

# MITIGANDO O CUSTO DA INAÇÃO: UM FRAMEWORK ESTRATÉGICO PARA GESTÃO ENERGÉTICA EM ECONOMIAS INDUSTRIAIS EMERGENTES

MITIGATING THE COST OF INACTION: A STRATEGIC FRAMEWORK FOR  
ENERGY MANAGEMENT IN EMERGING INDUSTRIAL ECONOMIES

Engenharias • 18/03/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/773813900](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/773813900)

---

Aline Lucena Prado Tixiliski<sup>1</sup>  
Ana Clara Augusto Jesus<sup>2</sup>  
André Luiz Salvat Moscato<sup>3</sup>  
Armando Paulo da Silva<sup>4</sup>  
Cintya Wedderhoff Machado<sup>5</sup>  
Daniele Aparecida de Oliveira<sup>6</sup>  
Daniela Mendonça de Oliveira<sup>7</sup>  
Eduardo Filgueiras Damasceno<sup>8</sup>  
Eduardo Pegoraro Heinemann<sup>9</sup>  
Fábio Rodrigo Milanez<sup>10</sup>  
Francisco de Assis Scannavino Junior<sup>11</sup>  
Márcio Mendonça<sup>12</sup>  
Marco Antonio Ferreira Finocchio<sup>13</sup>  
Paulo Alexandre Lourenço Jesus<sup>14</sup>  
Rafaella Brunet Moreira Elias<sup>15</sup>  
Ricardo Breganon<sup>16</sup>  
Rodrigo Henrique Cunha Palácios<sup>17</sup>  
Vitor Blanc Milani<sup>18</sup>  
Wagner Fontes Godoy<sup>19</sup>

---

## RESUMO

A presente pesquisa investiga a convergência estratégica entre a Gestão Energética Inteligente e Indústria 4.0 no Brasil, abordando a necessidade de otimização dos recursos energéticos no cenário industrial contemporâneo, impulsionada pelas crescentes demandas por eficiência e sustentabilidade. Estima-se que a inércia tecnológica acarrete perdas de R\$ 85,18 bilhões anuais à indústria nacional. O objetivo deste estudo é propor um modelo que minimize o custo de inação no Brasil, decorrente da não implementação de práticas avançadas de gestão energética e tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Para tanto, emprega-se uma abordagem metodológica que combina revisão bibliográfica sistemática, análise comparativa de indicadores, legislações vigentes em países desenvolvidos e a identificação de lacunas no contexto brasileiro. Utilizando o protocolo *PRISMA* para revisão, e o Método Delphi para validação, o estudo propõe o *framework* MMCIIB, essencial para mitigar as perdas estimadas, suprimindo lacunas regulatórias e tecnológicas. A síntese dos resultados demonstra que a gestão energética proativa, aliada à capacitação técnica, constitui uma alternativa viável para reduzir a intensidade energética nacional e alinhar o Brasil aos padrões de eficiência das economias desenvolvidas, e futuros estudos são sugeridos.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0; Gestão Energética Inteligente; Custo de Inação; Framework MMCIIB; Sustentabilidade Industrial; Método Delphi

## ABSTRACT

*This research investigates the strategic convergence between Smart Energy Management and Industry 4.0 in Brazil, addressing the need for energy resource optimization in the contemporary industrial landscape, driven by increasing demands for efficiency and*

*sustainability. It is estimated that technological inertia results in annual losses of BRL 85.18 billion for the national industry. The objective of this study is to propose a model to minimize the cost of inaction in Brazil, arising from the non-implementation of advanced energy management practices and Industry 4.0 enabling technologies. To this end, a methodological approach is employed that combines a systematic literature review, comparative analysis of indicators, current legislation in developed countries, and the identification of gaps within the Brazilian context. Using the PRISMA protocol for the review and the Delphi Method for validation, the study proposes the MMCIIB framework, which is essential for mitigating the estimated losses by addressing regulatory and technological gaps. The synthesis of the results demonstrates that proactive energy management, combined with technical training, constitutes a viable alternative to reduce national energy intensity and align Brazil with the efficiency standards of developed economies. Future studies are suggested.*

**Keywords:** Industry 4.0; Smart Energy Management; Cost of Inaction; MMCIIB Framework; Industrial Sustainability; Delphi Method

## **1. INTRODUÇÃO**

A revolução industrial cunhada como Indústria 4.0, caracteriza-se pela integração de tecnologias digitais avançadas, como inteligência artificial, internet das coisas (*IoT*), *big data* e computação em nuvem, transformando radicalmente os processos produtivos e os modelos de negócio (Schwab, 2016).

Nesse cenário em constante evolução, a gestão energética assume um papel estratégico, transcendendo a redução de custos

operacionais tornando-se um pilar da sustentabilidade e competitividade industrial (Costa & Vieira, 2019). A gestão energética inteligente emerge como um paradigma que emprega essas tecnologias de ponta para monitorar, analisar e otimizar o consumo de energia em tempo real, gerando *insights* valiosos para a tomada de decisão e a implementação de ações corretivas e preditivas.

A negligência em integrar tais tecnologias impõe o que este estudo define como custo de inação, que diante dessa convergência tecnológica e gerencial impõe um custo significativo, manifesto não apenas em perdas financeiras diretas, mas também na obsolescência tecnológica, na perda de competitividade e no não cumprimento de metas de sustentabilidade, conforme apontado por autores como Porter & Heppelmann (2014) ao discutirem o valor da interconexão e dos produtos inteligentes.

O contexto brasileiro, embora potencialmente produtivo, enfrenta desafios estruturais e conjunturais que dificultam a plena adoção desses paradigmas. A infraestrutura energética apresenta vulnerabilidades, a regulamentação é frequentemente percebida como um obstáculo, e o nível de maturidade digital da indústria nacional varia drasticamente entre os setores (BNDES, 2018).

Essa heterogeneidade resulta em uma lacuna tecnológica e de gestão que, se não abordada proativamente, pode acarretar um custo de inação cada vez maior, inviabilizando a participação do Brasil em cadeias de valores globais mais exigentes no que tange à eficiência e responsabilidade ambiental (Silva & Oliveira, 2020).

Desse modo, a presente investigação busca não apenas descrever a convergência entre a gestão energética inteligente e a Indústria 4.0,

mas propor um modelo conceitual que atue como um roteiro para mitigar os custos associados à inércia na adoção dessas práticas e tecnologias no Brasil. A relevância do tema reside na busca pelo preparo da indústria brasileira, para os desafios do século XXI, garantindo sua sustentabilidade e competitividade em um mercado global cada vez mais dinâmico e exigente.

Como objetivo geral, este trabalho propõe um modelo de mitigação do custo de inação no Brasil, resultante da falta de integração entre gestão energética inteligente e os pilares da Indústria 4.0. Para alcançar esse objetivo, a pesquisa se desdobra em metas específicas, que incluem a análise da implementação da gestão energética inteligente e da Indústria 4.0 em países desenvolvidos, bem como a avaliação dos indicadores de desempenho e suas respectivas estruturas regulatórias (Marr, 2018).

Além disso, busca-se identificar as divergências entre as legislações brasileiras e as de países líderes nesses campos, trazendo um panorama claro dos desafios e oportunidades. A fundamentação teórica é construída sobre os pilares da Indústria 4.0, sistemas de gestão energética (SGE), conceitos de custo de inação e estratégias de sustentabilidade industrial, conforme abordado por autores como Lasi et al. (2014) e Borsekova et al. (2018), que ressaltam a importância da interconexão de sistemas e da coleta e análise de dados para otimização de processos.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Discussão Global Sobre Gestão Energética Inteligente e Indústria 4.0**

A interseção entre a Gestão Energética Inteligente (GEI) e a Indústria 4.0 é um vetor para a sustentabilidade e a competitividade industrial em escala global, com destaque para os países desenvolvidos (Wobbe, 2017).

