



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

MONITORAMENTO ATRAVÉS DE SENSORES DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA: UMA REVISÃO

MONITORING GREENHOUSE GAS EMISSIONS THROUGH SENSORS IN THE CEMENT INDUSTRY: A REVIEW

MONITOREO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO A TRAVÉS DE SENSORES: UNA REVISIÓN

Mariana de Oliveira ¹, Guilherme Vieira de Oliveira ², & Bruno Furtado Moura ^{3*}

^{1,2,3} Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) - FENG, UFCA

² Engenharia de Produção, Universidade Federal de Catalão

¹ mariana.engcivil.oliveira@gmail.com ² g.v.o.oliveira@gmail.com ^{3*} bruno.moura@ufcat.edu.br

ARTIGO INFO.

PALAVRAS-CHAVE: economia circular; indústria cimenteira; emissões; sensores.

KEYWORDS: circular economy; cement industry; emissions; sensors.

PALABRAS CLAVE: economía circular; industria cementera; emisiones; sensores.

*Autor Correspondente: Moura, B. F.

RESUMO

A importância da sustentabilidade e da economia circular na indústria cimenteira tem crescido diante das mudanças climáticas e da escassez de recursos naturais. Esta indústria é responsável por uma parcela significativa das emissões de dióxido de carbono, tornando-se o terceiro maior emissor global. A adoção de tecnologias limpas e a implementação de sensores na indústria cimenteira são cruciais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, possibilitando o planejamento da produção, a redução de perdas e a melhoria da qualidade do produto, fornecendo estimativas precisas de variáveis difíceis de medir diretamente, capacitando as empresas a tomar decisões informadas e maximizar a eficiência operacional. A metodologia adotada neste estudo foi uma revisão sistemática da literatura que abordou a aplicação de sensores na indústria cimenteira, com foco no monitoramento de gases do efeito estufa, bem como nas práticas relacionadas à economia circular e sustentabilidade. Tendo como objetivo analisar a importância e os benefícios da aplicação de sensores na indústria cimenteira, identificando avanços, desafios e tendências. Concluiu-se que a implementação de sensores na indústria cimenteira é necessária para a transformação do processo produtivo, promovendo a sustentabilidade e eficiência operacional, contribuindo para a preservação de recursos, eficiência energética e para a descarbonização.

ABSTRACT

The importance of sustainability and circular economy in the cement industry has grown in the face of climate change and natural resource scarcity. This industry is responsible for a significant share of carbon dioxide emissions, ranking as the third-largest global emitter. The adoption of clean technologies and the implementation of sensors in the

cement industry are crucial for reducing greenhouse gas emissions. They enable production planning, waste reduction, and product quality improvement by providing accurate estimates of difficult-to-measure variables. This empowers companies to make informed decisions and maximize operational efficiency.

The methodology adopted in this study was a systematic literature review that addressed the application of sensors in the cement industry, focusing on greenhouse gas monitoring as well as circular economy and sustainability practices. The aim was to analyze the importance and benefits of sensor implementation in the cement industry, identifying advancements, challenges, and trends. It was concluded that sensor implementation in the cement industry is necessary for transforming the production process, promoting sustainability and operational efficiency, and contributing to resource preservation, energy efficiency, and decarbonization.

RESUMEN

La importancia de la economía circular en la industria cementera ha aumentado debido al cambio climático y a la escasez de recursos naturales. Esta industria es responsable de una parte significativa de las emisiones de dióxido de carbono, siendo el tercer emisor más grande a nivel mundial. La adopción de tecnologías limpias y sensores en la industria cementera es crucial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, permitiendo la planificación de la producción, la reducción de pérdidas y la mejora de la calidad del producto al proporcionar estimaciones precisas de variables difíciles de medir directamente. Esto capacita a las empresas para tomar decisiones informadas y maximizar la eficiencia operativa. La metodología utilizada en este estudio fue una revisión de la literatura que abordó la aplicación de sensores en la industria cementera, centrándose en la monitorización de gases de efecto invernadero y en las prácticas relacionadas con la economía circular y la sostenibilidad. Se concluyó que la implementación de sensores en la industria cementera es necesario para transformar el proceso de producción, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia operativa, y contribuyendo a la preservación de recursos y la descarbonización.



