

# Um Estudo Exploratório baseado em Simulação sobre Economia de Energia com *Smart Grids* em Três Municípios Brasileiros

Ana Clara A. G. da Silva<sup>1,2</sup>, Filipe Castro Saraiva<sup>1</sup>,  
Igor Faria de Oliveira<sup>1</sup>, Gilmar Teixeira Junior<sup>1,2</sup>, Valdemar V. G. Neto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)  
Caixa Postal 131 – 74.690-900 – Goiânia – GO – Brazil

<sup>2</sup>Instituto Acadêmico de Ciências Tecnológicas (IACT) – Universidade Estadual de Goiás (UEG)  
75.920-000 – Santa Helena de Goiás – GO – Brazil

araujo.anaclara@ueg.br, filipecastrosaraiva@discente.ufg.br

igorfaria@ufg.br, gilmar.junior@ueg.br

valdemarneto@ufg.br

**Abstract.** *This study investigates a solution to optimize energy distribution in smart grids by integrating renewable sources and promoting energy efficiency in alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). As renewable energy sources such as solar energy become more widely adopted, the efficient integration of these intermittent sources brings challenges to traditional electrical grids, which may fail to meet demands without adaptive solutions. Using the DEVS formalism, applied through the MS4Me tool, scenarios were simulated in three Brazilian cities with varying distribution of solar panels. The results indicate that solar energy production varies across regions, affecting energy savings and carbon emission reductions. The analysis highlighted the economic and environmental benefits of integrating solar panels, especially in regions with high solar irradiation. This investigation proposes strategies for energy management in urban areas, underscoring the essential role of software modeling and scenario simulation for smart grids.*

**Resumo.** *Este estudo investiga uma solução para otimizar a distribuição de energia em smart grids por meio da integração de fontes renováveis e da promoção da eficiência energética, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas. Com a crescente adoção de fontes renováveis, como a energia solar, a integração eficiente dessas fontes intermitentes apresenta desafios para as redes elétricas tradicionais, que podem falhar em atender às demandas sem soluções adaptativas. Utilizando o formalismo DEVS, aplicado através da ferramenta MS4Me, cenários foram simulados em três cidades brasileiras com diferentes distribuições de painéis solares. Os resultados indicam que a produção de energia solar varia entre as regiões, afetando a economia de energia e a redução das emissões de carbono. A análise destacou os benefícios econômicos e ambientais da integração de painéis solares, especialmente em regiões com alta irradiação solar. Esta investigação propõe estratégias para a gestão de energia em áreas urbanas, ressaltando o*

*papel essencial da modelagem de software e da simulação de cenários para smart grids.*

## 1. Introdução

Existe uma preocupação premente de investimento por parte de municípios brasileiros para aumentar sua eficiência energética<sup>1</sup>. O aumento contínuo da demanda por energia elétrica combinado com a necessidade de integrar fontes renováveis e reduzir a pegada de carbono tem criado desafios complexos para os sistemas de distribuição de energia [Atawi et al. 2022, Marinescu 2022]. No entanto, os sistemas tradicionais de energia enfrentam a falta de infraestrutura para integrar e otimizar fontes intermitentes, como a solar e a eólica, de forma eficiente e em tempo real. Sem uma estrutura adaptativa, essas redes tornam-se vulneráveis a flutuações de produção e consumo, comprometendo sua eficiência e resultando em perdas de energia, aumento dos custos operacionais e maior instabilidade no fornecimento de energia [Qamruzzaman 2022].

Nesse contexto, os *smarts grids* surgem como uma solução promissora ao permitir a gestão inteligente da distribuição de energia. Essa tecnologia oferece a flexibilidade necessária para integrar fontes renováveis e ajustar o fornecimento conforme a demanda, em tempo real. Ainda assim, otimizar a integração dessas energias em regiões com diferentes condições climáticas é um desafio. A ONU, por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), reforça a urgência de soluções que atendam à crescente demanda por energia de forma sustentável e eficiente [Wang 2023, Massaoudi et al. 2021]. Este estudo busca resolver a seguinte *questão de pesquisa*: Como otimizar a integração de energia solar em *smarts grids* urbanos, considerando variáveis climáticas regionais e condições específicas de consumo, para maximizar a eficiência energética e atender aos ODS da ONU? Para responder a esta questão, foram utilizadas simulações baseadas em software, modelando cenários reais para prever e otimizar o comportamento de *smarts grids* sob diferentes condições. O uso de software especializado para simulação, como a ferramenta MS4Me<sup>2</sup>, desempenha um papel essencial ao possibilitar modelagens detalhadas e precisas. Isso facilita a criação de cenários realistas, permitindo que decisões informadas sobre a gestão de energia renovável sejam baseadas em resultados quantitativos. Ao simular diferentes condições e variáveis, essas ferramentas oferecem suporte para identificar estratégias eficazes de otimização do uso de recursos energéticos.

