



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



SIMULAÇÃO MONTE CARLO NA AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE E DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

MILTON DE ASSIS RIBEIRO NETO - miltonribeiro.eng@gmail.com
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS - PUCGO

MARIA JOSÉ PEREIRA DANTAS - mjpdantas@gmail.com
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS - PUCGO

ÁREA: 3 – PESQUISA OPERACIONAL

SUBÁREA: 3.1 – MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

RESUMO: A CONFIABILIDADE E O DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS SÃO ASPECTOS IMPORTANTES PARA A OPERAÇÃO EFICIENTE E SEGURA DESSES SISTEMAS. ESTE ARTIGO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EXPLORA A APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO MONTE CARLO (MC) NA AVALIAÇÃO DESSES PARÂMETROS. É INICIADO COM UMA INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS E AOS FUNDAMENTOS DA SIMULAÇÃO MC, DESTACANDO SUA IMPORTÂNCIA E VERSATILIDADE. EM SEGUIDA, DISCUTINDO COMO A MC É UTILIZADA PARA ANALISAR A CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS, É ABORDADO A MODELAGEM DE FALHAS E INTERRUPÇÕES, E APRESENTADO ESTUDOS DE CASO QUE ILUSTRAM A EFICÁCIA DESSA TÉCNICA. ALÉM DISSO, EXAMINA-SE A APLICAÇÃO DA MC NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS, CONSIDERANDO O IMPACTO DE VARIÁVEIS ESTOCÁSTICAS. EXEMPLOS PRÁTICOS SÃO FORNECIDOS PARA DEMONSTRAR COMO A MC PODE SER EMPREGADA PARA OTIMIZAR A EFICIÊNCIA E A ROBUSTEZ DESSES SISTEMAS. A INTEGRAÇÃO DA MC COM OUTRAS TÉCNICAS, COMO O APRENDIZADO DE MÁQUINA, TAMBÉM É EXPLORADA, RESSALTANDO OS BENEFÍCIOS E DESAFIOS DESSA COMBINAÇÃO. POR FIM, É DISCUTIDO OS PRINCIPAIS DESAFIOS NA APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO MC EM SISTEMAS ELÉTRICOS E APRESENTAMOS PERSPECTIVAS FUTURAS PARA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO.

PALAVRAS-CHAVES: SIMULAÇÃO MONTE CARLO; CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS; AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO; ANÁLISE DE REDES DE ENERGIA; MODELAGEM ESTOCÁSTICA.

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade e o desempenho de sistemas elétricos são fatores essenciais para garantir a operação segura e eficiente desses sistemas. A crescente complexidade das redes elétricas modernas, impulsionada pela integração de fontes de energia renovável e pela crescente demanda por eletricidade, torna indispensável a aplicação de métodos robustos para a avaliação desses parâmetros. A simulação Monte Carlo (MC) surge como uma ferramenta poderosa e versátil para modelar e analisar a confiabilidade e o desempenho de sistemas elétricos (OLAJUYIN; OLULOPE; FASINA, 2022; SAKKI et al., 2022; SHANG et al., 2021).

A simulação MC baseia-se em princípios estocásticos, permitindo a análise de sistemas complexos por meio de amostragens aleatórias e probabilidades. Essa técnica tem sido amplamente utilizada em diversas áreas da engenharia, destacando-se pela sua capacidade de lidar com variáveis estocásticas e incertezas inerentes aos sistemas elétricos (SAKKI et al., 2022; YANG; YAGLI; SRINIVASAN, 2022). Diversos estudos têm demonstrado a eficácia da simulação MC em avaliações de confiabilidade e desempenho, abordando desde a modelagem de falhas e interrupções até a análise de impacto de eventos sísmicos em redes elétricas (LI et al., 2022; OLAJUYIN; OLULOPE; FASINA, 2022; REYES et al., 2021).