1. INTRODUÇÃO

Diante das constantes mudanças climáticas e da escassez de recursos naturais em todo o mundo, a sustentabilidade adquiriu uma significativa importância para as indústrias. A economia circular tem sido considerada como uma solução promissora para otimizar o uso de recursos. Essa abordagem tem como principal foco a aplicação de tecnologia para gerar benefícios econômicos, ao mesmo tempo em que busca reduzir significativamente o impacto ambiental (Velenturf & Purnell, 2021). Na indústria de construção civil, o conceito de economia circular (EC) emergiu como um dos principais pilares para o desenvolvimento sustentável, representando uma alternativa viável e importante para o setor (Blomsma & Brennan, 2017).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, em 2019 as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) aumentaram aproximadamente 12% em relação a 2010, e 54% em relação a 1990. Sendo a maior parcela e crescimento das emissões brutas de GEE estão associadas à queima de combustíveis fósseis e processos industriais, principalmente a emissão de CO₂ (IPCC, 2022).

No âmbito industrial, de acordo com Tracy & Novak (2023), indústria do cimento é responsável por cerca de 8% das emissões globais de dióxido de carbono que contribuem para o aquecimento do planeta. Essas emissões superam as da aviação e colocam a indústria cimenteira como o terceiro maior emissor de CO₂ do mundo. No Brasil, de acordo com o relatório Roadmap Tecnológico do Cimento, a participação da indústria cimenteira corresponde a aproximadamente 2,6% das emissões (SNIC, 2019).

No processo de produção de cimento, onde os fornos atingem altas temperaturas de 1.500°C, o consumo considerável de energia térmica resulta em diversas emissões poluentes. No entanto, o cimento possui um potencial significativo para contribuir com a economia circular ao aproveitar resíduos e subprodutos industriais. Para atingir essa meta, é crucial adotar tecnologias limpas que minimizem o uso de recursos naturais, reduzam as emissões de gases de efeito estufa e aprimorem a eficiência energética. Ao fazer isso, o setor do cimento pode desempenhar um papel importante na busca pela sustentabilidade (Votorantim Cimentos, 2021).

Para Rocha e Carneira (2021) a Indústria de Cimento está enfrentando um processo de transformação significativo devido à necessidade inevitável de descarbonização. Como um setor relevante na economia nacional, esse setor busca alinhar-se com os objetivos nacionais de descarbonização da economia, visando garantir que a indústria cimenteira contribua para a sustentabilidade e o desenvolvimento de maneira coerente com os princípios ambientais e econômicos. Assim, a busca por processos mais sustentáveis na indústria cimenteira assume um papel crucial, não apenas para preservar o meio ambiente e promover a sustentabilidade, mas também para mitigar as emissões de carbono e reduzir os impactos negativos causados.



Diante dessa necessidade de transformação e descarbonização do processo de produção do cimento, impulsionada pela economia circular, a implementação de tecnologias que promovam o desenvolvimento sustentável dessa indústria surge como uma abordagem necessária. Nesse contexto, segundo Sun et al. (2022), a implementação de modelos de sensores na indústria cimenteira desempenha um papel fundamental, permitindo o planejamento da produção, a redução de perdas e a melhoria da qualidade do produto. Além disso, esses modelos são requisitos essenciais para a aplicação de estratégias de otimização e controle inteligentes. Ao fornecer estimativas precisas de variáveis difíceis de medir diretamente, os sensores suaves capacitam as empresas a tomar decisões mais informadas, maximizando a eficiência e a eficácia de suas operações.

Assim buscou-se realizar uma revisão bibliográfica abordando a função dos sensores no monitoramento de gases do efeito estufa, na melhoria da eficiência energética e na adoção de práticas de economia circular na indústria cimenteira. O objetivo foi avaliar a importância e os benefícios da aplicação de sensores nesse contexto, visando promover a sustentabilidade ambiental e a eficiência operacional da indústria cimenteira, por meio do controle e otimização dos processos produtivos, além da redução de emissões de gases de efeito estufa.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação de *soft sensors* na indústria cimenteira para o monitoramento de gases do efeito estufa, no contexto da economia circular e da sustentabilidade. Para realizar a revisão, foi conduzida uma pesquisa online nos bancos de dados Google Scholar, IEEE Xplore e ScienceDirect, utilizando as seguintes palavras-chave: "sensores", "indústria cimenteira", "gases do efeito estufa", "economia circular" e "sustentabilidade". Além disso, foram consultados relatórios e estudos relevantes para obter dados adicionais sobre emissões de gases de efeito estufa e produção de cimento.

