

GERENCIAMENTO INTEGRADO DE CARBONO APLICADO À AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL: desenvolvimento de um protótipo funcional

Isis Alves Nunis Bordinassi¹ e Wesley Candido da Silva²

RESUMO

O crescimento das demandas por práticas industriais mais sustentáveis tem impulsionado a busca por ferramentas que auxiliem no gerenciamento das emissões de carbono associadas aos processos produtivos. Nesse contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo funcional de automação industrial voltado ao Gerenciamento Integrado de Carbono, com foco na estimativa indireta de emissões de dióxido de carbono (CO₂) em um processo industrial simulado. O sistema foi concebido para apoiar o planejamento operacional e a tomada de decisão relacionada à compra de créditos de carbono, a partir da integração de variáveis de processo e consumo energético. A metodologia adotada envolveu a implementação de um sistema automatizado composto por controlador lógico programável, interface homem-máquina, inversores de frequência e um multimedidor de energia elétrica, permitindo a parametrização manual de variáveis como tipo de combustível, temperatura de operação e quantidade de insumos utilizados. Os dados obtidos são processados por uma lógica de cálculo responsável por estimar as emissões associadas ao processo, considerando condições ideais de operação. Os resultados demonstram que a utilização de sistemas de automação para estimativas indiretas de emissões possibilita maior assertividade no planejamento ambiental e energético, sem a necessidade de sensores específicos para medição direta de gases. Conclui-se que o protótipo desenvolvido apresenta potencial de aplicação acadêmica e industrial, contribuindo para práticas mais eficientes e sustentáveis no contexto da automação industrial.

Palavras-chave: Automação industrial; Gerenciamento integrado de carbono; emissões de CO₂; Sustentabilidade industrial; Consumo energético..

¹ Isis Alves Nunis Bordinassi

² Wesley Candido da Silva

INTEGRATED CARBON MANAGEMENT APPLIED TO INDUSTRIAL AUTOMATION: Development of a functional prototype

ABSTRACT

The growing demand for more sustainable industrial practices has increased the need for tools capable of supporting carbon emissions management in production processes. In this context, this paper presents the development of a functional industrial automation prototype focused on Integrated Carbon Management, aimed at the indirect estimation of carbon dioxide (CO₂) emissions in a simulated industrial process. The system was designed to support operational planning and decision-making related to carbon credit acquisition by integrating process parameters and energy consumption data. The adopted methodology involved the implementation of an automated system composed of a programmable logic controller, a human-machine interface, frequency inverters, and an electrical energy multimeter, allowing manual parameterization of variables such as fuel type, operating temperature, and quantity of raw materials used. The collected data are processed through a calculation logic responsible for estimating emissions under ideal operating conditions. The results indicate that the use of industrial automation systems for indirect emissions estimation enables greater accuracy in environmental and energy planning without the need for specific gas emission sensors. It is concluded that the developed prototype presents potential for both academic and industrial applications, contributing to more efficient and sustainable practices in the field of industrial automation.

Key words: industrial automation; integrated carbon management; CO₂ emissions; industrial sustainability; energy consumption.

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais das atividades industriais tem impulsionado a busca por soluções que promovam maior eficiência produtiva aliada à redução das emissões de gases de efeito estufa. Entre esses gases, o dióxido de carbono (CO_2) destaca-se como um dos principais responsáveis pelo aquecimento global, estando fortemente associado a processos industriais intensivos em energia e ao uso de combustíveis fósseis. Nesse cenário, torna-se cada vez mais relevante o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem as indústrias no gerenciamento de suas emissões de carbono.

Tradicionalmente, a quantificação das emissões de CO_2 é realizada por meio de sensores específicos e sistemas de monitoramento direto, os quais, apesar de eficazes, podem apresentar elevado custo de implantação e manutenção. Em contrapartida, abordagens baseadas em estimativas indiretas, fundamentadas em parâmetros operacionais, consumo energético e características dos insumos utilizados, surgem como alternativas viáveis para o planejamento ambiental e a tomada de decisão estratégica, especialmente no que se refere à aquisição de créditos de carbono.

Nesse contexto, a automação industrial assume papel fundamental ao possibilitar a integração de dados operacionais, energéticos e de processo em uma única plataforma, favorecendo análises mais consistentes e antecipadas sobre o comportamento ambiental dos sistemas produtivos. A utilização de controladores lógicos programáveis, interfaces homem-máquina e dispositivos de medição de energia permite estruturar sistemas capazes de apoiar o gerenciamento integrado de carbono, mesmo em cenários nos quais a medição direta das emissões não é realizada.