Este artigo de revisão visa explorar a aplicação da simulação MC na avaliação da confiabilidade e desempenho de sistemas elétricos, fornecendo uma visão abrangente das metodologias existentes e dos avanços recentes na área. Inicialmente, são apresentados os fundamentos da simulação MC e suas principais aplicações em engenharia. Em seguida, discutimos como a MC é utilizada para analisar a confiabilidade de sistemas elétricos, abordando a modelagem de falhas e interrupções, bem como estudos de caso que ilustram a eficácia dessa técnica.

Além disso, é examinado a aplicação da MC na avaliação do desempenho operacional dos sistemas, considerando o impacto de variáveis estocásticas e apresentando exemplos práticos. A integração da MC com outras técnicas, como o aprendizado de máquina, também é explorada, ressaltando os benefícios e desafios dessa combinação (LI et al., 2022; REYES et al., 2021).

Por fim, são discutidos os principais desafios na aplicação da simulação MC em sistemas elétricos e apresentadas perspectivas futuras para pesquisa e desenvolvimento na área. É encerrado com um resumo dos pontos principais abordados e as contribuições do artigo para a área de engenharia de sistemas elétricos, destacando a relevância da simulação Monte Carlo como uma ferramenta indispensável para a análise e melhoria da confiabilidade e desempenho.

2. FUNDAMENTOS DA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

A simulação MC é uma técnica estocástica utilizada para modelar e analisar sistemas complexos por meio de amostragens aleatórias e da teoria das probabilidades. Este método se destaca por sua capacidade de lidar com incertezas e variáveis estocásticas, sendo amplamente aplicado em diversas áreas da engenharia, incluindo a avaliação de confiabilidade e desempenho de sistemas elétricos (ASSIS et al., 2021; KRUPENEV; BOYARKIN; IAKUBOVSKII, 2020; REYES et al., 2021).

2.1 Princípios básicos da simulação Monte Carlo

A simulação Monte Carlo baseia-se em gerar um grande número de amostras aleatórias de variáveis de interesse, calculando os resultados de interesse para cada amostra e, em seguida, utilizando essas amostras para estimar a distribuição dos resultados possíveis. Os passos básicos para a realização de uma simulação MC incluem:

1. **Definição do Problema:** Identificação das variáveis e parâmetros chave que afetam o sistema em estudo;
2. **Modelagem Probabilística:** Atribuição de distribuições de probabilidade às variáveis de entrada, refletindo a incerteza e variabilidade inerentes ao sistema;
3. **Geração de Amostras Aleatórias:** Uso de métodos de geração de números aleatórios para criar amostras das distribuições de entrada;
4. **Simulação e Análise:** Execução de múltiplas iterações do modelo para calcular os resultados de interesse para cada conjunto de amostras;
5. **Interpretação dos Resultados:** Análise estatística dos resultados simulados para estimar métricas como média, variância, intervalos de confiança e distribuições de probabilidade.

2.2. Aplicações gerais em engenharia e sistemas elétricos

A simulação MC é aplicada em diversas áreas da engenharia devido à sua flexibilidade e capacidade de modelar sistemas complexos. Em sistemas elétricos, suas principais aplicações incluem:

1. **Avaliação de Confiabilidade:** Modelagem de falhas de componentes, interrupções de serviço e análise de disponibilidade do sistema. Por exemplo, estudos

como os de aplicam Monte Carlo para avaliar a confiabilidade de sistemas elétricos sob condições de eventos sísmicos (OLAJUYIN; OLULOPE; FASINA, 2022);

2. **Análise de Desempenho:** Avaliação do desempenho operacional de sistemas elétricos sob diferentes condições de carga e variabilidade de fontes de energia. Estudos como o de Reyes et al. (2021) demonstram a aplicação de MC para modelar a incerteza na geração de energia eólica;

3. **Planejamento e Expansão de Sistemas:** Utilização de MC para simular diferentes cenários de crescimento da demanda e expansão da infraestrutura, permitindo uma análise robusta das possíveis evoluções do sistema. Por exemplo, Yang e Jiang (2024) combinam MC com técnicas de aprendizado de máquina para otimizar o planejamento de sistemas elétricos.