Este artigo tem como objetivo simular e analisar a integração de painéis solares em *smarts grids*, avaliando seu impacto na eficiência energética e na sustentabilidade, em alinhamento com os ODS da ONU. A principal contribuição deste estudo é a Modelagem e Simulação (M&S) de cenários de *smarts grids* utilizando o MS4Me<sup>3</sup>, com foco na variabilidade regional em diferentes regiões do Brasil [Massaoudi et al. 2021]. A simulação inclui a interação entre medidores inteligentes e a central de distribuição, proporcionando uma análise detalhada dessas interações e diferenciando-se da literatura existente. Os resultados preliminares indicam que a simulação pode identificar padrões de consumo e

---

<sup>1</sup><https://oglobo.globo.com/patrocinado/dino/noticia/2024/09/13/goiania-anuncia-licitacao-que-a-tornara-cidade-inteligente.ghtml>

<sup>2</sup>O MS4Me é uma ferramenta de modelagem e simulação utilizada para criar e analisar cenários complexos em sistemas dinâmicos.

<sup>3</sup><https://ms4systems.com>

produção que permitem à central de distribuição tomar decisões mais informadas, resultando em uma distribuição de energia mais eficiente e econômica [Qamruzzaman 2022] [Dechamps 2023]. O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 1 apresenta a Introdução e o contexto do estudo. A Seção 2 descreve a Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados. A Seção 3 detalha o Método de Pesquisa e a M&S. A Seção 4 relata a Análise dos Resultados e descreve as Ameaças à Validade. A Seção 5 conclui o artigo e apresenta trabalhos futuros.

## 2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

Os *smarts grids* representam uma evolução significativa dos sistemas de distribuição de energia, utilizando tecnologias avançadas de comunicação e automação para criar uma rede elétrica mais eficiente e sustentável. Eles permitem a interação bidirecional entre consumidores e fornecedores de energia, facilitando a gestão eficiente do consumo energético e a integração de fontes renováveis [Gharavi and Ghafurian 2011, Fang et al. 2012, El-Hawary 2014, Atawi et al. 2022]. Além de suas vantagens tecnológicas, os *smarts grids* desempenham um papel crucial na promoção dos ODS da ONU, especialmente o ODS 7, que visa garantir acesso a energia limpa e acessível, e o ODS 13, focado na ação contra as mudanças climáticas. A implementação de *smarts grids* contribui diretamente para a eficiência energética e a redução das emissões de carbono, promovendo uma rede elétrica mais sustentável e resiliente [Clark 2016]. Os principais componentes dos *smarts grids* incluem medidores inteligentes, sistemas de gerenciamento de energia e redes de comunicação avançadas. Esses elementos são fundamentais para a coleta e análise de dados em tempo real, permitindo a otimização da distribuição de energia [Amin and Wollenberg 2005, Gungör et al. 2010]. As tecnologias mais recentes destacam o uso de inteligência artificial generativa para modelagem de carga e simulações em plataformas de *microgrid*, permitindo um planejamento mais eficiente e resiliente [Li et al. 2023]. A M&S é essencial para analisar e otimizar os *smarts grids*, que são reconhecidos como um exemplo típico de Sistemas de Sistemas (SoS). Eles integram múltiplos sistemas autônomos, como geração, transmissão, distribuição de energia e participação ativa dos consumidores, utilizando tecnologias de comunicação avançadas e automação [Manzano 2023, Ananthavijayan et al. 2019]. A M&S desempenha um papel crucial na compreensão e gestão de sistemas de sistemas (SoS). Os autores [Neto 2018, Graciano Neto et al. 2017] tem contribuído significativamente para este campo, destacando a importância de abordagens baseadas em modelos para a derivação de geradores de estímulos e a validação de comportamentos emergentes em SoS. Estas técnicas permitem simular e avaliar a interação complexa entre sistemas independentes, proporcionando informações relevantes para a otimização e a tomada de decisões.