Diante disso, o presente artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um protótipo funcional de automação industrial aplicado ao Gerenciamento Integrado de Carbono, voltado à estimativa indireta de emissões de CO_2 em um processo industrial simulado. A proposta justifica-se pela necessidade de ferramentas acessíveis e didáticas que auxiliem no planejamento da produção e na

compra mais assertiva de créditos de carbono, contribuindo para práticas industriais mais sustentáveis e alinhadas às demandas ambientais atuais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste estudo tem por finalidade apresentar e contextualizar os principais conceitos relacionados às emissões de dióxido de carbono no ambiente industrial, às metodologias de estimativa indireta de emissões, ao papel da automação industrial no apoio à sustentabilidade e aos fundamentos do Gerenciamento Integrado de Carbono. A revisão da literatura técnica e científica permite estabelecer o embasamento conceitual necessário para a compreensão da proposta desenvolvida neste artigo, sem a inclusão de dados experimentais, experiências práticas ou resultados do estudo.

2.1 Emissões de dióxido de carbono na indústria

As atividades industriais desempenham papel significativo nas emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), especialmente em setores intensivos em energia e no uso de combustíveis fósseis. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, as emissões industriais representam parcela expressiva dos gases de efeito estufa, sendo diretamente influenciadas pelo tipo de combustível empregado, pela eficiência energética dos processos e pelas condições operacionais das plantas industriais (IPCC, 2019).

No contexto industrial, a geração de CO₂ está associada tanto às reações químicas dos processos produtivos quanto ao consumo de energia elétrica necessária para a operação de máquinas e equipamentos. Dessa forma, a análise das emissões deve considerar não apenas os insumos utilizados, mas também o perfil energético do sistema produtivo, uma vez que o consumo de energia está diretamente relacionado à intensidade de carbono da produção (IEA, 2018).

Diante desse cenário, torna-se fundamental o desenvolvimento de metodologias que permitam estimar as emissões de carbono de forma confiável, auxiliando as indústrias no atendimento às exigências ambientais e na adoção de práticas mais sustentáveis.

2.2 Estimativas indiretas de emissões de CO₂

A quantificação das emissões de CO₂ pode ser realizada por meio de medições diretas ou por estimativas indiretas baseadas em parâmetros operacionais. As estimativas indiretas utilizam informações como tipo de combustível, quantidade de insumos consumidos, tempo de operação e consumo energético para calcular as emissões associadas a determinado processo produtivo (WBCSD, 2016).

De acordo com diretrizes internacionais, como as propostas pelo IPCC, a utilização de fatores de emissão combinados com dados operacionais constitui uma abordagem amplamente aceita, especialmente em situações nas quais a medição direta das emissões não é viável ou economicamente justificável (IPCC, 2019). Essa metodologia permite obter valores representativos das emissões, desde que os parâmetros adotados sejam adequadamente definidos.

Além disso, estudos apontam que a integração de dados de consumo energético às estimativas de emissões contribui para maior precisão na avaliação do impacto ambiental dos processos industriais, uma vez que a energia elétrica consumida reflete diretamente o esforço operacional do sistema (IEA, 2018).

2.3 Automação industrial aplicada à sustentabilidade

A automação industrial tem sido amplamente utilizada como ferramenta de otimização de processos produtivos, proporcionando maior controle operacional, padronização e eficiência energética. A aplicação de sistemas automatizados permite a coleta, o processamento e a visualização de dados operacionais em tempo real, favorecendo análises mais consistentes e decisões fundamentadas (GROOVER, 2011).

No âmbito da sustentabilidade, a automação possibilita o monitoramento de variáveis relevantes ao desempenho ambiental, como consumo de energia, tempo de operação e utilização de recursos. A integração entre controladores lógicos programáveis, interfaces homem-máquina e dispositivos de medição de energia viabiliza a construção de sistemas capazes de apoiar estratégias de redução de impactos ambientais e de gerenciamento de emissões (BOLTON, 2015).

Dessa forma, a automação industrial apresenta-se como um elemento estratégico para o Gerenciamento Integrado de Carbono, ao permitir que dados

operacionais e energéticos sejam utilizados como base para estimativas de emissões e para o planejamento ambiental das atividades industriais.