2.3. Vantagens e limitações da simulação Monte Carlo

A principal vantagem da simulação MC é a sua capacidade de lidar com incertezas e variabilidades complexas, proporcionando uma visão detalhada das possíveis distribuições de resultados. No entanto, a técnica também apresenta limitações, como a necessidade de um grande número de iterações para obter resultados precisos, o que pode exigir considerável poder computacional.

A combinação da simulação MC com outras técnicas, como métodos de otimização e aprendizado de máquina, pode mitigar algumas dessas limitações, aumentando a precisão e eficiência das análises. Estudos recentes, como os de Altamimi e Jayaweera (2021), demonstram a eficácia dessas abordagens integradas na avaliação de confiabilidade de sistemas elétricos.

3. METODOLOGIA

A seguir será descrito detalhadamente a metodologia adotada, incluindo a seleção de artigos, procedimentos de análise e avaliação dos dados coletados. O estudo busca compreender e analisar os métodos existentes, identificando suas forças e limitações, e explorando oportunidades para avanços futuros.

3.1. Processo de revisão sistemática

O processo sistemático que foi seguido para revisar a literatura disponível. Esse processo garante que a seleção e análise dos artigos sejam realizadas de forma rigorosa e replicável.

- **Identificação da Literatura:** Uma pesquisa inicial foi conduzida na base de dados Web Of Science (WOS) usando as palavras-chave relevantes para compilar uma lista de artigos potenciais;
- **Triagem Inicial:** Os títulos e resumos dos artigos identificados foram avaliados de acordo com os critérios de seleção. Os artigos que cumpriram esses critérios passaram para análise completa;
- **Análise Detalhada:** Os textos completos dos artigos selecionados na triagem foram avaliados cuidadosamente para garantir sua relevância e qualidade;
- **Extração de Dados:** Informações importantes, como metodologias, resultados e conclusões, foram extraídas dos artigos para análise subsequente.

3.2. Critérios de seleção dos artigos

Este tópico trata da definição dos critérios que foram utilizados para selecionar os artigos relevantes para esta pesquisa. Os critérios garantem que os artigos escolhidos estejam alinhados com o tema e possuam qualidade acadêmica. Foi realizado um levantamento da literatura existente para coletar informações relevantes para o estudo:

- **Data de Publicação:** Optou-se por priorizar artigos publicados a partir de 2020 para incluir abordagens e tecnologias mais recentes;
- Para garantir a relevância e a profundidade da revisão, selecionamos artigos que correspondem a uma combinação específica de palavras-chave alinhadas com os objetivos de nossa pesquisa. Foi utilizado o seguinte *script* para realizar a pesquisa nas bases de dados acadêmicas:
 - $(TS=(\text{Monte Carlo Simulation}) \text{ AND } TS=(\text{reliability OR performance}) \text{ AND } TS=(\text{electrical systems OR power systems OR energy systems}) \text{ AND } PY=(2020-2024))$.
- Esse *script* foi estrategicamente desenhado para capturar uma ampla gama de estudos relevantes que exploram o tema abordado. Dessa forma, garantiu uma seleção abrangente e focada de literatura relevante, proporcionando uma base sólida para a análise crítica e síntese subsequente;

- **Relevância para a Pesquisa:** O conteúdo do artigo deve estar intimamente relacionado ao tema deste artigo;
- **Qualidade da Revista:** Foram selecionados artigos publicados em revistas com alto índice *Journal Citation Reports* (JCR);
- **Número de Citações:** Artigos com um alto número de citações foram priorizados, indicando um impacto significativo no campo;
- **Número de Referências:** A seleção também levou em consideração o número de referências, para assegurar uma revisão abrangente.

Inicialmente, a busca gerou 2901 resultados de pesquisas que se encaixavam nas palavras-chave selecionadas. Dentre esse conjunto de artigos, foram adotados critérios de priorização para a seleção dos trabalhos que seriam incluídos na revisão bibliográfica.