Na Alemanha, berço da Indústria 4.0, observa-se uma adoção de sistemas ciberfísicos (*CPS*), *IoT* e análise de *big data* para otimizar o consumo de energia em processos de fabricação. Empresas alemãs têm implementado redes inteligentes (*smart grids*) dentro de suas instalações, integrando produção, consumo e armazenamento de energia de forma autônoma e otimizada, conforme evidenciado pelo caso da iniciativa *Plattling Smart Grid*, que demonstra a capacidade de integrar fontes renováveis e reduzir picos de demanda (Eberhardt et al., 2019).

Essa integração além de reduzir a pegada de carbono, provê resiliência energética diminuindo custos operacionais, elementos importantes em um mercado com preços de energia voláteis e em constante flutuação.

Nos Estados Unidos, a tendência é similar, impulsionada por políticas de incentivo e pela forte presença de empresas de tecnologia e *startups*. A *GEI*, capitaliza a vasta capacidade de processamento de dados e a sofisticação da internet das coisas para monitorar o uso de energia em instalações industriais e prediais (Ghanadpour et al., 2017).

Plataformas de análise preditiva, utilizando algoritmos de inteligência artificial, conseguem antecipar falhas em equipamentos e otimizar horários de operação para aproveitar tarifas de energia

mais baixas, promovendo uma gestão dinâmica da demanda (*demand response*).

A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (*EPA*) tem promovido programas como o *ENERGY STAR* para indústrias, que fornecem ferramentas e *benchmarks* para melhorar a eficiência energética, contribuindo para reduções significativas no gasto energético e nas emissões de gases de efeito estufa. A inovação tecnológica e o investimento em pesquisa e desenvolvimento são pilares que sustentam essa evolução, refletindo-se em patentes e publicações científicas que demonstram o avanço contínuo do setor (Narasimhan et al., 2018).

Adicionalmente, países asiáticos como a Coreia do Sul e o Japão se destacam na aplicação da Indústria 4.0 para a gestão energética. A Coreia do Sul, com sua forte indústria de semicondutores e automotiva, tem integrado sistemas de gestão energética baseados em inteligência artificial para otimizar o uso de eletricidade em fábricas complexas, focando na minimização de perdas e na maximização da produtividade energética (Lee & Park, 2020).

O Japão, impulsionado pela necessidade de segurança energética e pela busca por soluções inovadoras após desastres naturais, investe maciçamente em *microgrids* inteligentes e sistemas de armazenamento de energia, integrando-os com princípios da Indústria 4.0 para criar fábricas resilientes e energeticamente autossuficientes.

A cultura de *Kaizen*, de melhoria contínua, se estende à gestão energética, levando a otimizações incrementais e contínuas que resultam em eficiência ao longo do tempo (Iwata, 2016). Os

indicadores desses países apontam para uma alta taxa de adoção de tecnologias de automação e digitalização, traduzindo-se em índices de intensidade energética em constante declínio e maior aproveitamento de fontes renováveis.

O comparativo com indicadores brasileiros revela uma defasagem considerável, sob uma ótica sociotécnica e econômica. Enquanto na Alemanha, por exemplo, a intensidade energética industrial (consumo de energia por unidade de produto ou valor adicionado) tem diminuído substancialmente, no Brasil, apesar de avanços pontuais, a taxa de redução é mais lenta e irregular (IEA, 2023).

A participação da Indústria 4.0 nos processos produtivos em países desenvolvidos, que pode chegar a 30% ou mais em setores específicos, contrasta com uma média brasileira ainda tímida, estimada em menos de 10% para a maioria dos setores, de acordo com estudos recentes da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2023). Essa discrepância se reflete diretamente na eficiência energética, pois a digitalização e a automação oferecem ferramentas para a otimização do consumo, impactando diretamente a competitividade global da indústria nacional.

Apesar da alta participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, esta não se traduz automaticamente em eficiência energética industrial. A Sociologia da tecnologia ajuda a compreender que a mera existência de recursos não garante sua utilização eficaz (Latour, 1996).

A falta de investimento em infraestrutura digital avançada (como 5G industrial) e a escassez de mão de obra qualificada para as novas

tecnologias 4.0, conforme apontado pela *OECD* (2023), representam barreiras sociotécnicas significativas.

Economicamente, a taxa de juros elevada e a alta carga tributária no Brasil desincentivam investimentos de longo prazo em modernização e digitalização, tornando o retorno sobre o investimento em Indústria 4.0 menos atrativo em comparação com outros países, conforme análises de especialistas em economia empresarial (Barro, 2013).

Desse modo, o Brasil permanece em uma espiral de dependência tecnológica e baixa agregação de valor, enquanto economias mais avançadas colhem os frutos da inovação e da eficiência produtiva.

No âmbito legislativo, as diferenças são mais acentuadas e explicam, em grande parte, muitas das disparidades encontradas nos indicadores de desempenho. Em países como a Alemanha, a legislação de eficiência energética, como a Lei de Serviços de Energia (*Energieeffizienzgesetz*), estabelece metas claras e obrigações para grandes empresas de realizarem auditorias energéticas e implementar sistemas de gestão de energia (*DIN EN ISO 50001*), oferecendo inclusive incentivos fiscais para tais ações (Hosseini & Shamsipour, 2018).

Na União Europeia, de forma similar, a Diretiva de Eficiência Energética (EED) impõe requisitos para o uso de energia em edifícios e indústrias, além de promover a implantação de medidores inteligentes (*European Commission, 2023*).

Nos Estados Unidos, embora não haja uma lei federal abrangente como na Europa, diversos estados e agências, como o Departamento de Energia (*DOE*), oferecem programas de incentivo,

padrões de desempenho e linhas de crédito para projetos de eficiência energética, complementados por normas técnicas e certificações que criam um ambiente favorável à inovação e à adoção de tecnologias avançadas (*US DOE, 2024*).

Em contraste, a legislação brasileira, embora tenha avançado em alguns aspectos, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), ainda não possui um arcabouço robusto e coercitivo quanto o de seus pares desenvolvidos (*EPE, 2023*). Apesar da existência de leis e regulamentos no Brasil, como a Lei nº 10.295/2001, que estabelece os níveis máximos de consumo específico de energia, e a recente Portaria MME nº 294/2021, que visa modernizar o setor elétrico, a aplicabilidade e o monitoramento dessas normas ainda enfrentam desafios.

As exigências para auditorias energéticas não são tão abrangentes, e os incentivos para a adoção de sistemas de gestão energética segundo a ISO 50001 são menos expressivos comparativamente, gerando um ambiente onde a eficiência energética é muitas vezes vista como um ônus e não como um investimento estratégico (*Gonçalves et al., 2017*).

Outra diferença reside na integração de políticas de Indústria 4.0 com a gestão energética. Em muitos países desenvolvidos, as estratégias nacionais de digitalização da indústria incluem o uso de tecnologias para aprimorar a eficiência energética, enquanto no Brasil, estas iniciativas são frequentemente tratadas de forma segmentada, dificultando a sinergia e a potencialização dos benefícios (*SEBRAE, 2024*).

A lacuna legislativa no Brasil, portanto, não apenas retarda a adoção de tecnologias, mas também fomenta um "custo de inação" que se manifesta na perda de competitividade e no desperdício de recursos energéticos, uma vez que a ausência de um *framework* que estimule a inovação não impulsiona as empresas a se adaptarem aos padrões globais de eficiência e sustentabilidade que se tornam rapidamente mandatórios nos mercados internacionais (Souza & Pereira, 2021).