A pesquisa bibliográfica foi delimitada no período de 2018 a 2023, com o objetivo de abranger as publicações mais recentes sobre o tema. Os estudos selecionados foram submetidos a uma análise crítica, considerando os principais avanços, desafios e tendências relacionados ao uso de *soft sensors* para a descarbonização e a adoção de práticas de economia circular na indústria cimenteira.

O intuito da revisão bibliográfica foi obter uma visão abrangente sobre a função dos sensores na indústria cimenteira, identificando as principais aplicações, tecnologias e metodologias utilizadas. Além disso, buscou-se identificar lacunas de conhecimento e oportunidades de pesquisa futura nesse campo, visando contribuir para o avanço da sustentabilidade e eficiência operacional da indústria cimenteira.

É importante ressaltar que, no escopo desta pesquisa, foram considerados especialmente os *soft sensors*, que são modelos matemáticos desenvolvidos com base em técnicas avançadas de *machine learning*, como redes neurais recorrentes e redes neurais convolucionais, e que

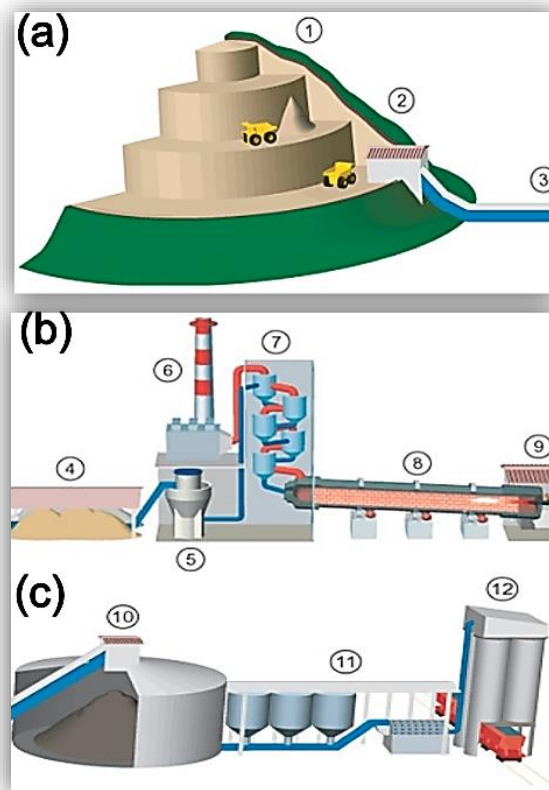


permitem a estimativa de variáveis difíceis de medir diretamente. A aplicação desses sensores virtuais no monitoramento de gases do efeito estufa e no controle dos processos produtivos da indústria cimenteira é de particular interesse neste estudo.

3. INDÚSTRIA CIMENTEIRA

De acordo com Teplická & Sedláková (2023) o processo de produção de cimento é dividido em três fases: mineração, processamento das matérias-primas e produção, embalagem e expedição do cimento. Na primeira fase, denominada mineração (Figura 2a), ocorrem três atividades principais (1) Pedreira; (2) Triturador; (3) Transportador. A segunda fase, chamada de processamento das matérias-primas e produção (Figura 2b), consiste em seis atividades distintas. (4) Homogeneização; (5) Moagem; (6) Filtro; (7) Pré-aquecimento; (8) Forno rotativo e (9) Resfriamento do clínquer. A terceira fase, que envolve a produção, embalagem e expedição do cimento (Figura 2c), consiste em três atividades. (10) Moagem do clínquer – obtenção do cimento final; (11) Embalagem; (12) Expedição.

Figura 2. Processo de produção do cimento: (a) Fase de Mineração, (b) Processamento das matérias-primas e produção, (c) Produção final, embalagem e expedição do cimento.