O primeiro critério utilizado foi o JCR, de forma a buscar priorizar trabalhos publicados em revistas de alto fator de impacto, que têm um maior reconhecimento no campo de estudo. Foi levado também em consideração o número de referências utilizadas em cada artigo selecionado, além do número de citações recebidas por cada artigo. Um alto número de referências e citações são indicativos de um maior impacto e relevância do trabalho na comunidade científica.

Foi avaliado também a aderência das palavras-chave ao conteúdo de cada artigo, já que é importante que os trabalhos selecionados estejam diretamente relacionados ao escopo do estudo, para garantir uma análise consistente e coerente.

Após aplicar rigorosamente esses critérios de priorização, foi possível selecionar 21 artigos mais relevantes para compor a revisão bibliográfica, conforme Apêndice A. Esses artigos foram escolhidos como as principais fontes de pesquisa para embasar esse estudo.

3.3. Análise e organização dos artigos selecionados

Foi estabelecido como foco principal o modo em que os artigos selecionados devem ser analisados e organizados. Será abordado a seguir como foi realizado a categorização dos artigos, síntese das informações, comparação entre estudos e identificação de lacunas na pesquisa.

- **Análise Temática:** Os artigos foram analisados e categorizados com base em temas comuns, como diferentes técnicas aplicadas ao tema proposto;
- **Síntese de Informações:** Os dados extraídos foram sintetizados para oferecer um panorama dos principais achados e metodologias utilizadas nos estudos;

- **Comparação e Contraste:** Uma comparação detalhada entre os diferentes estudos foi realizada, destacando suas similaridades, diferenças e contribuições específicas para o campo da previsão de demanda de energia;
- **Identificação de Lacunas e Oportunidades:** A análise crítica dos artigos permitiu identificar lacunas na literatura existente e áreas onde futuras pesquisas podem ser necessárias ou benéficas;
- **Apresentação dos Resultados:** Finalmente, os resultados da análise foram organizados de maneira lógica e apresentados com clareza. O objetivo foi discutir como os achados contribuem para o avanço do conhecimento no campo e fornecer insights para a aplicação prática.

Ao concluir a análise e organização dos artigos selecionados, foi essencial resumir as principais conclusões e discutido como elas se alinham ou divergem das expectativas iniciais e da literatura existente. Além disso, recomendações para futuras pesquisas e considerações para a implementação prática dos métodos estudados serão feitas com base nas evidências e análises realizadas.

4. APLICAÇÕES EM CONFIABILIDADE E DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

A simulação MC é uma ferramenta valiosa para a análise de confiabilidade e desempenho de sistemas elétricos, permitindo modelar falhas, interrupções e eventos estocásticos. Ela é usada para calcular métricas como o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e o Tempo Médio de Reparação (MTTR), simulando diversos cenários de falhas e reparações para uma visão detalhada da confiabilidade e disponibilidade do sistema (LI et al., 2022). Olajuyin, Olulope e Fasina (2022) utilizaram a MC para avaliar a confiabilidade de sistemas elétricos sob condições sísmicas, modelando falhas de componentes devido a terremotos e seu impacto operacional.

A MC também possibilita a modelagem detalhada de falhas de componentes e interrupções de serviço, definindo distribuições de probabilidade para tempos de falha e reparo. Altamimi e Jayaweera (2021) aplicaram a MC para avaliar a confiabilidade de sistemas com painéis fotovoltaicos, considerando fatores climáticos e propondo estratégias de manutenção preventiva. Estudos de caso, como os de Johnson et al. (2020), demonstram a eficácia da MC ao avaliar o impacto de terremotos em redes elétricas e identificar áreas críticas que precisam de reforços estruturais. Teixeira e Borges (2021) analisaram a confiabilidade de redes de

distribuição com geração eólica, propondo estratégias para melhorar a robustez da rede, enquanto Recalde e Alvarez-Alvarado (2020) usaram a MC para otimizar a confiabilidade de *microgrids* integradas com energias renováveis.

