Em conclusão, este estudo reforça a importância de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a sustentabilidade da produção de carbonato

de sódio. A transição do processo Solvay para rotas alternativas como a eletrólise e carbonatação não apenas contribuiria para a redução da pegada ambiental da indústria, mas também sinalizaria um compromisso com o futuro sustentável da produção química.

REFERÊNCIAS

SOLVAY. *Inventing soda ash again*. Disponível em: <https://www.solvay.com/en/article/inventing-soda-ash-again#:~:text=In%201863%2C%20Ernest%20Solvay%20invented.the%20Leblanc%20process%20it%20replaced.> Acesso em: 31 jan. 2025.

GHORBEL, A.; SLAMA, R. *Energy and exergy analysis of the sodium carbonate production by Solvay process*. 2018. Disponível em: <https://dl.icdst.org/pdfs/files1/eff2b8e8743e1059b04e4e665fa876b6.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2025.

RSmC. *Manufacturing sodium carbonate by the Solvay process: an overview of the process for post-16 students*. Disponível em: <https://edu.rsc.org/download?ac=15607>. Acesso em: 31 jan. 2025.

XAVIER, E. L. *Avaliação ambiental e técnica do processo Solvay em comparação à síntese alternativa de carbonato de sódio*. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/17788/1/ELXavier.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Carbonato de sódio – FISPQ. Disponível em: <https://cloud.cnpqg.embrapa.br/wp-content/igu/fispq/laboratorios/Carbonato%20de%20s%C3%B3dio.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2025.

GOTA QUÍMICA. *Carbonato de sódio – Barrilha leve*. Disponível em: <https://gotaquimica.com.br/produtos/carbonato-de-sodio-barrilha-leve/#:~:text=Aplica%C3%A7%C3%A3o.tratamento%20de%20%C3%A1gua%20ou%20efluentes.> Acesso em: 31 jan. 2025.

BUSINESS RESEARCH INSIGHTS. *Soda Ash Market: Global Industry Report*. Disponível em: <https://www.businessresearchinsights.com/pt/market-reports/soda-ash-market-108447#:~:text=O%20tamanho%20global%20do%20mercado.durante%20o%20per%C3%ADodo%20de%20previs%C3%A3o.> Acesso em: 31 jan. 2025.

SILVA, P. *Estudo de viabilidade ambiental e técnica da produção de barrilha no Brasil*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/26592/1/TFC-Pedro_Corrigido%20%281%29_ap%C3%B3s_defesa_final.pdf. Acesso em: 31 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CLORO, ÁLCALIS E DERIVADOS – ABICLOR. *Tecnologias de produção – Diafragma, membrana e mercúrio*. Disponível em: <https://www.abiclor.com.br/tecnologias-de-producao/#diafragma>.

Acesso em: 31 jan. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. *O setor de soda-cloro no Brasil: evolução e desafios*. 2009. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2682/1/BS%20O%20setor%20de%20soda-cloro%20no%20Brasil_P.pdf. Acesso em: 31 jan. 2025.

RIBEIRO, Josimar; FERREIRA, Rafael de Queiroz; OLIVEIRA, Geiza Esperandio de. *Química Aplicada* [recurso eletrônico]. Vitória, ES: Universidade Federal do Espírito Santo, Secretaria de Ensino a Distância, 2022. 1 recurso online (não paginado): il. ISBN 978-65-994410-6-6. Disponível em: <https://acervo.sead.ufes.br/materiais/quimica/quimica-aplicada/>. Acesso em: 22 fev. 2025.

WU, Yifan et al. Soda ash production with low energy consumption using proton cycled membrane electrolysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 58, p. 3450-3458, 2019. DOI: [10.1021/acs.iecr.8b05371](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05371).

LI, Kai et al. Revisiting chlor-alkali electrolyzers: from materials to devices. *Transactions of Tianjin University*, v. 27, p. 202–216, 2021. DOI: [10.1007/s12209-021-00285-9](https://doi.org/10.1007/s12209-021-00285-9).

SIMON, Alexander et al. Sodium hydroxide production from sodium carbonate and bicarbonate solutions using membrane electrolysis: a feasibility study. *Separation and Purification Technology*, v. 127, p. 70-76, 2014. DOI: [10.1016/j.seppur.2014.02.020](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.020).