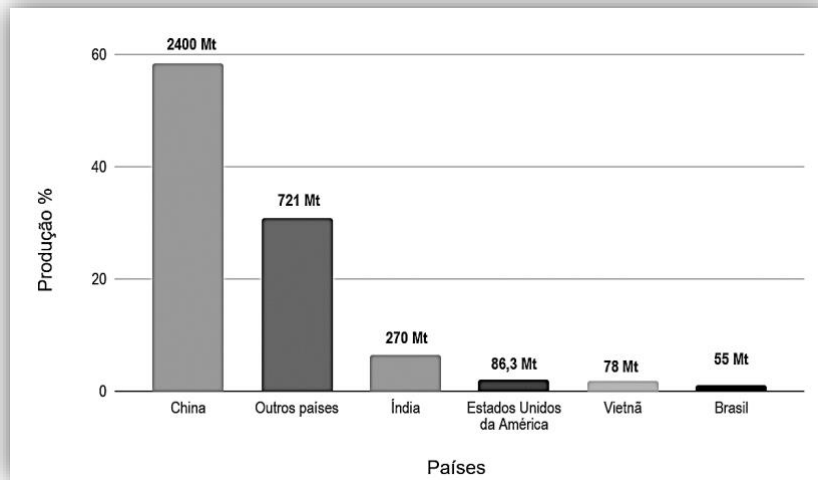


Fonte: Teplická & Sedláková (2023).

Em 2017, a produção global de cimento atingiu a marca de 4.100 milhões de toneladas. A região da Ásia foi responsável por aproximadamente três quartos dessa produção mundial de cimento (Queiroz Filho & Amorim Neto, 2018). O Figura 3 representa a produção mundial de cimento em 2017.



Figura 3. Produção mundial de cimento em 2017.



Fonte: Adaptado pelos autores – (Queiroz Filho & Amorim Neto, 2018).

Cantini et al. (2021) apontam que a produção de cimento é responsável por uma quantidade significativa de emissões de CO₂, sendo este setor considerado como o segundo principal emissor industrial no mundo. A maior parte do consumo de cimento está concentrada no setor da construção, o que permite uma ligação direta entre o consumo de cimento e a atividade de construção. Além disso, o comércio de cimento é limitado, uma vez que é predominantemente consumido no país de produção. Ademais, o processo de fabricação do cimento é semelhante em todas as fábricas, com variações nas matérias-primas e aditivos utilizados entre os países.

O consumo de energia é a principal fonte poluidora neste processo. A produção de cimento requer dois tipos de energia: térmica e elétrica. A energia térmica representa 75% deste processo, sendo que destes, 93% estão relacionados a queima de combustíveis fósseis. O restante da planta utiliza energia elétrica para alimentar outros processos, como moagem, exaustores e motores, o consumo de energia elétrica representa 25% do total, podendo chegar a 110-120 kWh por tonelada de cimento (ENGETOP, 2018).

Devido à produção em larga escala da indústria cimenteira e aos impactos ambientais associados, é crucial adotar a Economia Circular nesse contexto. Uma abordagem fundamental é a otimização do processo de produção de cimento, com ênfase na eficiência energética, por meio da utilização de sensores.

3.1. APLICAÇÃO DE SENSORES NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Os *soft sensors*, quando aplicados ao processo de produção da indústria cimenteira, permitiram a estimativa de variáveis importantes para a eficiência energética utilizando dados em tempo real e modelos matemáticos, isso ocorre, pois, proporcionam um melhor controle do processo de produção, permitindo ajustes em tempo real e otimização dos recursos energéticos. Estes sensores são desenvolvidos utilizando técnicas avançadas de *machine learning*, como Redes Neurais Recorrentes (RNN) e Redes Neurais Convolucionais (CNN).



Citação (APA): Oliveira, M., de., Oliveira, G. V., de., & Moura, B. F. (2023). Monitoramento através de sensores das emissões de gases do efeito estufa na indústria cimenteira: uma revisão. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(5), Edição Especial "Lean além da Manufatura", 51-59.

Nesse modelo, foi possível obter uma redução significativa no consumo de energia e nas emissões de CO₂ associadas à produção de cimento (Stöhr & Zielke, 2023).

Sun et al. (2022) desenvolveram um modelo de *soft sensors* que difere dos modelos tradicionais de monitoramento, pois utiliza Redes de Unidades Recorrentes Convolucionais com caminhos duplos de memória de longo e curto prazo para superar os desafios de atraso variável no tempo, não linearidade e redundância de dados na indústria de processos. Essa abordagem melhora a capacidade de extração de recursos do modelo e reduz a influência do atraso variável no tempo e da redundância dos dados, resultando em uma precisão melhorada do modelo de previsão.