**Trabalhos Relacionados.** Um estudo recente propôs a integração de co-simulação quântica-clássica em *smart grids* com o objetivo de explorar a viabilidade e os desafios de utilizar computação quântica para melhorar o desempenho em cenários de simulação em larga escala [Vereno et al. 2023]. Esse trabalho oferece uma nova perspectiva ao demonstrar como as tecnologias quânticas emergentes podem superar limitações de desempenho, particularmente em simulações que envolvem grandes quantidades de dados e sistemas complexos. Em outro estudo, [Cárdenas et al. 2023] propuseram um *framework* para o monitoramento em tempo real de *smart grids* utilizando computação em borda. A abordagem visa aumentar a taxa de monitoramento e reduzir os atrasos de comunicação em

comparação com sistemas baseados em nuvem. Em [Molderink 2010], os autores utilizaram modelagem para controle doméstico em *smart grids*, mas não abordaram a variabilidade regional das fontes de energia renovável, especialmente em cenários urbanos brasileiros. Um estudo relevante no contexto nacional foi desenvolvido por Graciano Neto et al., [2010], que propuseram um sistema de apoio à decisão baseado em agentes para o setor elétrico, utilizando simulação de cenários para o tratamento de ocorrências no setor de distribuição de energia [Neto et al. 2010]. A abordagem emprega agentes para lidar com situações de emergência e tratamento de falhas, fornecendo uma alternativa eficaz para melhorar a resiliência e a eficiência das operações no setor elétrico. Por fim, Li et al. [Li et al. 2023] destacam a importância do uso de inteligência artificial e *big data* na previsão e gerenciamento do consumo e geração de energia em *smart grids*, mostrando como essas tecnologias podem melhorar a eficiência e a resiliência das redes inteligentes. Este trabalho diferencia-se dos demais ao integrar explicitamente os ODS da ONU na operação de *smart grids*, promovendo eficiência energética e uso de fontes renováveis. Diferente dos estudos anteriores, este trabalho concentra-se em municípios brasileiros, oferecendo uma contribuição prática e contextualizada ao cenário nacional.

### 3. Método de Pesquisa e Modelagem e Simulação (M&S)

De acordo com [de França and Travassos 2015], o planejamento de simulações deve seguir um conjunto de diretrizes que asseguram a coerência e a integridade do estudo. Neste estudo foram seguidas as seguintes etapas: (i) Definição do Escopo e Objetivos; (ii) Preparação do Ambiente de Simulação; e (iii) Desenvolvimento do Modelo de Simulação e Execução das Simulações; e (iv) Análise dos Resultados.

#### 3.1. Definição do Escopo e Objetivos

O estudo visa otimizar a distribuição de energia em *smart grids*, integrando fontes renováveis e promovendo a eficiência energética, alinhado aos ODS da ONU. Ainda que os resultados possam parecer "óbvios", o estudo fornece evidências baseadas em dados empíricos para orientar as regiões na decisão sobre a quantidade ideal de painéis solares, considerando a disponibilidade de energia solar local. Os objetivos específicos do estudo incluem: **Avaliar o Impacto de Fontes Renováveis:** Analisar se a adição de painéis solares pode afetar a eficiência energética e a produção de créditos em diferentes regiões brasileiras. **Analisar a Resposta do Smart Grid:** Investigar a resposta do sistema a variações na demanda e produção de energia. **Identificar Padrões de Consumo e Produção:** Determinar padrões que possam ser otimizados para reduzir emissões de carbono. **Redução do Consumo de Energia da Rede:** Analisar o impacto dos painéis solares na redução do consumo de energia e na economia financeira. Além disso, este estudo busca verificar se a economia de energia elétrica em regiões com maior incidência solar é proporcional à diferença de incidência solar entre as diversas regiões do Brasil. Dessa forma, os resultados podem auxiliar na tomada de decisão quanto ao acréscimo de painéis solares para que regiões com menor incidência solar, como Goiânia, possam obter resultados similares aos de locais como Teresina.