2.4 Gerenciamento Integrado de Carbono

Além do atendimento às exigências ambientais, o Gerenciamento Integrado de Carbono permite às organizações incorporar a variável ambiental ao planejamento estratégico e operacional. Ao integrar informações sobre processos produtivos, consumo energético e fatores de emissão, essa abordagem favorece uma visão preventiva das emissões, contribuindo para decisões mais eficientes relacionadas à produção e à gestão de créditos de carbono. Dessa forma, o gerenciamento de carbono deixa de assumir caráter apenas corretivo e passa a atuar como elemento estratégico no contexto industrial contemporâneo (IPCC, 2019).

A obtenção de dados relacionados à quantidade de insumos processados pode ser realizada por meio de sistemas de pesagem industrial, amplamente utilizados em processos produtivos para controle de matéria-prima. Células de carga associadas a sistemas de condicionamento de sinal permitem a medição indireta de massas, fornecendo informações confiáveis para o monitoramento operacional e para a estimativa de indicadores ambientais. Quando integrados a sistemas de automação e supervisão, esses dispositivos contribuem para a aquisição estruturada de dados utilizados em modelos de Gerenciamento Integrado de Carbono (BOLTON, 2015).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de forma a possibilitar o desenvolvimento, a implementação e a análise de um protótipo funcional de automação industrial voltado ao Gerenciamento Integrado de Carbono, com base em estimativas indiretas de emissões de dióxido de carbono (CO₂). A pesquisa foi conduzida por meio de procedimentos experimentais e análise qualitativa dos dados obtidos a partir do funcionamento do sistema proposto.

3.1 Classificação da pesquisa

Quanto aos fins, a pesquisa caracteriza-se como aplicada, uma vez que visa ao desenvolvimento de uma solução prática voltada ao apoio ao planejamento operacional e ambiental no contexto industrial. Do ponto de vista dos objetivos, trata-

se de uma pesquisa exploratória e descritiva, pois busca explorar a aplicação da automação industrial no gerenciamento de emissões de carbono e descrever o funcionamento e o comportamento do sistema desenvolvido.

Quanto aos meios, a pesquisa enquadra-se como experimental, visto que envolve a construção de um protótipo funcional em bancada, bem como a realização de testes controlados para a simulação de um processo industrial. Adicionalmente, foi realizada pesquisa bibliográfica para embasar teoricamente o estudo, conforme apresentado na seção de fundamentação teórica.

3.2 Unidade de análise e ambiente da pesquisa

A unidade de análise deste estudo corresponde ao protótipo de automação industrial desenvolvido, o qual simula um processo produtivo inspirado em uma indústria cimenteira. O protótipo foi montado em bancada didática, em ambiente controlado, utilizando equipamentos de automação industrial e dispositivos elétricos comumente empregados em aplicações industriais.

O sistema simula o transporte de insumos por meio de três esteiras, representando etapas distintas do processo produtivo. O ambiente de bancada permitiu o controle das variáveis analisadas e a realização de testes de forma segura e repetível, sem interferências externas.

Os principais dispositivos utilizados na construção do protótipo de automação industrial são apresentados no Quadro 1, juntamente com suas respectivas quantidades, identificação técnica (part number) e funções no sistema.

Quadro1 - Principais componentes do protótipo de automação industrial

Dispositivo	Quantidade	Part number	Função no sistema
CLP	1	R04CPU	Processamento da lógica de controle e cálculo das emissões
Multimedidor de energia	1	ME96SSRB-MB	Medição do consumo energético do sistema
Inversor de frequência	1	FR-E820S-0050EPA-60	Acionamento do motor trifásico da esteira

Servo amplificador	2	MR-JE-20C	Controle dos servomotores das esteiras
Transformador de corrente	2	CW-5L 60/5A-IMP	Aquisição das correntes elétricas
IHM	1	GT2510-WXTSD	Supervisão, parametrização e visualização das emissões
Microcontrolador	2	Arduino UNO	Condicionamento e conversão de sinais

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os dispositivos apresentados no Quadro 1 foram selecionados de forma a possibilitar a integração entre controle lógico, acionamento elétrico, aquisição de dados operacionais e medição do consumo energético. A combinação desses elementos permitiu a construção de um sistema funcional e modular, capaz de fornecer as informações necessárias para a estimativa indireta das emissões de dióxido de carbono, conforme os procedimentos descritos nas seções subsequentes.