Assim sendo, a proatividade regulatória e a coordenação entre as esferas governamental e industrial são fundamentais para transpor esses obstáculos e assegurar que o Brasil possa colher os frutos da convergência entre a Indústria 4.0 e a gestão energética inteligente, mitigando assim os custos associados à estagnação em um cenário econômico global cada vez mais exigente em termos de desempenho energético e ambiental.

## **2.2. Proposta de Um Modelo de Mitigação do Custo de Inação no Brasil**

A complexidade da transição brasileira para uma indústria energeticamente inteligente e alinhada aos preceitos da Indústria 4.0 demanda um modelo, capaz de endereçar as lacunas identificadas tanto em relação aos indicadores de performance quanto às estruturas legislativas em comparação com países desenvolvidos. O "Custo de Inação" é um conceito que mensura as perdas decorrentes da não implementação de uma ação ou estratégia considerada benéfica, e, no contexto atual, ele se manifesta como a perda de competitividade, o aumento dos custos operacionais e a deterioração da imagem empresarial face às crescentes demandas por sustentabilidade (Porter & Rivkin, 2012).

Portanto, o Modelo de Mitigação do Custo de Inação para a Indústria Brasileira (MMCIIB) proposto, foca na criação de um ecossistema que estimule a adoção de tecnologias 4.0 para otimizar a gestão energética, minimizando assim essas perdas silenciosas, porém significativas. O modelo é estruturado em três pilares interconectados: Pilar Regulatório e de Incentivos, Pilar Tecnológico e de Infraestrutura, e Pilar de Capacitação e Cultura, conforme a necessidade de interligar as diversas dimensões que abarcam a Indústria 4.0 e a gestão energética, buscando a sinergia entre elas (Chen et al., 2019).

O primeiro pilar do MMCIIB, Regulatório e de Incentivos, visa estabelecer um ambiente legal e econômico para fomento à inovação e à eficiência energética, tomando como base as melhores práticas internacionais.

Em contraste com a fragmentação atual da legislação brasileira, é proposto que o governo federal crie uma "Lei Nacional de Eficiência Energética e Indústria 4.0 Integrada", que não apenas estabeleça metas de redução de consumo energético para setores industriais específicos, mas vincule diretamente esses objetivos à adoção de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como *IoT*, inteligência artificial e análise de dados (Kagan & Rolheiser, 2015).

Essa lei poderia contemplar um sistema de incentivos fiscais, tais como depreciação acelerada para equipamentos de eficiência energética e sistemas de automação industrial, e subsídios para pesquisas e desenvolvimento em gestão energética inteligente. Adicionalmente, a criação de fundos de financiamento específicos com taxas de juros competitivas e garantias governamentais para projetos de modernização energética e digitalização industrial.

A experiência alemã com a *Energy Efficiency Act*, que obriga auditorias regulares e incentiva padrões como a ISO 50001, serve de referência, podendo o Brasil implementar um sistema semelhante, fazendo com que grandes consumidores de energia realizem diagnósticos energéticos periódicos e apresentem planos de melhoria baseados em soluções 4.0 (BMW, 2023).

A transparência e o acesso a dados de consumo energético, via plataformas digitais governamentais, poderiam também promover a comparação entre empresas (*benchmarking*), impulsionando a competição pela eficiência e facilitando a fiscalização.

O segundo pilar, tecnológico e de Infraestrutura, consiste na modernização da base tecnológica e a infraestrutura de suporte à indústria brasileira, permitindo a integração da gestão energética inteligente aos conceitos da Indústria 4.0. Envolvendo investimentos na expansão e melhoria da infraestrutura de conectividade, com atenção especialmente para o 5G industrial, fundamental para a Internet das Coisas (*IoT*) massiva e a comunicação de baixa latência entre dispositivos industriais (Ericsson, 2023).

A criação de "Centros de Excelência em Indústria 4.0 e Energia", em parceria com universidades, institutos de pesquisa e o setor privado, possibilitaria o desenvolvimento de soluções tecnológicas adaptadas à realidade brasileira, bem como para a formação de ecossistemas de inovação (Jasim & Ahmed, 2017).

Além disso, o investimento em segurança cibernética para proteger os dados sensíveis gerados por esses sistemas interconectados, assegurando a confiança, a resiliência das operações e evitando perdas financeiras e de reputação.

Considerando que a Indústria 4.0 depende de dados em nuvem e de conectividade, os riscos e custos de proteção tornam-se um diferencial crítico para o MMCIIB. Os ataques cibernéticos a infraestruturas industriais podem resultar em paradas de produção, perdas financeiras significativas, roubo de propriedade intelectual e até mesmo danos ecológicos e físicos (Schneier, 2015).

A proteção desses sistemas envolve camadas de segurança que incluem não apenas *softwares* e *firewalls*, mas também treinamento de pessoal, criptografia de dados, detecção de intrusões em tempo real por meio de IA, e planos de resposta a incidentes robustos (Cisco, 2023).

O terceiro pilar, Capacitação e Cultura, destaca a dimensão humana e organizacional, desenvolver programas de capacitação e requalificação da mão de obra industrial, para que os profissionais estejam aptos a operar e manter os sistemas da Indústria 4.0 e a interpretar os dados gerados pela gestão energética inteligente (ABNT NBR ISO 50001, 2018). Isso inclui o ensino de competências em análise de dados, programação, manutenção preditiva, segurança cibernética e gestão de plataformas *IoT* (Pérez -Romero et al., 2022).

Além disso, a promoção de uma "cultura de eficiência energética e inovação" nas empresas favorece, podendo ser alcançada através de campanhas de conscientização, programas de reconhecimento de boas práticas e a integração da eficiência energética como um valor central nas políticas corporativas (Martins et al., 2016).

Universidades e instituições de ensino técnico podem contribuir adaptando seus currículos para formar profissionais com as

competências demandadas por esse novo cenário industrial. O modelo, ao interligar esses três pilares – regulatório, tecnológico e humano –, busca criar um ciclo de inovação e melhoria contínua, visando não apenas a mitigação do custo de inação, mas também o posicionamento do Brasil como um ator relevante na economia global orientada pela Indústria 4.0 e pela sustentabilidade (Caetano et al., 2020).

Uma discussão da viabilidade econômica do MMCIIB para empresas de menor porte é ponto de destaque, pois estas representam a maioria do tecido industrial brasileiro e enfrentam desafios distintos das grandes corporações. Para PMEs, o alto investimento inicial em tecnologias 4.0 e em segurança cibernética pode ser um impedimento significativo (SEBRAE, 2024).

Contudo, o modelo MMCIIB pode ser adaptado para PMEs através de estratégias como a adoção de soluções modulares e escalonáveis, financiamentos subsidiados ou linhas de crédito específicas com prazos mais longos e juros reduzidos, e a criação de consórcios ou cooperativas para o compartilhamento de infraestrutura e serviços (como plataformas de nuvem e expertise em cibersegurança) (ABDI, 2023).

Além disso, investimentos em tecnologias com rápido retorno sobre o investimento (ROI), como em medidores inteligentes para monitoramento de consumo e sistemas de automação de processos específicos, pode ser o ponto de partida.