Outro modelo de *soft sensors* foi desenvolvido por Zhao et al. (2021), com o intuito de monitorar de forma online o teor de CaO livre na produção de cimento, que é uma variável importante para garantir a qualidade do produto final, usando variáveis auxiliares, como temperatura, pressão e taxa de fluxo de material, este modelo utiliza uma análise de séries temporais multivariadas e Rede Neural Convolucional (MVTs-CNN).

Nesse contexto, os modelos mencionados foram desenvolvidos com o objetivo de estabelecer um controle mais preciso do processo produtivo em tempo real, visando minimizar o desperdício e, conseqüentemente, otimizar a eficiência energética e implementar práticas mais sustentáveis na indústria de cimento. Paralelamente, outros estudos têm sido conduzidos com foco direto na captura de carbono nesta indústria, podendo ser quantificados por meio da utilização de sensores projetados para monitorar as emissões de CO₂.

Estudos evidenciam a ampla aplicação dos *soft sensors*, conhecidos como *virtual sensors*, nos setores industriais devido à sua capacidade de estimar variáveis não mensuráveis, como a concentração de CO₂. Ao contrário dos sensores físicos, os *soft sensors* superam as limitações e dificuldades associadas à estimativa dessas variáveis. Além disso, eles não sofrem restrições físicas, como espaço de instalação e exposição a condições extremas de trabalho, tornando-os uma opção mais econômica e viável (Jiang, Yin, Dong & Kaynak, 2020).

Jadoon, Ahmad, Hussain e Menezes (2020) complementam que a aplicação de *virtual sensors* baseados em dados na indústria cimenteira tem se mostrado uma abordagem altamente eficaz no monitoramento e captura de CO₂. Esses sensores foram desenvolvidos de forma cuidadosa para estabelecer relações entre as condições do processo, como temperatura, pressão e vazão, e a capacidade de captura de carbono do sistema de compressão ácida (SCU). Neste estudo, um modelo baseado no *software* Aspen Plus do SCU foi utilizado, a fim de capturar o comportamento da operação em tempo real da fábrica de cimento, o modelo do processo foi convertido para o modo dinâmico através da interface entre MATLAB, Excel e Aspen. Os resultados obtidos revelaram um desempenho excepcional dos *virtual sensors*, com taxas de precisão superiores a 98,9% na remoção de CO₂ e acima de 99,6% na remoção de SO₂ e NO.



Citação (APA): Oliveira, M., de., Oliveira, G. V., de., & Moura, B. F. (2023). Monitoramento através de sensores das emissões de gases do efeito estufa na indústria cimenteira: uma revisão. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(5), Edição Especial "Lean além da Manufatura", 51-59.

Analogamente, um segundo estudo foi desenvolvido utilizando um *framework* de inteligência artificial afim de monitorar a eficiência da Unidade de Compressão Ácida (SCU) e uma unidade criogênica em uma fábrica de cimento, corroborando esses resultados anteriormente apresentados. Neste estudo, o modelo de processo foi transformado em modo dinâmico para capturar o comportamento em tempo real. Amostras de dados foram utilizadas para identificar as variáveis mais sensíveis que afetam a eficiência do processo. Os resultados mostraram alta precisão na estimativa das composições de CO₂, SO₂ e NO. Este *framework* oferece uma base sólida para a implementação em tempo real de fábricas inteligentes em plantas de fabricação de cimento (Jadoon et al., 2022).

Segundo com Perera et al. (2023) as técnicas convencionais de estatística e *machine learning* apresentam falhas ao lidar adequadamente com as variações espaciais e temporais nos dados do processo, resultando em baixa capacidade preditiva. Para superar essa limitação e avançar em direção ao desenvolvimento sustentável, os pesquisadores exploraram algoritmos de última geração em inteligência artificial (IA) para desenvolver sensores avançados. Dessa forma, o foco se deslocou dos algoritmos tradicionais para algoritmos de IA mais sofisticados, visando melhorar o desempenho preditivo dos *soft sensors* e aprimorar o monitoramento e controle de processos nas indústrias de processo.

4. RESULTADOS

Durante a revisão bibliográfica, foram identificados um total de 8 artigos relevantes que abordavam a aplicação de sensores na indústria cimenteira para o monitoramento de gases do efeito estufa. Esses artigos foram publicados em diferentes periódicos científicos e abrangiam um período de pesquisa entre os anos de 2020 a 2023.