3.3 Coleta de dados e instrumentos utilizados

A coleta de dados ocorreu a partir do funcionamento do protótipo e da parametrização das variáveis de processo por meio da interface homem-máquina (IHM). Não foram utilizados questionários, entrevistas ou formulários, tampouco houve coleta de dados junto a indivíduos ou organizações externas.

As variáveis consideradas no sistema incluem a quantidade de insumos utilizados, o tipo de combustível selecionado, a temperatura de operação do processo e o consumo de energia elétrica das máquinas em funcionamento. A temperatura do processo foi simulada por meio de um potenciômetro, enquanto a escolha do tipo de combustível foi realizada diretamente na IHM. O consumo de energia elétrica foi obtido por meio de um multimedidor de energia elétrica da Mitsubishi Electric, integrado ao sistema de automação.

A medição das massas de calcário e de carvão foi realizada por meio de células de carga instaladas sob uma das esteiras transportadoras e no interior do forno simulado, respectivamente. Os sinais provenientes dessas células de carga foram condicionados utilizando o módulo HX711, responsável pela amplificação e conversão dos sinais. Em seguida, os dados foram processados por microcontroladores, que

realizaram a conversão das informações de massa em sinais do tipo PWM. Esses sinais foram posteriormente convertidos em níveis de tensão compatíveis com as entradas analógicas do controlador lógico programável (CLP), possibilitando a leitura e a visualização contínua dos valores de peso na interface homem-máquina.

O protótipo foi composto por um controlador lógico programável (CLP), uma interface homem-máquina, inversores de frequência, Servo amplificadores, esteiras transportadoras e dispositivos elétricos auxiliares, organizados em uma estrutura modular do tipo *plug and play*. A lógica de controle e de cálculo das emissões foi implementada no CLP, a partir dos parâmetros definidos pelo usuário.

3.4 Procedimentos experimentais

Os procedimentos experimentais consistiram na realização de testes controlados em bancada, nos quais diferentes combinações de parâmetros operacionais foram simuladas. Para cada cenário de operação, foram definidos valores de temperatura, tipo de combustível e quantidade de insumos, mantendo-se condições ideais de funcionamento do processo.

Durante os testes, o sistema registrou o consumo de energia elétrica das máquinas e processou os dados operacionais por meio de uma lógica de cálculo responsável por estimar as emissões indiretas de CO₂ associadas ao processo simulado. Os resultados obtidos foram apresentados na IHM, permitindo a visualização do impacto das variáveis operacionais na estimativa de emissões.

3.5 Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, com base na observação do comportamento do sistema frente às variações dos parâmetros operacionais definidos. Não foram aplicadas técnicas estatísticas ou análises quantitativas avançadas, uma vez que o objetivo do estudo não foi a validação numérica exata das emissões, mas a verificação da viabilidade da proposta e da coerência dos resultados apresentados pelo sistema.

Os dados obtidos foram utilizados para avaliar a capacidade do protótipo em apoiar o planejamento operacional e ambiental, bem como sua aplicabilidade como

ferramenta didática e de apoio à tomada de decisão no contexto do Gerenciamento Integrado de Carbono.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento do protótipo de automação industrial apresentado neste artigo demonstrou a viabilidade de empregar sistemas automatizados para o monitoramento operacional e a estimativa indireta de emissões de dióxido de carbono (CO₂) em um processo industrial simulado. Os resultados obtidos são discutidos à luz dos objetivos propostos, considerando o funcionamento global do sistema, a integração entre os dispositivos de automação e a visualização das informações operacionais por meio da interface homem-máquina.

O protótipo apresentou funcionamento estável durante os testes realizados em bancada, permitindo a simulação contínua de um processo inspirado na indústria cimenteira por meio de três esteiras transportadoras, as quais representam etapas distintas do fluxo produtivo. A disposição física dessas esteiras e sua integração mecânica podem ser observadas na Figura 1, evidenciando o transporte sequencial dos insumos ao longo do processo simulado.