#### 3.2. Preparação do Ambiente de Simulação

A preparação do ambiente de simulação envolveu a configuração da plataforma MS4Me e a definição dos parâmetros iniciais (como irradiação solar, o número de painéis e o

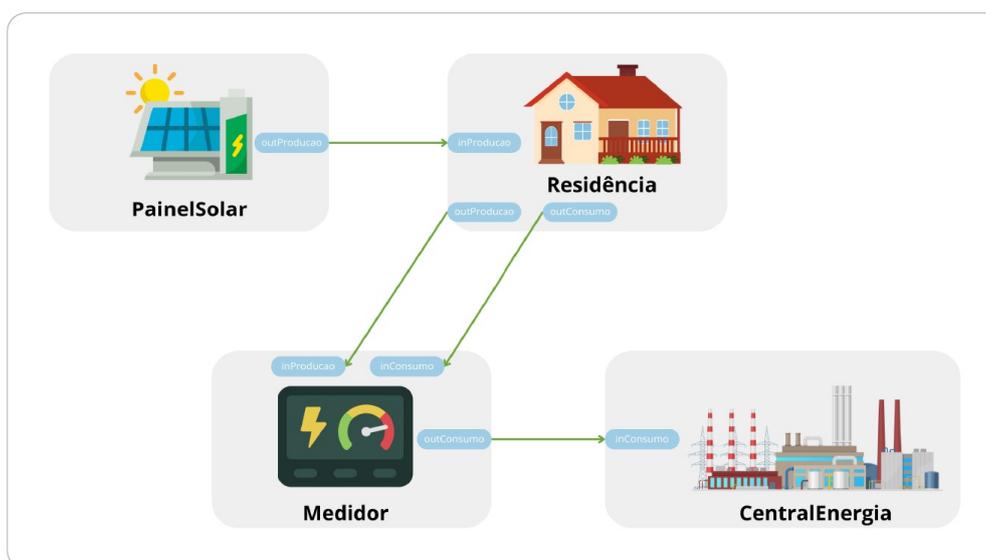
consumo de energia), para garantir resultados confiáveis e representativos. O modelo simula uma única residência por cidade, equipada com três painéis solares, permitindo uma análise detalhada de consumo e produção de energia em cada localidade. Foram utilizados dois *datasets*: um representando um ano inteiro de consumo residencial, capturando as variações sazonais, e outro com dados de produção de energia solar, específico para diferentes regiões brasileiras, ajustados conforme a irradiação média local. A média de irradiação solar diária em cada cidade foi: Curitiba com 139,8138889 kWh/m<sup>2</sup>/dia, Goiânia com 174,8861111 kWh/m<sup>2</sup>/dia e Teresina com 464,2916667 kWh/m<sup>2</sup>/dia. Esses valores permitiram calibrar a produção de energia solar para cada localidade. As variáveis consideradas na simulação incluem a **cidade** (localidade específica onde a simulação foi realizada), o **mês** (mês do ano para capturar a sazonalidade), a **irradiação** (a média de irradiação solar diária, que influencia diretamente a produção de energia), a **produção por painel** (quantidade de energia gerada por cada painel solar), a **produção total (kWh)** (produção total de energia da residência, considerando todos os painéis), o **consumo (kWh)** (consumo total de energia da residência), a **produção excedente** (excedente de energia produzido, caso a produção seja superior ao consumo), os **créditos gerados** (créditos energéticos gerados com base na produção excedente, onde aplicável), a **tarifa** (custo por kWh da energia consumida) e a **economia (R\$)** (economia financeira mensal resultante da integração dos painéis solares). Essas variáveis permitiram avaliar com precisão o impacto dos painéis solares em diferentes cenários, considerando as características de cada cidade. Para assegurar a replicabilidade do experimento, todos os arquivos necessários, incluindo relatórios, vídeos explicativos e *datasets*, estão disponíveis em uma pasta pública no *Zenodo* <sup>4</sup>. Esses materiais cobrem a implementação completa, os parâmetros de simulação, e as métricas de avaliação utilizadas. As simulações foram realizadas em um computador com Windows 11, processador Ryzen 7 5700G, 32GB de RAM DDR4, e SSD NVME de 1TB. Foram definidos como parâmetros de entrada a produção de energia solar, o consumo residencial e as características da rede elétrica em cada região. Três cenários principais foram definidos para avaliar o impacto da integração de painéis solares em diferentes condições. **Cenário 1:** Analisa a variação na quantidade de painéis solares para maximizar a eficiência energética e a produção de créditos. **Cenário 2:** Avalia residências com diferentes níveis de produção de energia, considerando a eficiência dos painéis e as condições de instalação. **Cenário 3:** Compara diferentes regiões com base em latitudes e condições climáticas, examinando como a localização e a irradiação solar influenciam a produção de energia e a economia resultante.