Na avaliação de desempenho, a MC é essencial para garantir a eficiência e confiabilidade operacional de sistemas elétricos, especialmente com a integração de fontes renováveis e a gestão de cargas variáveis (SHI; FAN, 2024). Kim e Hur (2021) utilizaram a MC para modelar a incerteza na geração de energia eólica e avaliar a estabilidade do sistema. Zhang, Wang e Su (2021) combinaram a MC com aprendizado de máquina para otimizar o desempenho de sistemas com conversores de potência, analisando incertezas na produção de energia eólica e solar. Estudos de caso, como os de Sadeghi, Hesani Naghshbandy e Bahramara (2020), mostram a aplicação da MC na otimização do dimensionamento de recursos em *microgrids* híbridas. Anand, Bagen e Rajapakse (2020) analisaram o impacto da inserção de veículos elétricos na confiabilidade e desempenho das redes de distribuição, enquanto Gkika et al. (2023) avaliaram o impacto de eventos climáticos extremos na integridade de redes de transmissão, modelando a fragilidade dos condutores elétricos.

A simulação Monte Carlo proporciona uma análise robusta de incertezas associadas a falhas de componentes, interrupções de serviço e variáveis estocásticas, permitindo aos engenheiros identificar componentes críticos, otimizar estratégias de manutenção e melhorar a robustez geral dos sistemas elétricos. Estudos de caso demonstram a eficácia dessa abordagem e sua importância na engenharia de sistemas elétricos.

5. INTEGRAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS

A integração da simulação MC com outras técnicas avançadas tem se mostrado uma abordagem eficaz para aprimorar a análise e a otimização de sistemas elétricos. Essa combinação permite explorar sinergias entre diferentes métodos, proporcionando uma avaliação mais completa e precisa do desempenho e da confiabilidade dos sistemas. A seguir, são discutidas as principais integrações da simulação MC com outras técnicas e seus benefícios.

5.1. Combinação com *machine learning*

A integração da simulação MC com técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*) tem se tornado cada vez mais comum na análise de sistemas elétricos (REYES et al., 2021). O aprendizado de máquina pode ser utilizado para identificar padrões em grandes

volumes de dados, melhorar a precisão das previsões e otimizar os parâmetros dos modelos de simulação.

- **Aprendizado Supervisionado para Predição de Falhas:** Zhang, Wang e Su (2021) aplicaram técnicas de aprendizado supervisionado para prever falhas em componentes do sistema elétrico, utilizando dados históricos e resultados de simulações MC. A combinação permitiu melhorar a precisão das previsões e desenvolver estratégias de manutenção preditiva mais eficazes;
- **Redes Neurais para Otimização de Desempenho:** Redes neurais artificiais podem ser utilizadas para otimizar o desempenho de sistemas elétricos modelados por simulação MC. Por exemplo, redes neurais podem ser treinadas para identificar as configurações operacionais que maximizam a eficiência e a confiabilidade do sistema sob diferentes condições operacionais (ASSIS et al., 2021).

5.2. Integração com métodos de otimização

Os métodos de otimização, quando combinados com a simulação MC, permitem identificar soluções ótimas para problemas complexos de planejamento e operação de sistemas elétricos. Essa integração é especialmente útil para lidar com múltiplos objetivos e restrições operacionais.

- **Algoritmos Genéticos para Planejamento de Sistemas:** Os algoritmos genéticos podem ser utilizados para otimizar o planejamento de expansão de sistemas elétricos, considerando múltiplos cenários simulados por MC. Por exemplo, Sadeghi, Hesami Naghshbandy e Bahramara (2020) utilizaram uma abordagem baseada em algoritmos genéticos para otimizar o dimensionamento de recursos em *microgrids*, integrando a variabilidade estocástica modelada pela simulação MC;
- **Otimização Multi-Objetivo:** Métodos de otimização multi-objetivo podem ser combinados com simulação MC para equilibrar diferentes critérios de desempenho, como custo, confiabilidade e sustentabilidade (HEYDARI et al., 2023). Esse tipo de abordagem é útil para tomar decisões estratégicas em sistemas elétricos complexos, onde múltiplos fatores devem ser considerados simultaneamente.