Figura 1 – Conjunto das três esteiras transportadoras que compõem o processo simulado

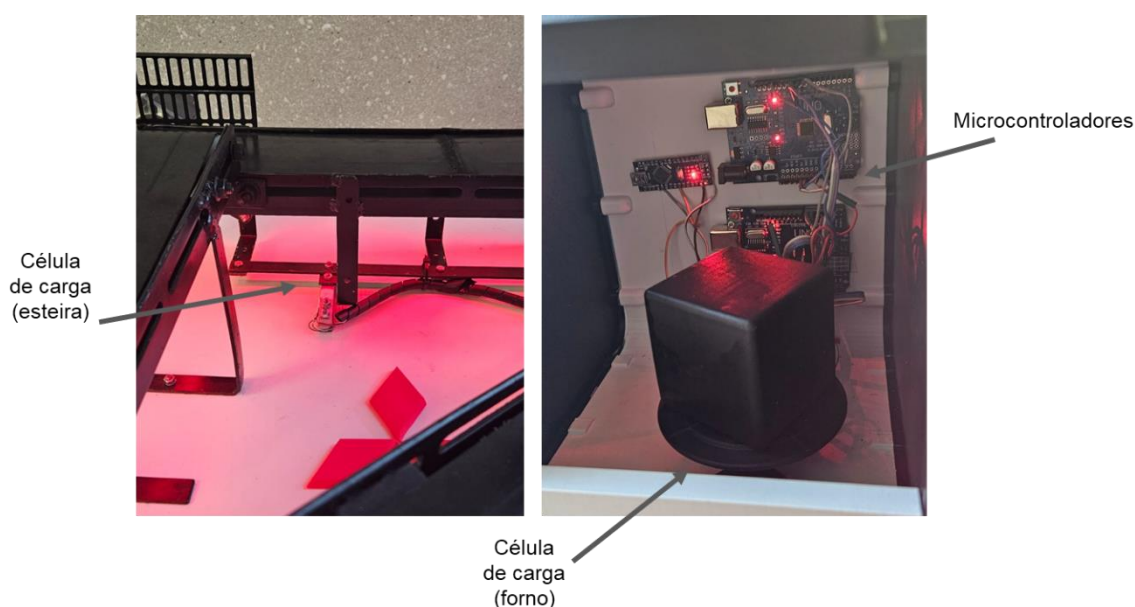


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A configuração apresentada na Figura 1 permite compreender a lógica de funcionamento do sistema, uma vez que o deslocamento dos materiais ocorre de forma contínua e controlada, reproduzindo, em escala didática, o fluxo típico de um processo industrial cimenteiro. Essa organização contribui para a clareza da simulação e para a análise do impacto das variáveis operacionais ao longo do processo.

A medição das quantidades de calcário e de carvão utilizadas no processo simulado foi realizada por meio de células de carga instaladas sob uma das esteiras transportadoras e no interior do forno simulado, respectivamente. Essas células são responsáveis pela aquisição dos dados de massa dos insumos empregados no processo, permitindo o acompanhamento contínuo dessas variáveis durante a operação do sistema. A disposição das células de carga, bem como dos microcontroladores utilizados para a aquisição e o condicionamento dos sinais de massa, é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Células de carga utilizadas para a medição das massas de calcário e carvão e microcontroladores empregados na aquisição dos sinais.