### 3.3. Desenvolvimento do Modelo de Simulação e Execução das Simulações

Esta é uma etapa onde os componentes e suas interações são modelados. A Figura 1 ilustra a estrutura da simulação do *smart grid* e destaca componentes essenciais como Painel Solar, Residência, Medidor, e Central de Energia. A função, interação, e descrição da simulação executada no MS4Me são explicados a seguir:

**Painel Solar:** A função do Painel Solar é a geração de energia solar. Na sua interação, o Painel Solar gera energia (*outProdução*) que é enviada para a Residência. O painel solar é modelado para captar a radiação solar e converter em energia elétrica. **Residência:** A função da Residência é o consumo e produção de energia. Na sua interação, a Residência recebe energia do Painel Solar (*inProducao*) e envia o con-

<sup>4</sup>Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14029254>



**Figura 1. Simulação do Smart Grid no MS4Me**

sumo (`outConsumo`) e a produção de energia (`outProducao`) para o Medidor. A residência consome energia para suas atividades diárias e pode produzir energia se equipada com painéis solares. Este componente modela o comportamento energético das residências, considerando tanto o consumo quanto a produção. **Medidor:** A função do Medidor é o monitoramento e controle do consumo e produção de energia. Na sua interação, o Medidor recebe dados de consumo (`inConsumo`) e produção (`inProducao`) da Residência e envia o consumo consolidado (`outConsumo`) para a Central de Energia. O medidor inteligente é responsável por monitorar e registrar o consumo e a produção de energia da residência. Ele é crucial para a comunicação bidirecional no *smart grid*, fornecendo dados em tempo real para a central de energia. **Central de Energia:** A função da Central de Energia é a gestão e distribuição de energia. Na sua interação, Central de Energia recebe dados de consumo (`inConsumo`) do Medidor. A central de energia é responsável pela gestão e distribuição da energia na rede. Ela utiliza os dados fornecidos pelos medidores inteligentes para tomar decisões informadas sobre a distribuição de energia, garantindo eficiência e estabilidade na rede.

A execução de cada cenário leva aproximadamente 1 minuto e 24 segundos, com base em simulações realizadas no ambiente de desenvolvimento MS4Me. Esse tempo foi medido considerando o hardware disponível e os parâmetros de entrada nos três cenários testados. A rapidez das simulações demonstra a eficiência da ferramenta, permitindo a realização de múltiplos testes em um curto período, o que é vantajoso para explorar diferentes parâmetros e otimizar o sistema.

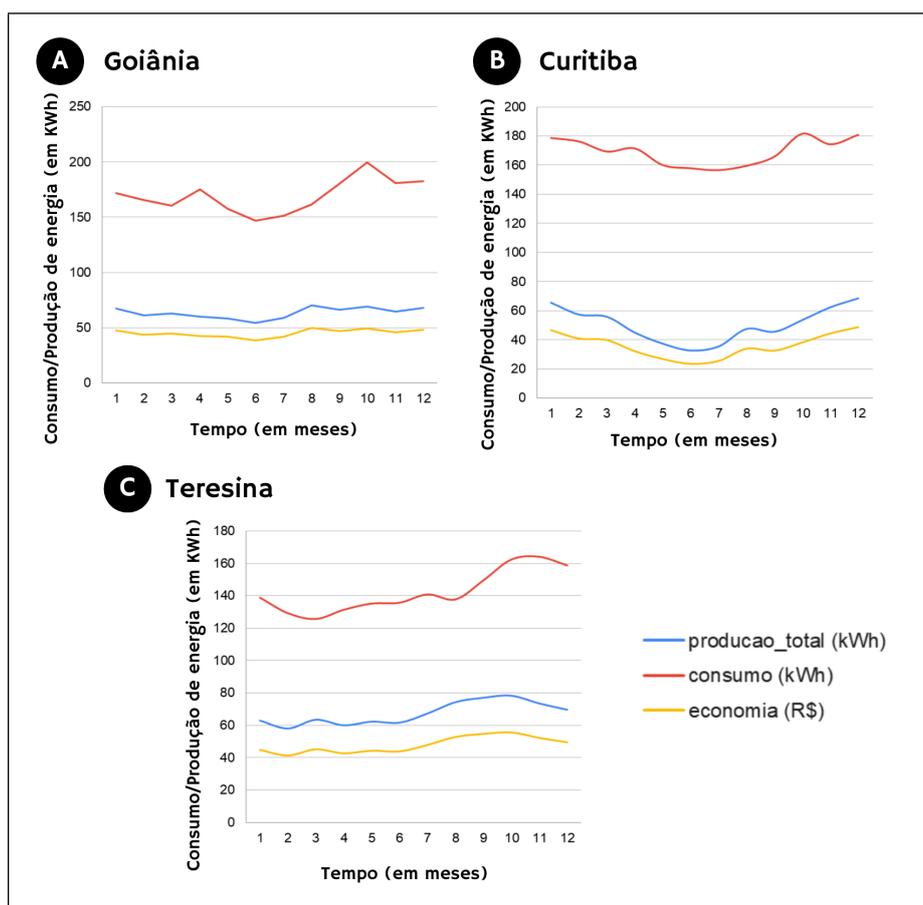
#### 4. Análise dos Resultados e Ameaças à Validade