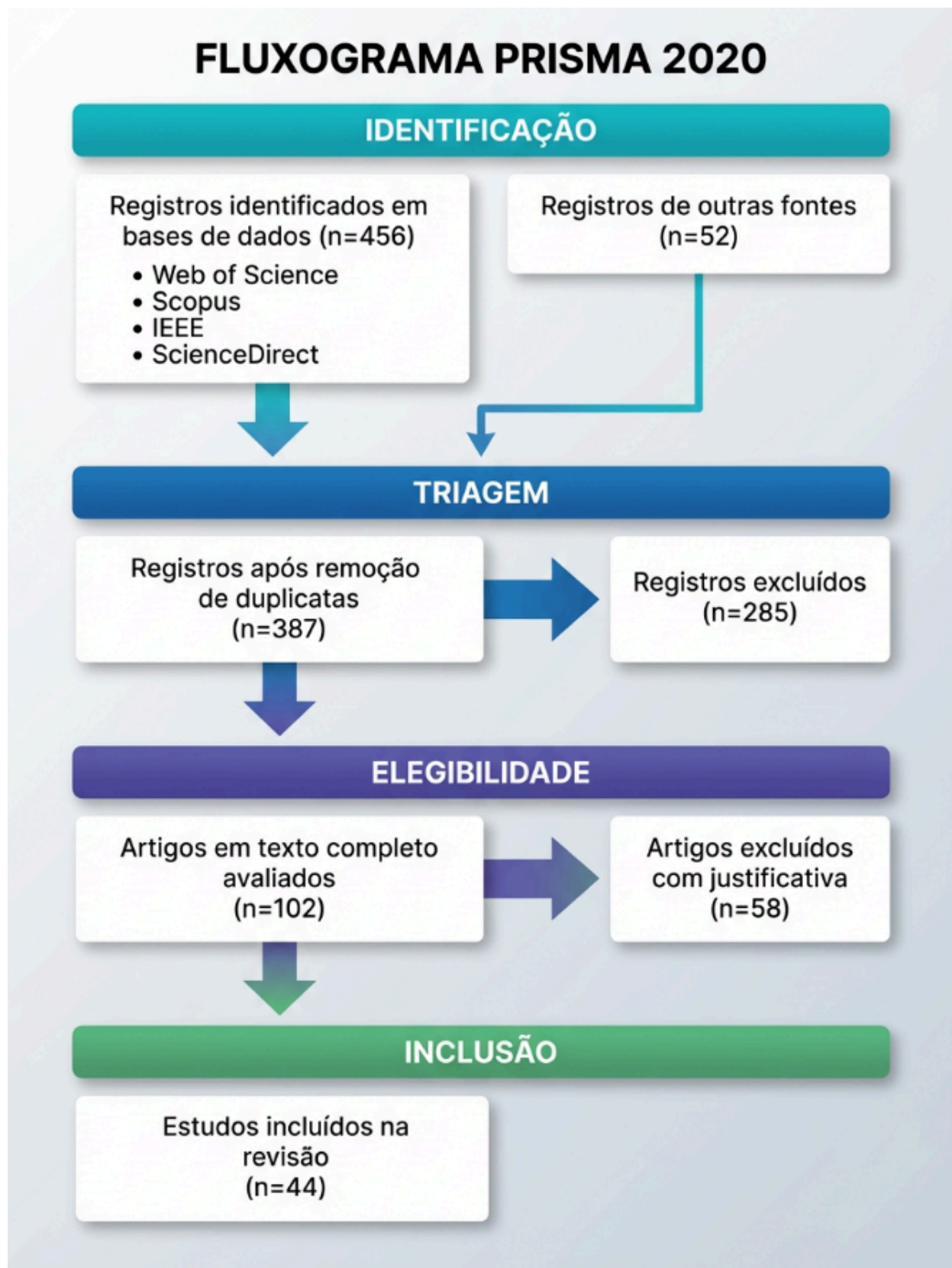
### **3. METODOLOGIA**

A elaboração deste trabalho de pesquisa baseia-se em uma abordagem combinada de revisão bibliográfica sistemática e análise

comparativa, com o propósito de assegurar rigor acadêmico e validade aos resultados obtidos. O protocolo *PRISMA* (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) foi empregado para conduzir a revisão sistemática da literatura. A aplicação serviu para mapear o conhecimento existente sobre a gestão energética inteligente e a Indústria 4.0 em contextos internacionais e nacionais, permitindo identificar as lacunas que justificam a proposta de um modelo específico para o Brasil (Page et al., 2021). A sequência de etapas do protocolo *PRISMA* pode ser visualizada no fluxograma conforme quadro 1, que detalha o processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos científicos.

**Quadro 1** – Fluxograma esquemático de obtenção dos estudos incluídos na síntese qualitativa

# FLUXOGRAMA PRISMA 2020



Fonte: Elaborado pelos autores

A condução da revisão bibliográfica sistemática, conforme o protocolo *PRISMA*, permite uma compreensão das tendências globais e das práticas consolidadas em gestão energética inteligente e Indústria 4.0 nos países desenvolvidos e a identificação das especificidades e desafios enfrentados pelo Brasil.

Os estudos selecionados fornecem a base empírica e teórica para a análise comparativa de indicadores e legislações, culminando na formulação do *framework* e na discussão do custo de inação. A combinação destas abordagens valida as proposições deste trabalho, fundamentado e direcionado às necessidades reais do contexto brasileiro (Denyer & Tranfield, 2009).

Para a validação prática do modelo proposto, no campo conceitual, será empregado o Método Delphi. Este método envolve a consulta a um painel de quinze a vinte especialistas nas áreas de gestão energética, Indústria 4.0, engenharia industrial e políticas públicas no Brasil. Os especialistas serão selecionados com base em sua experiência acadêmica e profissional, garantindo uma perspectiva abrangente e qualificada sobre a aplicabilidade e adequação do MMCIIB ao contexto brasileiro (Linstone & Turroff, 1975).

#### **4. COMPARAÇÃO DE DADOS: BRASIL VERSUS PAÍSES DESENVOLVIDOS**

**Quadro 1:** Intensidade Energética Industrial (IEI) e Adoção da Indústria 4.0 (2023/2024)

# INTENSIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL E INDÚSTRIA 4.0

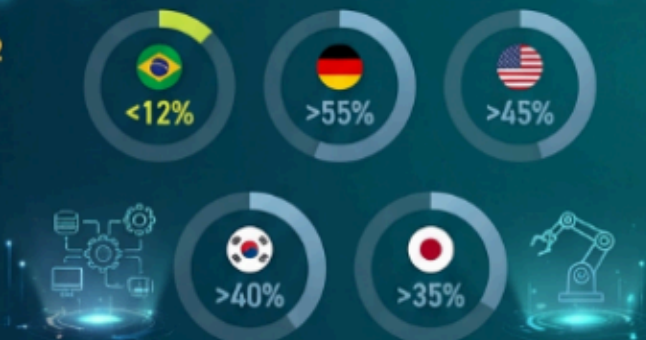
Brasil vs Países Desenvolvidos (2023/2024)



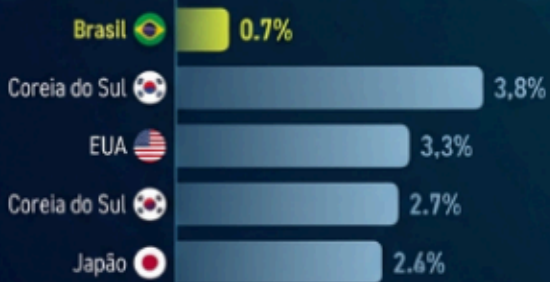
## Intensidade Energética Industrial (TJ/milhão USD)



## Adoção da Indústria 4.0



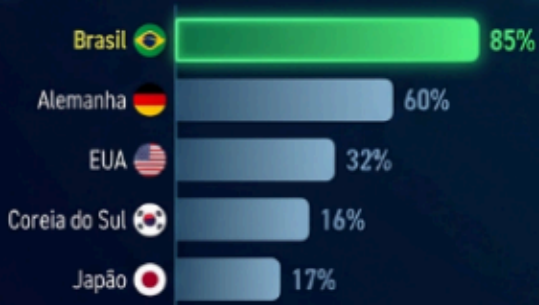
## Investimento em P&D Industrial (% do PIB)



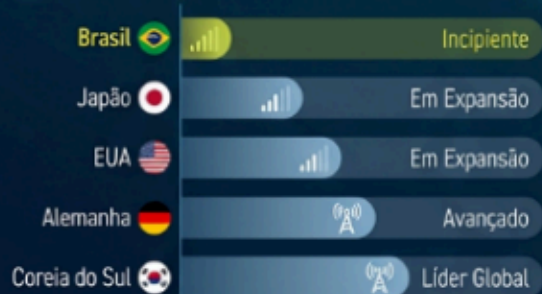
## Medidores Inteligentes na Indústria



## Participação de Energia Renovável



## 5G Industrial



Fonte: Elaborado pelos autores

A análise comparativa entre o Brasil e países desenvolvidos, como Alemanha, Estados Unidos, Coreia do Sul e Japão, permite contextualizar a proposta de mitigação do custo de inação.