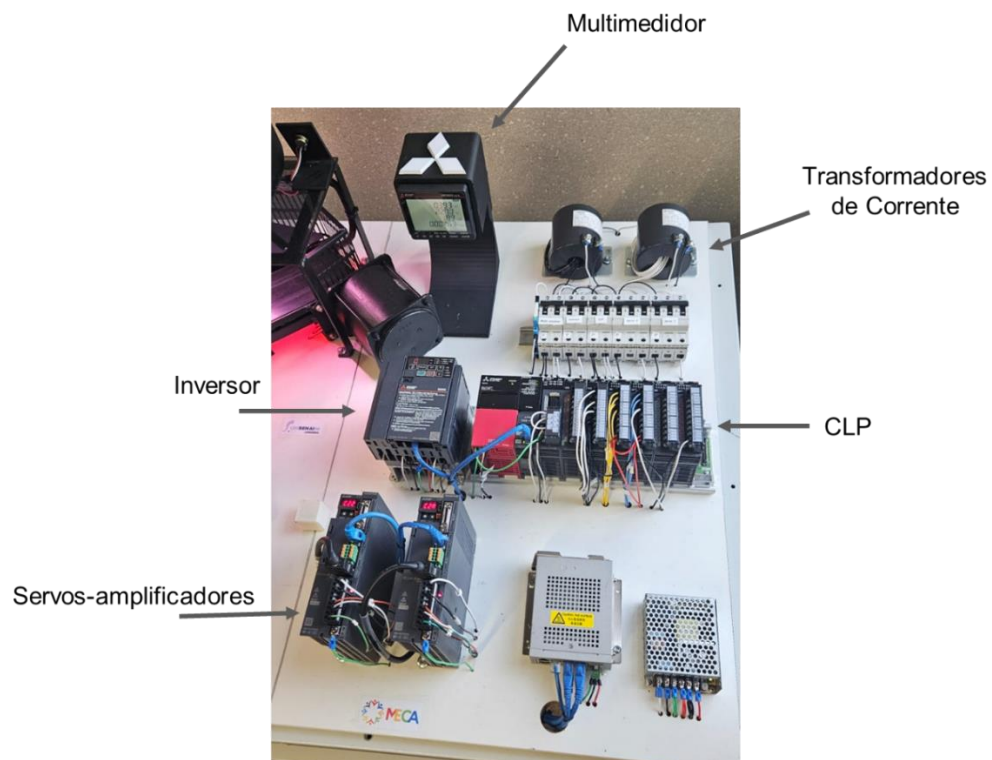
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A utilização das células de carga possibilitou a obtenção contínua dos dados de massa dos insumos, os quais são essenciais para a lógica de estimativa indireta

das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Esses dados físicos do processo permitem a correlação entre a quantidade de material processado, o tipo de combustível selecionado e o impacto ambiental associado ao funcionamento do sistema simulado, contribuindo para uma análise mais coerente e fundamentada das emissões.

O processamento central dos dados e o controle do funcionamento do protótipo foram realizados por meio de um painel de automação fixado diretamente à estrutura física do sistema, configurado de forma horizontal e integrado à bancada experimental. Nesse painel estão concentrados o controlador lógico programável (CLP), um inversor de frequência destinado ao acionamento de um motor trifásico, dois Servo amplificadores responsáveis pelo controle dos servomotores das esteiras, dois transformadores de corrente (TCs) e um multimetror de energia elétrica. Esses dispositivos encontram-se identificados na Figura 3 por meio de setas e rótulos explicativos.

Figura 3 – Painel de automação fixado à estrutura do protótipo, com identificação dos principais dispositivos de controle, acionamento e medição de energia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A função principal desse conjunto é centralizar a aquisição, o processamento e a integração dos dados operacionais e energéticos do sistema, permitindo que o consumo de energia elétrica associado ao funcionamento dos motores e atuadores seja incorporado à lógica de estimativa indireta das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Dessa forma, o painel de automação atua como o núcleo do sistema de Gerenciamento Integrado de Carbono, viabilizando a correlação entre a operação industrial, o consumo energético e os impactos ambientais do processo simulado.

A interação do usuário com o sistema ocorre por meio da interface homem-máquina (IHM), a qual é responsável pela parametrização das variáveis operacionais e pela visualização dos resultados do processo simulado. Por meio dessa interface, o operador pode definir condições de operação e acompanhar, em tempo real, os impactos dessas escolhas na estimativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂). A Figura 4 apresenta a tela da IHM destinada à seleção do tipo de carvão utilizado no processo.

Figura 4 – Tela da interface homem-máquina para seleção do tipo de carvão



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A seleção do tipo de carvão na interface possibilita ao usuário visualizar suas propriedades energéticas e os respectivos fatores de emissão associados. Assim, ao alterar o combustível empregado no processo simulado, o sistema ajusta automaticamente os parâmetros utilizados no cálculo das emissões, permitindo a análise comparativa entre diferentes cenários operacionais.

Além da seleção do combustível, a interface homem-máquina (IHM) disponibiliza uma tela principal de controle do sistema, por meio da qual é possível acompanhar o funcionamento geral do processo simulado. Nessa tela são apresentados os valores de massa dos insumos, a temperatura simulada do forno e o estado operacional das esteiras e dos equipamentos associados. A Figura 5 apresenta a tela principal de supervisão do sistema, na qual estão consolidadas as principais informações operacionais do protótipo.