Os resultados deste estudo baseiam-se na análise de dois *datasets*: um sobre *consumo*<sup>5</sup> de energia elétrica no Brasil e outro sobre *irradiação* solar<sup>6</sup>. Foram considerados cenários

<sup>5</sup>Disponível em: <https://basedosdados.org/dataset/3e31e540-81ba-4665-9e72-3f81c176adad?table=b955feef-1649-428b-ba46-bc891d2facc2>

<sup>6</sup>Disponível em: [https://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html)

em três cidades brasileiras ao longo de 12 meses, com a instalação de três painéis solares em cada residência. Os valores apresentados no início desta seção são resultados obtidos a partir das simulações realizadas no ambiente MS4Me. Eles refletem a produção de energia solar e o consumo energético em cada cidade, de acordo com as configurações específicas definidas para os cenários e descritas acima. Após a configuração dos parâmetros, as simulações foram executadas repetidamente para garantir consistência nos resultados. Cada cenário foi ajustado para refletir as condições regionais de Goiânia, Curitiba e Teresina, permitindo a comparação entre as diferentes regiões. A simulação não se limita a uma simples execução; foram realizados ajustes manuais nos parâmetros de entrada para cada cidade, de forma a melhor representar as características locais de produção e consumo de energia. Por exemplo, a quantidade de energia gerada foi influenciada pela irradiação solar média de cada região, enquanto o consumo foi ajustado de acordo com os padrões típicos de uso residencial. Esses ajustes permitiram que as simulações fossem mais precisas e representassem fielmente as características energéticas de cada localidade. Importante salientar que todos os ajustes realizados estão disponíveis nos documentos suplementares para fins de auditoria e replicabilidade do estudo. A Figura 2 apresenta os resultados da simulação utilizando três painéis solares.



**Figura 2. Resultados para as Cidades de Goiânia, Curitiba e Teresina**

A Figura 2 (A) ilustra os resultados para a cidade de **Goiânia**. Em relação a Produção e Consumo, a produção de energia solar variou entre 54,38 kWh e 69,97 kWh ao longo do ano, enquanto o consumo de energia residencial variou entre 147,01 kWh e

199,82 kWh. A economia média mensal foi significativa, com valores variando entre R\$ 38,64 e R\$ 49,72. Quanto ao impacto, as análises indicam que a integração de painéis solares pode potencialmente proporcionar economia nas contas de energia e contribuir para a redução das emissões de carbono. A Figura 2 (B) ilustra os resultados para a cidade de **Curitiba**: Em relação a produção e consumo, a produção de energia solar em Curitiba variou entre 32,89 kWh e 68,48 kWh, refletindo as condições climáticas menos favoráveis para a produção solar comparado a Goiânia e Teresina. A economia média mensal foi um pouco menor que em Goiânia, variando entre R\$ 23,37 e R\$ 48,66. Quanto ao impacto, as análises mostram que apesar das condições climáticas, a integração de painéis solares ainda resultou em economia e benefícios ambientais significativos. Foi simulado um cenário com a adição de 5 painéis solares para Curitiba. Percebe-se que mesmo com 8 painéis solares, não houve geração de créditos. Isso evidencia que a irradiação solar na região não é suficiente para gerar um excedente de energia. Este tipo de análise era um dos principais objetivos da simulação, demonstrando as limitações da produção solar em diferentes regiões. Embora os gráficos de Goiânia e Curitiba apresentem resultados semelhantes, a razão para isso está na compensação entre a menor irradiação solar de Curitiba e seu consumo de energia levemente mais baixo, enquanto Goiânia, apesar de ter maior irradiação solar, também apresenta um consumo proporcionalmente mais alto. Esses fatores contribuem para que as diferenças sejam menos perceptíveis nos gráficos, ainda que existam variações nos valores exatos.