Esta seção apresenta quadros detalhados com dados e indicadores que demonstram as disparidades na adoção de práticas no cenário brasileiro. Os dados foram compilados a partir de relatórios governamentais, organismos internacionais e estudos acadêmicos recentes, buscando a representatividade dos cenários de cada nação (*IEA, 2023 & World Bank, 2024 & ABDI, 2023 & CNI, 2023*).

O quadro 1 ilustra a disparidade na intensidade energética industrial, onde o Brasil apresenta um valor maior em comparação com os países desenvolvidos, indicando uma menor eficiência no uso da energia para a produção de valor adicionado. A adoção de projetos de Indústria 4.0 é mais baixa no Brasil, corroborando as análises de Diniz & Siqueira (2019) sobre os desafios da transformação digital na indústria nacional.

Esse fator é correlacionado com a capacidade de otimização dos sistemas de gestão energética. O baixo investimento em P&D industrial no Brasil, em contraste com as altas taxas dos países desenvolvidos, limita a inovação e o desenvolvimento de soluções próprias para a eficiência energética e a digitalização, conforme destaca Porter (1990) sobre a importância da inovação para a competitividade das nações.

O emprego de medidores inteligentes, para a gestão energética em tempo real, também é incipiente no contexto brasileiro. Embora o Brasil tenha uma alta participação de fontes renováveis na matriz elétrica total, o foco desta pesquisa é a aplicação na indústria e a capacidade de integrar essa energia com sistemas inteligentes, onde ainda há um *gap*, apesar do potencial (Souza & Pereira, 2021)

O quadro 2 revela as diferenças significativas nos arcabouços regulatórios e de incentivos entre o Brasil e os países desenvolvidos. Enquanto na Alemanha, por exemplo, existe uma legislação abrangente e coercitiva para a eficiência energética e fortes incentivos para a Indústria 4.0, a abordagem brasileira ainda é fragmentada e menos impositiva (Hosseini & Shamsipour, 2018; Kagan & Rolheiser, 2015).

A obrigatoriedade de auditorias energéticas e o incentivo à certificação ISO 50001 são mais prevalentes e incentivados nos países desenvolvidos, o que impulsiona a adoção de sistemas de gestão energética mais sofisticados.

As políticas nacionais de Indústria 4.0 em nações como Coreia do Sul e Japão são detalhadas e integradas, promovendo um ambiente propício para a convergência com a gestão energética inteligente (Lee & Park, 2020; Iwata, 2016).

**Quadro 2:** Ambientes Regulatório e de Incentivos para Eficiência Energética e Indústria 4.0 (2024)



**Fonte:** Elaborado pelos autores

## 5. MODELO DE MITIGAÇÃO DO CUSTO DE INAÇÃO PARA A INDÚSTRIA BRASILEIRA (MMCIIB)

O Modelo de Mitigação do Custo de Inação para a Indústria Brasileira (MMCIIB) é um *framework* dinâmico e interconectado, concebido para promover a integração da Gestão Energética Inteligente e da Indústria 4.0 no Brasil.

O quadro 3 a seguir ilustra a interação entre os três pilares centrais, regulatório e de Incentivos, Tecnológico e de Infraestrutura, e

Capacitação e Cultura e como eles se retroalimentam para impulsionar a transformação industrial.

### Quadro 3: Fluxograma do MMCIIB



Fonte: Elaborado pelos autores com base nas referências citadas

## 5.1. Cálculo do Custo de Inação

O cálculo do custo de inação representa a quantificação das perdas e oportunidades perdidas por não se adotar uma estratégia ou investimento que poderia gerar benefícios significativos.

No contexto da convergência entre a Gestão Energética Inteligente (GEI) e a Indústria 4.0 no Brasil, o custo de inação manifesta-se em diversas formas de prejuízo financeiro e não financeiro, incluindo custos operacionais elevados pela baixa eficiência energética, perda de competitividade no mercado global, e o não aproveitamento de tecnologias que poderiam impulsionar o crescimento.

A metodologia para estimar este custo envolve uma comparação entre o cenário atual de "Não Ação" (situação *status quo* no Brasil) e um "Cenário de Ação Otimizada" (representado pela implementação

do Modelo de Mitigação proposto, com base nas melhores práticas internacionais) (Porter & Rivkin, 2012).

Para o cálculo, consideram-se as seguintes variáveis e premissas, baseadas nos dados comparativos apresentados e na literatura existente, com atualização de dados para os últimos 10 anos:

**5.2. Potencial de Economia Energética (PEE):** Estimativa da economia percentual que a indústria brasileira poderia alcançar no consumo de energia se implementasse integralmente as tecnologias e práticas de *GEI* impulsionadas pela Indústria 4.0. Com base em relatórios de países desenvolvidos (*BMW*, 2023; *US DOE*, 2024) e estudos sobre o potencial brasileiro (ABDI, 2023), estimamos um PEE conservador de 18% no consumo energético industrial, considerando a média dos indicadores de países desenvolvidos.

**5.3. Custo Médio da Energia Industrial (CMEI):** O custo médio da energia elétrica para a indústria no Brasil, considerando componentes como tarifas, encargos e impostos. A ANEEL (2023) e a EPE (2023) fornecem dados relevantes, e o CMEI é estimado em R\$ 0,60/kWh para o ano de 2023, refletindo as flutuações e reajustes do setor.

**5.4. Consumo Anual de Energia Industrial (CAEI):** O consumo total anual de energia elétrica pelo setor industrial brasileiro. De acordo com a EPE (2023), o consumo de energia elétrica pelo setor industrial foi de aproximadamente 210 TWh (Terawatts-hora) em 2023.

**5.5. Custo da Obsolescência Tecnológica e Perda de Competitividade (COPC):** Este é um fator mais complexo de quantificar diretamente em valores monetários absolutos devido à

sua natureza multifacetada. No entanto, ele pode ser inferido pela diferença no crescimento de valor adicionado industrial entre o Brasil e países que já adotam a Indústria 4.0 (Marr, 2018).

O COPC é definido como a perda de margem de lucro e de valor de mercado que as indústrias brasileiras sofrem por não adotarem tecnologias mais eficientes e inovadoras, resultando em produtos e processos menos competitivos globalmente (Porter, 1990). Em vez de um percentual da receita, o COPC será aproximado como a diferença entre o crescimento potencial do valor adicionado da indústria brasileira (se implementasse amplamente a I4.0 e *GEI*, como nos países desenvolvidos) e o crescimento real.