Figura 8 – Tela principal de supervisão do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A tela principal de supervisão centraliza as informações operacionais do sistema, permitindo o acompanhamento em tempo real do processo durante os testes realizados em bancada. Essa visualização integrada contribui para maior clareza na interpretação dos dados, além de favorecer a confiabilidade da operação e a validação do comportamento do sistema frente às variações dos parâmetros definidos pelo usuário.

Por fim, a interface homem-máquina disponibiliza uma tela específica destinada à visualização das estimativas de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e ao apoio à tomada de decisão relacionada à aquisição de créditos de carbono. A Figura 6 apresenta essa tela, na qual são consolidados os resultados do processamento das variáveis operacionais e energéticas do sistema.

Figura 9 – Tela da interface homem-máquina para visualização das emissões estimadas e apoio à compra de créditos de carbono.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A consolidação das informações nessa tela permite correlacionar variáveis operacionais, consumo energético e fatores de emissão, fornecendo subsídios para uma compra mais assertiva de créditos de carbono. Dessa forma, o protótipo evidencia o potencial da automação industrial como ferramenta de apoio ao Gerenciamento Integrado de Carbono, mesmo quando baseado em estimativas indiretas obtidas a partir de parâmetros controláveis do processo simulado.

A visualização integrada das variáveis operacionais e das emissões estimadas contribui para a compreensão do impacto das decisões operacionais sobre o desempenho ambiental do processo, alinhando-se aos princípios do Gerenciamento Integrado de Carbono.

Os testes e a validação do protótipo foram realizados no contexto da competição MECA Brasil 2025, a qual proporcionou um ambiente externo de demonstração tecnológica e avaliação funcional do sistema. Nesse cenário, foi possível comprovar a robustez da lógica implementada, a clareza das informações apresentadas na interface homem-máquina e a aplicabilidade da abordagem de estimativa indireta das emissões de dióxido de carbono.

Como resultado dessa avaliação, o protótipo desenvolvido obteve **a segunda colocação em nível nacional** na competição, evidenciando seu desempenho técnico, sua coerência conceitual e seu potencial como ferramenta de apoio ao planejamento operacional e ambiental. Dessa forma, a participação na MECA Brasil 2025 configura-se como um dos resultados do desenvolvimento do protótipo, reforçando sua aplicabilidade tanto em contextos educacionais quanto demonstrativos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do protótipo de automação industrial apresentado neste artigo demonstrou a viabilidade da aplicação de sistemas automatizados para o monitoramento operacional e a estimativa indireta de emissões de dióxido de carbono (CO₂) em um processo industrial simulado. Os objetivos propostos foram alcançados, uma vez que foi possível integrar variáveis de processo, consumo energético e parâmetros operacionais em uma plataforma única de supervisão e análise.

A adoção de uma abordagem indireta para a estimativa das emissões, baseada na quantidade de insumos utilizados, no tipo de combustível selecionado, na temperatura do processo e no consumo de energia elétrica das máquinas, mostrou-se adequada para fins de planejamento operacional e ambiental. Essa estratégia possibilita a antecipação dos impactos ambientais associados ao processo produtivo, contribuindo para uma gestão mais assertiva da aquisição de créditos de carbono, sem a necessidade do emprego de sensores específicos para a medição direta de gases.

Os resultados obtidos evidenciam que a automação industrial pode atuar como uma ferramenta estratégica no contexto da sustentabilidade, especialmente quando aplicada ao Gerenciamento Integrado de Carbono. O caráter modular, organizado e didático do protótipo reforça sua aplicabilidade em ambientes acadêmicos, de treinamento e de demonstração tecnológica, bem como seu potencial de adaptação a cenários industriais reais.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do modelo de estimativa de emissões, contemplando diferentes condições operacionais, outros tipos de combustíveis e distintos níveis de eficiência energética, além da integração

com bases de dados externas ou sistemas corporativos de gestão ambiental. Tais aprimoramentos podem contribuir para o aumento da precisão das estimativas e para a consolidação da proposta como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão no âmbito da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

BOLTON, William. *Instrumentação e controle*. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

GROOVER, Mikell P. *Automação industrial e sistemas de manufatura*. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Technology roadmap: low-carbon transition in the cement industry*. Paris: IEA, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Geneva: IPCC, 2019.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). *Cement industry energy and CO₂ performance: getting the numbers right*. Geneva: WBCSD, 2016.

mitsubishi electric corporation. *Power monitoring products: energy meters and power measurement solutions*. Tokyo: Mitsubishi Electric Corporation, 2022.