YANG, C.; XIE, H.; WANG, J. *Sustainability assessment of soda ash production: Case study in China*. *Journal of Cleaner Production*, v. 66, p. 113-120, 2014. DOI: [10.1016/j.jclepro.2013.10.009](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.009).

ROUX, J. C.; BOULENGUER, P.; OZIL, P. *Sodium carbonate production: Process modeling and sustainability assessment*. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 8-9, p. 833-841, 2008. DOI: [10.1016/j.jclepro.2007.04.005](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.04.005).

RAHIMPOUR, Hamed; FAHMI, Ahmad; ZINATLOO-AJABSHIR, Sahar. Toward sustainable soda ash production: a critical review on eco-impacts, modifications, and innovative approaches. *Results in Engineering*, v. 23, p. 102399, 2024. DOI: [10.1016/j.rineng.2024.102399](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102399).

YANG, Zaihua et al. The utilization of ammonia soda residue in building materials: a review. *Journal of Building Engineering*, v. 98, p. 111122, 2024. DOI: [10.1016/j.jobe.2024.111122](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111122).

MEDINA-MARTOS, Enrique et al. Environmental and economic performance of carbon capture with sodium hydroxide. *Journal of CO2 Utilization*, v. 60, p. 101991,

2022. DOI: [10.1016/j.jcou.2022.101991](https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101991).

DU, Fengmin et al. Sodium Hydroxide Production from Seawater Desalination Brine: Process Design and Energy Efficiency. *Environmental Science & Technology*, v. 52, p. 5949-5958, 2018. DOI: [10.1021/acs.est.8b01195](https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01195).

SIBHAT, Marta et al. Advancement in sodium carbonation pathways for sustainable carbon capture and utilization: A review. *Results in Engineering*, v. 23, p. 102536, 2024. DOI: [10.1016/j.rineng.2024.102536](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102536).

CHOI, Won Yong et al. Performance prediction and evaluation of CO₂ utilization with conjoined electrolysis and carbonation using desalinated rejected seawater brine. *Desalination*, v. 509, p. 115068, 2021. DOI: [10.1016/j.desal.2021.115068](https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115068).

MORDOR INTELLIGENCE. *Mercado de cloro-álcalis: relatório da indústria*. Disponível em: https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/chlor-alkali-market?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 31 jan. 2025.

VALOR ECONÔMICO. *Cloro-soda pode atrair aportes de US\$ 600 milhões no Brasil*. 07 ago. 2023. Disponível em: https://valor.globo.com/empresas/noticia/2023/08/07/cloro-soda-pode-atrair-aportes-de-us-600-milhoes-no-brasil.ghtml?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 31 jan. 2025.

GARCIA-HERRERO, Isabel et al. Environmental challenges of the chlor-alkali production: Seeking answers from a life cycle approach. *Science of the Total Environment*, v. 580, p. 147–157, 2017. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.10.202](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.202).

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI. *Fator de emissão de CO₂ na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos*. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-d-e-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos>. Acesso em: 31 jan. 2025.

CONTINENTAL INDUSTRIES. *Soda Ash – Carbonato de Sódio*. Disponível em: https://www.continental-industries.com/pt/soda-ash-pt/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 31 jan. 2025.

HIDROGERON. *Riscos atribuídos ao cloro gás e as vantagens da substituição pela produção eletrolítica de hipoclorito de sódio*. Disponível em: <https://hidrogeron.com/riscos-atribuidos-ao-cloro-gas-e-as-vantagens-da-substituicao-pela-producao-eletrolitica-de-hipoclorito-de-sodio/>. Acesso em: 31 jan. 2025.

RUIZ, Claudia et al. Sustainable and Negative Carbon Footprint Solid-Based NaOH

Technology for CO₂ Capture. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, p. 572-581, 2021. DOI: [10.1021/acssuschemeng.0c07093](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07093).

SOLVAY, E. Disponível em: <https://citacoes.in/autores/ernest-solvay/>. Acesso em: 31 jan. 2025.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS – MDIC. *Comex Stat: Estatísticas do Comércio Exterior Brasileiro*. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 31 jan. 2025.