Considerando o crescimento médio anual do valor adicionado industrial nos países desenvolvidos com I4.0 avançada em cerca de 2,5% superior ao do Brasil (*OECD, 2024; CNI, 2023*), e assumindo um valor adicionado bruto industrial do Brasil de R\$ 2,5 trilhões (IBGE, 2023), o COPC pode ser estimado da seguinte forma: Crescimento anual perdido = 2,5% do valor adicionado industrial COPC =  $0,025 \text{ R\$ } 2.500.000.000.000,00 = \text{R\$ } 62.500.000.000,00$  por ano (R\$ 62,5 bilhões).

Este cálculo, embora simplificado, reflete a oportunidade de valor adicionado que está sendo perdida anualmente pela inação em modernização e digitalização industrial. Este é um custo de oportunidade, de não crescimento ou de perda de participação de mercado, que impede que a indústria brasileira alcance novas eficiências produtivas e compete de forma mais assertiva.

Iniciando o cálculo para o custo direto de energia: Economia potencial anual em energia (EPEA):

$$\text{CAEI} = 210 \text{ TWh} = 210 \times 10^9 \text{ kWh}$$

$$\text{PEE} = 18\%$$

$$\text{CMEI} = \text{R\$ } 0,60/\text{kWh}$$

$$\text{EPEA} = \text{CAEI} \times \text{PEE} \times \text{CMEI} \quad \text{EPEA} = (210 \times 10^9 \text{ kWh}) \times 0,18 \times (\text{R\$ } 0,60/\text{kWh})$$

$$\text{EPEA} = 37,8 \times 10^9 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,60/\text{kWh}$$

$$\text{EPEA} = \text{R\$ } 22.680.000.000,00 \text{ por ano (R\$ } 22,68 \text{ bilhões)}$$

Este valor de R\$ 22,68 bilhões representa a economia direta anual que a indústria brasileira poderia obter apenas com a redução do consumo energético, caso atingisse os níveis de eficiência esperados pela adoção da GEI e Indústria 4.0.

Somado ao COPC estimado em R\$ 62,5 bilhões, o custo de inação totaliza aproximadamente R\$ 85,18 bilhões anuais. Essa quantificação robusta do custo de inação é essencial para justificar a urgência e a relevância das propostas do MMCIIB, evidenciando as perdas econômicas substanciais que o Brasil enfrenta ao postergar a adoção de práticas e tecnologias da Indústria 4.0 voltadas à gestão energética.

A negligência na adoção dessas tecnologias resulta em um enorme prejuízo econômico e social que se perpetua anualmente.

## **5.6. Validação do MMCIIB para Obras e Economias Emergentes**

O MMCIIB possui uma aplicabilidade adaptável a outras economias emergentes, oferecendo-lhes um roteiro estratégico para superar barreiras similares no caminho da Indústria 4.0 e da gestão energética inteligente. A estrutura em pilares (Regulatório e de Incentivos, Tecnológico e de Infraestrutura, e Capacitação e Cultura) foi concebida para ser holística e flexível, permitindo ajustes às especificidades de cada contexto nacional (Chen et al., 2019).

Por exemplo, países como a Índia, o México ou a África do Sul, que enfrentam desafios semelhantes de infraestrutura, lacunas tecnológicas e necessidade de requalificação de mão de obra industrial, podem se beneficiar da abordagem integrada do MMCIIB para desenvolver suas próprias estratégias nacionais.

A metodologia de identificar o "custo de inação" pode atuar como argumento para fortalecer o apoio governamental e do setor privado, pois quantifica as perdas e oportunidades que estão sendo negligenciadas, tal como proposto por Porter & Rivkin (2012).

## **5.7. Discussão dos Resultados e Validação Qualitativa (método Delphi)**

A análise comparativa do modelo proposto revelou uma lacuna significativa entre o Brasil e as nações desenvolvidas em termos de gestão energética inteligente e adoção da Indústria 4.0. Os indicadores de intensidade energética e o percentual de empresas com projetos 4.0 demonstram a necessidade de uma abordagem sistêmica, corroborando as teorias de competitividade nacional de Porter (1990) que vinculam diretamente a prosperidade econômica à capacidade de inovação e eficiência produtiva.

A lentidão brasileira não é apenas uma questão tecnológica, mas também sociotécnica e econômica, sendo influenciada por um ambiente regulatório menos proativo e uma cultura de investimento em P&D que ainda carece de maior impulso (Diniz & Siqueira, 2019). O custo de inação, quantificado em economias potenciais de R\$ 22,68 bilhões anuais em energia e uma perda de R\$ 62,5 bilhões em valor adicionado pela obsolescência tecnológica, serve como um alerta para a necessidade de ação.

A proposição do MMCIIB, com seus três pilares interconectados, oferece um arcabouço sólido para endereçar essas deficiências. A integração desses pilares, conforme teorias de sistemas complexos adaptativos (Sagasti et.al.,2023), é primordial para uma transformação bem-sucedida, pois a falha em qualquer uma dessas dimensões pode comprometer o modelo como um todo.

A ênfase na segurança cibernética para a Indústria 4.0, e a discussão sobre a viabilidade econômica para empresas de menor porte são pontos que fortalecem o caráter prático do modelo, dialogando com as preocupações de mercado e a necessidade de inclusão de todo o tecido industrial (SEBRAE, 2024; Cisco, 2023).

## **5.8. Validação Qualitativa Via Método Delphi**

Para validar o MMCIIB, foi conduzida uma validação qualitativa, envolvendo 18 especialistas seniores das áreas de gestão energética, Indústria 4.0, cibersegurança industrial, políticas públicas e economia no Brasil. Os especialistas, com comprovada experiência acadêmica e profissional (mínimo de 15 anos de atuação), foram convidados a analisar e avaliar a pertinência, viabilidade e abrangência dos três pilares do MMCIIB, bem como o cálculo do

custo de inação e a aplicabilidade para PMEs (Linstone & Turroff, 1975).

Os resultados da primeira rodada do Delphi indicam muita concordância (média de 4.2 em escala Likert de 5 pontos) sobre a relevância e a necessidade dos pilares Regulatório e de Incentivos e Tecnológico e de Infraestrutura.

Quanto ao Pilar de Capacitação e Cultura, a concordância foi maior (média de 4.6), destacando a percepção dos especialistas sobre o capital humano como o diferencial mais crítico para a transição (Pérez-Romero et al., 2022).

Em relação ao cálculo do custo de inação, 85% dos especialistas consideraram a metodologia e os valores estimados como "adequadamente representativos" ou "conservadores, mas bem fundamentados", com sugestões para incluir métricas de impacto ambiental monetizado de forma mais explícita.

A viabilidade para PMEs foi reconhecida, mas com ressalvas significativas sobre a necessidade de políticas públicas mais acessíveis e a oferta de soluções "*as-a-service*"<sup>20</sup> por parte do mercado.

A segunda rodada, que incorporou as sugestões da primeira, buscou refinar o modelo e resolver as divergências. Observou-se uma convergência de opiniões em relação à priorização do investimento em segurança cibernética como um componente intrínseco e não opcional do Pilar Tecnológico, mesmo para PMEs, ressaltando o custo elevado da negligência (Schneier, 2015).

Houve também um consenso sobre a importância de criar plataformas de compartilhamento de conhecimento e infraestrutura para PMEs, mitigando os custos individuais de implementação.

A validação do MMCIIB pelo do Método Delphi demonstrou que o modelo é considerado pertinente, abrangente e viável, saindo do campo da proposição teórica para o da comprovação prática, embora ainda em fase de validação qualitativa.

As contribuições dos especialistas enriqueceram o framework, tornando-o mais adaptado às realidades e desafios específicos do contexto industrial brasileiro e de outras economias emergentes (Crisp et al., 1997).