Uma análise mais aprofundada desses artigos revelou diversas tendências e avanços no uso de sensores na indústria cimenteira. Além disso, a tabela a seguir apresenta uma síntese das principais características e diferenciações dos sensores utilizados nos estudos analisados, permitindo uma compreensão mais clara das tecnologias empregadas e suas aplicações na indústria cimenteira.

Tabela 1. Comparativo de técnicas e características dos sensores revisados.

Autor	Técnica	Aplicação	Principais Características
Stöhr & Zielke (2023)	Redes Neurais Recorrentes (RNN) e Redes Neurais Convolucionais (CNN)	Indústria cimenteira	Estimativa de variáveis importantes para a eficiência energética, ajustes em tempo real e otimização dos recursos energéticos.
Sun <i>et al.</i> (2022)	Redes de Unidades Recorrentes Convolucionais com caminhos duplos de memória de longo e curto prazo	Indústria de processos	Superar desafios de atraso variável no tempo, não linearidade e redundância de dados, melhorando a precisão do modelo de previsão.
Zhao <i>et al.</i> (2021)	Análise de séries temporais multivariadas e Rede Neural Convolucional (MVTSCNN)	Produção de cimento	Melhor monitoramento de fatores que estão intimamente ligados com a qualidade do produto final.
Jiang, Yin, Dong & Kaynak (2020)	<i>Soft sensors</i> (virtual sensors)	Setores industriais	Estimativa de variáveis não mensuráveis, como concentração de CO ₂ , superando as limitações dos sensores físicos e restrições físicas.



Citação (APA): Oliveira, M., de., Oliveira, G. V., de., & Moura, B. F. (2023). Monitoramento através de sensores das emissões de gases do efeito estufa na indústria cimenteira: uma revisão. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 9(5), Edição Especial "Lean além da Manufatura", 51-59.

Jadoon, Ahmad, Hussain e Menezes (2020)	<i>Soft sensors</i> (virtual sensors)	Indústria cimenteira	Monitoramento e captura de CO ₂ , estabelecendo relações entre as condições do processo e a capacidade de captura de carbono do sistema.
Jadoon <i>et al.</i> (2022)	<i>Framework</i> de inteligência artificial	Indústria cimenteira	Monitoramento da eficiência da Unidade de Compressão Ácida (SCU) e unidade criogênica, com alta precisão na estimativa de composições.
Perera <i>et al.</i> (2023)	Algoritmos de IA de última geração	Indústrias de processo	Melhorar o desempenho preditivo dos <i>soft sensors</i> e aprimorar o monitoramento e controle de processos com variações espaciais e temporais.

Fonte: Autores (2023).

A partir da análise dessa tabela, é possível observar que diferentes tipos de sensores foram utilizados nos estudos analisados, como *soft sensors* baseados em redes neurais recorrentes e redes neurais convolucionais. No geral, os resultados obtidos destacam a importância dos sensores na indústria cimenteira para o monitoramento de gases do efeito estufa e para a promoção da sustentabilidade e eficiência operacional. Através da aplicação dessas tecnologias, é possível obter estimativas precisas de variáveis difíceis de medir diretamente, permitindo tomadas de decisão informadas e a otimização dos processos produtivos na indústria cimenteira.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise dos estudos selecionados, foi possível observar que a aplicação de sensores na indústria cimenteira surge como uma solução promissora para impulsionar a descarbonização e promover a adoção de práticas de economia circular. Ao permitirem um controle preciso do processo produtivo em tempo real, esses modelos têm o potencial de reduzir o desperdício e otimizar a eficiência energética, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e das emissões de gases de efeito estufa.

No entanto, apesar dos avanços alcançados, ainda existem desafios e lacunas de conhecimento a serem abordados. É essencial aprimorar a precisão e a sensibilidade dos sensores, especialmente em condições industriais adversas, como altas temperaturas e presença de poluentes. Além disso, é necessário aprofundar a integração dos sensores com técnicas avançadas de inteligência artificial e análise de dados, a fim de fornecer uma visualização abrangente e em tempo real dos dados coletados, permitindo a identificação de padrões, correlações e oportunidades de melhoria nos processos de produção e redução de emissões.