A Figura 2 (C) ilustra os resultados para a cidade de **Teresina**. Em relação a produção e consumo, Teresina apresentou uma das maiores produções de energia solar, variando entre 58,07 kWh e 77,04 kWh, devido à alta irradiação solar. A economia média mensal foi a mais alta entre as três cidades, variando entre R\$ 41,26 e R\$ 55,63. Quanto ao impacto, as análises indicam que cidades com alta irradiação solar, como Teresina, podem obter maiores benefícios econômicos e ambientais com a integração de painéis solares. Em Teresina, em uma nova simulação com 8 painéis solares, houve uma geração substancial de energia, destacando a eficiência da produção solar em regiões com alta incidência de radiação solar. Isso reflete a vantagem de regiões com alta irradiação solar para a adoção de tecnologias de geração distribuída, como a solar, que podem gerar maior retorno financeiro e contribuir de forma mais significativa para a sustentabilidade.

Os resultados indicam que a maior economia média foi obtida em Teresina, o que era esperado devido à sua localização mais próxima ao Equador, resultando em uma maior incidência solar. Essa proximidade permite uma maior produção de energia por painel solar, potencializando a economia financeira. Para regiões com menor incidência solar, como Goiânia, o mesmo nível de economia poderia ser alcançado com a instalação de painéis adicionais. Estimamos que, para obter resultados próximos aos de Teresina, seriam necessários aproximadamente 8 painéis solares em Goiânia. Isso representa um acréscimo de 5 painéis em comparação com Teresina, devido à menor irradiação solar na região. Esses dados demonstram como a análise de irradiação pode orientar decisões sobre o dimensionamento de sistemas solares em diferentes regiões. A análise dos resultados confirma os objetivos do estudo ao evidenciar que a integração de painéis solares em *smart grids* pode otimizar a distribuição de energia de forma eficiente. Respondendo à questão de pesquisa – “Como otimizar a integração de energia solar em *smart grids* urbanos para maximizar a eficiência energética e atender aos ODS da ONU?” – as simulações demonstraram que a produção de energia solar em diferentes regiões do Brasil impacta

diretamente na economia e na redução de emissões de carbono, especialmente em áreas com alta irradiância solar.

**Ameaças à Validade.** As ameaças incluem a precisão dos dados de entrada, a configuração dos cenários no MS4Me e generalização dos resultados. A validade interna pode ser comprometida por limitações na modelagem e dados imprecisos. A validade externa é limitada pela aplicabilidade dos resultados a outras regiões. A validade de construção pode ser afetada pela fidelidade do modelo e definição dos cenários, enquanto a validade de conclusão depende da precisão e interpretação dos resultados. Para mitigar essas ameaças, utilizamos *datasets* públicos, revisamos modelo de simulação, e definimos cenários realistas. Para garantir a validade interna, conduzimos testes preliminares para ajustar os parâmetros de simulação e corrigir inconsistências. A validade externa foi reforçada ao simular diferentes cenários regionais com variações reais de consumo e produção solar. Utilizamos dados reais para assegurar a validade de construto, e os resultados foram avaliados com base nas limitações observadas, minimizando generalizações.

## 5. Conclusões

Este estudo indicou a viabilidade e os benefícios potenciais da integração de painéis solares em *smarts grids*, utilizando a ferramenta MS4Me para simular cenários em Goiânia, Curitiba e Teresina. Os resultados mostraram que a produção de energia solar varia significativamente entre as regiões, influenciando diretamente a eficiência energética e os benefícios econômicos. Em Teresina, com alta irradiação solar, observou-se uma maior produção de energia e economia financeira, enquanto em Curitiba, a produção foi limitada, destacando a necessidade de estratégias regionais. Os dados obtidos podem orientar decisões sobre o dimensionamento de sistemas solares. Em locais com menor irradiação solar, como Goiânia, seriam necessários cerca de 8 painéis por residência para alcançar uma economia similar à de Teresina, o que representa um aumento de 5 painéis. A análise reforçou a importância de políticas de incentivo à adoção de energias renováveis e melhorias na infraestrutura de rede. Foram simuladas também estratégias de otimização para a gestão de energia, como o aumento do número de painéis solares e tecnologias avançadas de monitoramento. Alinhado aos ODS da ONU, o estudo enfatiza a sustentabilidade e eficiência energética em áreas urbanas. Para trabalhos futuros, sugere-se expandir o estudo para mais cidades, incluir diferentes tipos de consumidores, realizar uma análise de custo-benefício detalhada e integrar novas tecnologias como armazenamento de energia em baterias e veículos elétricos.