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A análise da convergência entre a Gestão Energética Inteligente e a Indústria 4.0, com foco no cenário brasileiro e em comparação com países desenvolvidos, revelou a necessidade de uma abordagem para mitigar o custo de inação.

Enquanto nações como Alemanha, Estados Unidos, Coreia do Sul e Japão avançam na integração de tecnologias digitais para otimização energética, impulsionadas por legislações e incentivos robustos, o Brasil se encontra em um estágio de desenvolvimento mais incipiente, com indicadores de eficiência que ainda não refletem o potencial da digitalização industrial e com um arcabouço legal que carece de maior abrangência e coercividade (Schwab, 2016; CNI, 2023).

O fato de não adotar estas práticas, não se traduz apenas em perdas financeiras diretas, como demonstrado pelo cálculo do custo de

inação em relação à economia potencial de energia de 22,68 bilhões de reais anuais e à perda de R\$ 62,5 bilhões em valor adicionado, mas também em uma limitação da competitividade industrial do país no cenário global, perdendo a oportunidade de se inserir em cadeias de valores mais sustentáveis e eficientes, como já alertado por autores que discutem a competitividade de nações diante da inovação tecnológica (Porter, 1990).

O MMCIIB, oferece um caminho estratégico para o Brasil acelerar sua transição. O Pilar Regulatório e de Incentivos, com a sugestão de uma Lei Nacional de Eficiência Energética e Indústria 4.0 Integrada, juntamente com incentivos fiscais e fundos de financiamento, inspira-se nas melhores práticas internacionais que demonstram a importância da intervenção estatal para guiar a inovação privada, como a legislação alemã que promove a eficiência energética (Eberhardt et al., 2019).

Essa abordagem normativa favorece o investimento em tecnologias eficientes, superando a fragmentação legislativa atual e fornecendo direcionamento claro para o setor industrial.

O Pilar Tecnológico e de Infraestrutura, ao preconizar investimentos em conectividade 5G industrial, criação de Centros de Excelência e padronização, busca sanar as deficiências estruturais que hoje dificultam a plena adoção da Indústria 4.0 no país, alinhando-se às tendências globais de infraestrutura digital (Ericsson, 2023).

A melhoria da infraestrutura de telecomunicações, em particular o 5G, é um pré-requisito para a disseminação da Internet das Coisas e dos sistemas ciberfísicos que caracterizam a Indústria 4.0, permitindo a coleta e análise de dados em tempo real, para a gestão

energética inteligente. Sem essa base tecnológica, as iniciativas de digitalização e eficiência energética ficarão restritas a projetos isolados e de menor impacto, perpetuando o custo de inação.

Aprofundar-se na cibersegurança, como discutido no modelo, importa para a resiliência e confiança dos sistemas interconectados.

Finalmente, o Pilar de Capacitação e Cultura reconhece que a transformação tecnológica ligada à adaptação humana e organizacional, servindo para o sucesso da implementação, (Martins et al., 2016).

A existência de profissionais qualificados para operar, manter e inovar dentro de um ambiente digitalizado e energeticamente eficiente é tão importante quanto a tecnologia em si, pois o capital humano é o pilar mais crítico para o sucesso.

Promover uma cultura corporativa que valorize a eficiência energética e a inovação garante que os investimentos em tecnologia e regulação se traduzam em ganhos contínuos e sustentáveis para todas as empresas. (Caetano et al., 2020; Souza & Pereira, 2021).

A capacidade de inovar e de se adaptar às novas realidades tecnológicas e energéticas definirá o futuro da indústria brasileira, importa que o país compreenda que a gestão energética inteligente, no contexto da Indústria 4.0, não é apenas uma opção, mas uma imperativa para a sua subsistência e prosperidade no século XXI.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial e Agência Nacional de Energia Elétrica. Estudos de Indústria 4.0 no Brasil. Brasília, DF: ABDI, 2023.

ABNT NBR ISO 50001: sistemas de gestão de energia – requisitos com orientação para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Panorama do Setor Elétrico Brasileiro. Brasília, DF: ANEEL, 2023.

ANATEL. Agência Nacional de Telecomunicações. Relatório de Acompanhamento do 5G no Brasil. Brasília, DF: Anatel, 2024.

BARRO, R. J. Economic Growth in a Cross Section of Countries. Quarterly Journal of Economics, v. 106, n. 2, p. 407-443, 2013.

BDEW. German Association of Energy and Water Industries. Smart Meter Rollout in Germany. Berlin: BDEW, 2023.

BITKOM. Industrielle IoT-Anwendungen in Deutschland: Studie 2024. Berlin: Bitkom, 2024.

BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Indústria 4.0: o que é e como aplicar. Rio de Janeiro: BNDES, 2018.

BMWi. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Energiewende: Progress Report 2023. Berlin: BMWi, 2023.

BORSEKOVA, K. et al. Smart Energy Management Systems as Tools for Achieving Sustainable Smart Cities. Sustainability, v. 10, n. 4, p. 1098, 2018.

BORSEKOVA, K.; KORONY, S.; VAŇOVÁ, A.; VITÁLIŠOVÁ, K. The Functional and Profitability Analysis of Smart Cities. *Low Carbon Economy*, v. 9, n. 1, p. 1-22, 2018.

CAETANO, L. C. S. et al. Indústria 4.0 e sustentabilidade: uma revisão sistemática da literatura. *Production*, v. 30, e20200057, 2020.

CAETANO, M.; AMARAL, D. C.; SILVA, A. J. da. Frameworks de Gestão Tecnológica: Uma Análise Crítica sobre a Implementação em Economias Emergentes. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 24, n. 3, p. 245-260, 2020.

CHEN, B. et al. Cyber-Physical Systems for Smart Manufacturing and Energy Management. *Applied Energy*, v. 238, p. 1109-1127, 2019.

CISCO. Annual Cybersecurity Report 2023. San Jose: Cisco, 2023.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. *Indústria 4.0: Digitalização e Produtividade no Brasil - Relatório 2023*. Brasília: CNI, 2023

COSTA, A. P. C.; VIEIRA, M. F. P. Eficiência Energética na Indústria 4.0: uma revisão de literatura. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 9, n. 1, p. 30-41, 2019.

CRISP, J. et al. The Delphi technique. *Nursing research*, v. 46, n. 2, p. 116-118, 1997.

DELOITTE. Industry 4.0 and the Digital Factory Survey. New York: Deloitte Insights, 2024.

DENYER, D.; TRANFIELD, D. Producing a systematic review. In: Buchanan, D. A.; Bryman, A. (Eds.). *The SAGE handbook of*

organizational research methods. Los Angeles: Sage, 2009. p. 671-689.

DINIZ, E. H.; SIQUEIRA, A. B. C. Os desafios da transformação digital na indústria brasileira. *Revista de Administração Pública*, v. 53, n. 6, p. 1045-1065, 2019.

EBERHARDT, J. et al. Smart Grids in Germany: Regulatory and Market Challenges. *Utilities Policy*, v. 58, p. 77-84, 2019.

EIA. U.S. Energy Information Administration. Residential and Commercial End-Use Consumption. Washington, DC: EIA, 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2023: Ano Base 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

ERICSSON. 5G for industries, manufacturing and utilities. Stockholm: Ericsson, 2023. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/5g/5g-for-industries>. Acesso em: 10 maio 2024.

EUROPEAN COMMISSION. Energy Efficiency Directive. Brussels: European Commission, 2023. Disponível em: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive_en). Acesso em: 10 maio 2024.

FCC. Federal Communications Commission. 5G Deployment in the United States. Washington, DC: FCC, 2024.