Em resumo, esta revisão destaca os benefícios dos sensores no monitoramento das emissões na indústria cimenteira, bem como as oportunidades de pesquisa futura nesse campo. Aprofundar a compreensão dos benefícios e desafios relacionados à aplicação dessas tecnologias é fundamental para impulsionar o progresso sustentável nesse setor. Investir no desenvolvimento de sensores mais robustos, capazes de fornecer medidas confiáveis e precisas em condições adversas, e explorar a integração com técnicas avançadas de inteligência artificial são passos importantes para promover a sustentabilidade na indústria cimenteira.



REFERÊNCIAS

- ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. (2020). Panorama do coprocessamento no Brasil. Retirado de https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2020/10/Panoramaco_processamento_2020_bx.pdf
- ABRELPE. (2022). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. São Paulo: ABRELPE.
- Bauer, L.A.F. (2005). Materiais de construção (5ª ed.). Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 603-614. <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>
- Cantini, A., Leoni, L., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C. & Martini, F. (2021). Technological Energy Efficiency Improvements in Cement Industries. *Sustainability* - 13, 3810. <https://doi.org/10.3390/su13073810>
- ENGETOP. (2018). Uso da energia em indústrias cimenteiras. Recuperado de <https://engetop.org/uso-da-energia-em-industrias-cimenteiras/>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009325844
- Jadoon, U., Ahmad, I., Hussain, A., & Menezes, B. (2020). *Development of Virtual Sensors for Prediction of Flue Gas Composition of a Cement Plant using Ensemble Learning Technique*.
- Jadoon, U. K., Ahmad, I., Noor, T., Kano, M., Caliskan, H., & Ahsan, M. (2022). An intelligent sensing system for estimation of efficiency of carbon-capturing unit in a cement plant. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134359>
- Jiang, Y., Yin, S., Dong, J., & Kaynak, O. (2021). A Review on Soft Sensors for Monitoring, Control, and Optimization of Industrial Processes. *IEEE Sensors Journal*, 21(11), 12868–12881. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3033153>
- Perera, Y. S., Ratnaweera, D. A. A. C., Dasanayaka, C. H., & Abeykoon, C. (2023). The role of artificial intelligence-driven soft sensors in advanced sustainable process industries: A critical review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105988. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105988>
- Queiroz Filho, A. de A., & Amorim Neto, A. A. (2018). *Sumário Brasileiro Mineral 2018: Cimento* [PDF file]. ANM/PE gov. Recuperado de <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/cimento>
- Rocha, P., & Carneira, A. (2021). *Transição Energética e Descarbonização: Eficiência, competitividade, inovação na Indústria de Cimento Nacional e Políticas Públicas de apoio à sua transformação*.
- SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. (2019). Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial de Redução das Emissões de Carbono da Indústria do Cimento Brasileira até 2050. Rio de Janeiro.
- Stöhr, M., & Zielke, T. (2023). Machine Learning for Soft Sensors and an Application in Cement Production. In K. Von Leipzig, N. Sacks, & M. Mc Clelland (Orgs.), *Smart, Sustainable Manufacturing in an Ever-Changing World* (p. 627–638). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15602-1_46
- Sun, C., Zhang, Y., Huang, G., Liu, L., & Hao, X. (2022). A soft sensor model based on long&short-term memory dual pathways convolutional gated recurrent unit network for predicting cement specific surface area. *ISA Transactions*, 130, 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.03.013>
- Teplická, K., & Sedláková, Z. (2023). Avaliação da qualidade do processo produtivo de cimento em termos de aumento do desempenho da empresa. *Processos*, 11(3), 791. MDPI AG. Retirado de <http://dx.doi.org/10.3390/pr11030791>
- Tracy, B., & Novak, A. (2023). Cement industry accounts for about 8% of CO2 emissions. One startup seeks to change that. CBS News. Recuperado de <https://www.cbsnews.com/news/cement-industry-co2-emissions-climate-change-brimstone/>
- Velenturf, A. P. M., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437–1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Votorantim Cimentos. (2021). Relatório Integrado 2021. Recuperado de <https://www.votorantimcimentos.com.br/relatorio-integrado-2021>
- Zhao, Y., Ding, B., Zhang, Y., Yang, L., & Hao, X. (2021). Online cement clinker quality monitoring: A soft sensor model based on multivariate time series analysis and CNN. *ISA Transactions*, 117, 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.01.058>