## Referências

- Amin, S. M. and Wollenberg, B. F. (2005). Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(5):34–41.
- Ananthvijayan, R., Karthikeyan Shanmugam, P., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., Blaabjerg, F., and Fedak, V. (2019). Software architectures for smart grid system—a bibliographical survey. *Energies*, 12(6):1183.
- Atawi, I. E., Al-Shetwi, A. Q., Magableh, A. M., and Albalawi, O. H. (2022). Recent advances in hybrid energy storage system integrated renewable power generation: Configuration, control, applications, and future directions. *Batteries*, 9(1):29.
- Cárdenas, R., Arroba, P., Risco-Martín, J. L., and Moya, J. M. (2023). Modeling and simulation of smart grid-aware edge computing federations. *Cluster Computing*, 26(1):719–743.

- Clark, Helen e Wu, H. (2016). The sustainable development goals: 17 goals to transform our world. *Furthering the work of the United Nations*, pages 36–54.
- de França, B. B. N. and Travassos, G. H. (2015). Experimentation with dynamic simulation models in software engineering: planning and reporting guidelines. *Empirical Software Engineering*, 20(3):477–507.
- Dechamps, P. (2023). The iea world energy outlook 2022—a brief analysis and implications. *European Energy & Climate Journal*, 11(3):100–103.
- El-Hawary, M. E. (2014). The smart grid—state-of-the-art and future trends. *Electric Power Components and Systems*, 42(3-4):239–250.
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., and Yang, D. (2012). Smart grid—the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4):944–980.
- Gharavi, H. and Ghafurian, R. (2011). Smart grid: The electric energy system of the future. *Proceedings of the IEEE*, 99(6):917–921.
- Graciano Neto, V. V., Barros Paes, C. E., Garcés, L., Guessi, M., Manzano, W., Oquendo, F., and Nakagawa, E. Y. (2017). Stimuli-sos: a model-based approach to derive stimuli generators for simulations of systems-of-systems software architectures. *JBCS*, 23:1–22.
- Güngör, V. C., Lu, B., and Hancke, G. P. (2010). Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(10):3557–3564.
- Li, J., Herdem, M. S., Nathwani, J., and Wen, J. Z. (2023). Methods and applications for artificial intelligence, big data, internet of things, and blockchain in smart energy management. *Energy and AI*, 11:100208.
- Manzano, W. A. E. (2023). Simulation-based optimization of system-of-systems software architectures. Master’s thesis, Universidade de São Paulo.
- Marinescu, C. (2022). Progress in the development and implementation of residential ev charging stations based on renewable energy sources. *Energies*, 16(1):179.
- Massaoudi, M., Abu-Rub, H., Refaat, S. S., Chihi, I., and Oueslati, F. S. (2021). Accurate smart-grid stability forecasting based on deep learning: Point and interval estimation method. In *2021 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*, pages 1–6. IEEE.
- Molderink, A. e. a. (2010). Management and control of domestic smart grid technology. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(2):109–119.
- Neto, V. V. G. (2018). *A simulation-driven model-based approach for designing softwareintensive systems-of-systems architectures*. PhD thesis, Université de Bretagne Sud; Universidade de São Paulo (Brésil).
- Neto, V. V. G., Teles, R. M., Ivamoto, M., Mello, L. H., and de Carvalho, C. L. (2010). Um sistema de apoio à decisão baseado em agentes para tratamento de ocorrências no setor elétrico. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, 17(2):139–153.
- Qamruzzaman, M. (2022). Nexus between foreign direct investments renewable energy consumption: What is the role of government debt. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 3(3):514–522.
- Vereno, D., Khodaei, A., Neureiter, C., and Lehnhoff, S. (2023). Quantum–classical co-simulation for smart grids: A proof-of-concept study on feasibility and obstacles. *Energy Informatics*, 6(Suppl 1):25.
- Wang, R. (2023). Enhancing energy efficiency with smart grid technology: a fusion of tcn, bigru, and attention mechanism. *Frontiers in Energy Research*, 11:1283026.