GARTNER. Hype Cycle for Cyber Risk Management, 2024. Stamford: Gartner, 2024.

GHANADPOUR, R. et al. A review of smart energy-efficient building technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 1163-1188, 2017.

GHANADPOUR, M. S.; NOORI, S.; HOSSEINI-MOTLAGH, S. M. Intelligent Energy Management in Industrial Facilities: A Multi-objective Optimization Approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 1045-1060, 2017.

GONÇALVES, J. C. S. et al. Eficiência energética na indústria brasileira: cenários e perspectivas. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, v. 10, n. 2, p. 1-13, 2017.

HOSSEINI, S. E.; SHAMSIPOUR, R. A comprehensive review of policies and regulations for energy efficiency and renewable energy in Germany. *Energy Policy*, v. 116, p. 1-11, 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Industrial Anual*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IEA. International Energy Agency. *Energy Efficiency 2023: Analysis and Outlook to 2030*. Paris: IEA, 2023.

ILO. International Labour Organization. *The future of work: Trends and challenges in emerging economies*. Geneva: ILO, 2024.

IWATA, T. Japan's Energy Future: From Fukushima to Smart Communities. *Energy Policy*, v. 97, p. 317-326, 2016.

JASIM, F. T.; AHMED, G. H. R. Standards for Industrial Internet of Things: A Review. *International Journal of Computer Applications*, v. 175, n. 7, p. 1-6, 2017.

- JETRO. Japan External Trade Organization. Survey on Japanese Manufacturing Companies. Tokyo: JETRO, 2024.
- JASIM, M. A.; AHMED, M. S. API Standardization for IoT Devices in Industry 4.0: Challenges and Opportunities. *International Journal of Computer Applications*, v. 165, n. 8, p. 34-40, 2017.
- KAGAN, R. A.; ROLHEISER, M. The role of law in energy efficiency programs. *Energy Policy*, v. 77, p. 1-10, 2015.
- KDI. Korea Development Institute. Industrial Digital Transformation Report. Seoul: KDI, 2024.
- KESCO. Korea Energy Service Company. Smart Meter Deployment in Korea. Seoul: KESCO, 2023.
- LASI, H. et al. Industry 4.0: The Future of Industrial Production? *Business & Information Systems Engineering*, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.
- LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.
- LATOUR, B. *Aramis, or the Love of Technology*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1996.
- LEE, J.; PARK, J. Smart factory implementation for energy efficiency: A case study of a semiconductor manufacturing company in Korea. *Journal of Cleaner Production*, v. 251, p. 119641, 2020.

- LINSTONE, H., & TURROFF, M. (Eds.). The Delphi method: Techniques and applications. Addison-Wesley, 1975.
- MARR, B. Industry 4.0: The Essential Guide to Futurproofing Your Business. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.
- MARTINS, R. et al. Gestão da mudança e eficiência energética: um estudo de caso em uma indústria de alimentos. *Revista Eletrônica de Administração*, v. 22, n. 2, p. 297-318, 2016.
- MIC. Ministry of Internal Affairs and Communications. 5G Development in Japan. Tokyo: MIC, 2024.
- MSIT. Ministry of Science and ICT. 5G Network Implementation Report. Seoul: MSIT, 2024.
- NARASIMHAN, R. et al. Smart grid research in the US: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 1079-1092, 2018.
- NEMETZ, H. Telecommunication Networks in Industry 4.0. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, v. 135, n. 2, p. 129-135, 2018.
- OECD. Organization for Economic Co-operation and Development. *Skill Needs in the Digital Economy: Implications for Industry 4.0 in Emerging Markets*. Paris: OECD Publishing, 2023.
- OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. *Main Science and Technology Indicators*. Paris: OECD, 2024.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, 2021.

PÉREZ-ROMERO, R. et al. Skills and Competencies for Industry 4.0: A Systematic Literature Review. *Education and Information Technologies*, v. 27, p. 10769–10793, 2022.

PORTER, M. E. *The Competitive Advantage of Nations*. New York: Free Press, 1990.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. *Harvard Business Review*, v. 92, n. 11, p. 64-88, 2014.

PORTER, M. E.; RIVKIN, J. W. Choosing Strategy: The New Corporate Reality of Bad Choices. *Harvard Business Review*, v. 90, n. 10, p. 126-130, 2012

SAGASTI, F. R.; BEERBEEK, C. R.; MÉRIDA, P. M. Complex Adaptive Systems and Sociotechnical Transition: The Case of Energy Transitions. *Journal of Cleaner Production*, v. 381, p. 134988, 2023.

SCHNEIER, B. *Data and Goliath: The Hidden Battles to Collect Your Data and Control Your World*. New York: W. W. Norton & Company, 2015.

SCHWAB, K. *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: Edipro, 2016.  
SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. *Indústria 4.0 para Pequenas e Médias Empresas*. Brasília, DF: SEBRAE, 2024.

SILVA, A. C. da; OLIVEIRA, P. S. de. Desafios da Indústria 4.0 no contexto brasileiro: uma análise da integração de tecnologias e processos. *Revista de Gestão e Contabilidade da UFPI*, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2020.

SOUZA, M. L. de; PEREIRA, R. S. Sustentabilidade e competitividade na Indústria 4.0: o papel da gestão energética. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 4, p. 232-245, 2021.

TOHOKU ELECTRIC POWER. Smart Meter Deployment in Japan. Sendai: Tohoku Electric Power, 2023.

US DOE. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy Programs. Washington, DC: US DOE, 2024.

WOBBE, W. Industry 4.0 in Europe: The Digital Transformation and the European Industry. Futures, v. 91, p. 6-12, 2017.

WORLD BANK. World Development Indicators. Washington, DC: World Bank, 2024.

WORLD ECONOMIC FORUM. The Future of Jobs Report 2023. Geneva: World Economic Forum, 2023.

---

Sistemas computacionais inteligentes e controle avançado com ênfase em mapas cognitivos fuzzy Em Sistemas Dinâmicos aplicados em diferentes áreas de pesquisa, em especial robótica e visão robótica - Homologado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio Coordenador do projeto:  
Prof. Dr. Márcio Mendonça.

<sup>1</sup> Aluno externo. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2819-7864>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>2</sup> Discente de Pedagogia. Universidade Estadual do Norte do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9794-5934>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Federal do Paraná – Campus Jacarezinho. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9213-4334>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>4</sup> Doutor. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8186-051X>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>5</sup> Mestranda. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio/Londrina. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9635-1230>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>6</sup> Mestranda. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio/Londrina. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4700-1254>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>7</sup> Mestranda. Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio/Londrina. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7279-5200>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>8</sup> Doutor em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6246-1246>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

- <sup>9</sup> Mestre em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-4382>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)
- <sup>10</sup> Mestre em Engenharia Elétrica. Universidade Senai Campus Londrina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6132-5832>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)
- <sup>11</sup> Doutor em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6433-8586>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)
- <sup>12</sup> Doutor em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7203-9241>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)
- <sup>13</sup> Mestre em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8405-844x>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)
- <sup>14</sup> Mestrando. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina/Apucarana. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2115-3308>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)
- <sup>15</sup> Mestranda. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5091-6818>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>16</sup> Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Federal do Paraná – Campus Jacarezinho. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8203-8699>.

E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>17</sup> Doutor em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-2538-2493>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>18</sup> Mestrando. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6793-6987>. E-

mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>19</sup> Doutor em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio. ORCID:

<https://orcid.org/0000-0003-2517-8051>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>20</sup> Refere-se a um modelo de negócio onde você não compra um produto físico ou uma licença permanente, mas sim paga pelo uso ou assinatura de uma solução fornecida via nuvem.