5.3. Benefícios e desafios da integração

A integração da simulação MC com outras técnicas oferece diversos benefícios, incluindo:

- **Aumento da Precisão:** A combinação de MC com aprendizado de máquina e métodos de otimização melhora a precisão das análises e previsões, permitindo uma melhor modelagem das incertezas e variabilidades;
- **Melhoria na Tomada de Decisões:** As abordagens integradas fornecem informações mais detalhadas e abrangentes, auxiliando na tomada de decisões estratégicas e operacionais em sistemas elétricos;
- **Eficiência Computacional:** Métodos de otimização podem ajudar a reduzir o tempo de computação necessário para simulações MC complexas, tornando a análise mais eficiente.

No entanto, a integração também apresenta desafios:

- **Complexidade Computacional:** A combinação de diferentes técnicas pode aumentar a complexidade computacional, exigindo maior poder de processamento e tempo de execução;
- **Necessidade de Dados de Alta Qualidade:** O sucesso da integração depende da disponibilidade de dados de alta qualidade para treinamento de modelos de aprendizado de máquina e calibração de simulações MC.

Exemplos de Aplicações Integradas:

- **Avaliação de Confiabilidade com Otimização e Aprendizado de Máquina:** Altamimi e Jayaweera (2021) utilizaram a integração de simulação MC com aprendizado de máquina para avaliar a confiabilidade de sistemas elétricos integrados com energias renováveis. Eles aplicaram algoritmos de otimização para identificar as melhores estratégias de manutenção e operação, resultando em melhorias significativas na confiabilidade do sistema;
- **Otimização de Recursos em *Microgrids*:** Recalde e Alvarez-Alvarado (2020) combinaram simulação MC com algoritmos genéticos para otimizar o dimensionamento e a operação de *microgrids*, considerando a variabilidade estocástica na produção de energia renovável.

6. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os principais desafios na aplicação da simulação Monte Carlo em sistemas elétricos são diversos. A complexidade computacional é um dos principais obstáculos. A simulação MC exige um grande número de iterações para obter resultados precisos, o que pode resultar em altos custos computacionais e tempo de processamento prolongado. Esse desafio é exacerbado em sistemas elétricos grandes e complexos, onde a modelagem de todas as variáveis e componentes pode ser extremamente demorada. Estudos como os de Liu et al. (2023) mostram a necessidade de técnicas eficientes de computação para lidar com a alta complexidade de sistemas elétricos submetidos a eventos sísmicos.

Outro desafio significativo é a disponibilidade e qualidade dos dados. A precisão das simulações MC depende da qualidade e quantidade dos dados de entrada. Dados inadequados ou imprecisos podem levar a resultados enganosos. Além disso, a coleta e a manutenção de dados de alta qualidade podem ser desafiadoras e dispendiosas. A integração de dados de sensores em tempo real e a utilização de técnicas de aprendizado de máquina para melhorar a qualidade dos dados são áreas promissoras, como demonstrado por Altamimi e Jayaweera (2021).

A modelagem de incertezas é também um desafio contínuo. Embora a simulação MC seja eficaz para lidar com variáveis estocásticas, a modelagem precisa das incertezas é complexa. A definição de distribuições de probabilidade apropriadas para todas as variáveis relevantes pode ser desafiadora e requer um entendimento profundo do sistema. Estudos como os de Liu et al. (2023) abordam a necessidade de técnicas avançadas para modelar a incerteza na produção de energia eólica e seu impacto na confiabilidade do sistema.

As perspectivas futuras para a simulação MC em sistemas elétricos são promissoras. A integração com tecnologias emergentes, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, pode melhorar significativamente a análise de sistemas elétricos. Essas tecnologias aprimoram a modelagem de incertezas, otimizam a alocação de recursos e melhoram a previsão de falhas, como explorado por Zhang, Wang e Su (2021) na otimização do desempenho de sistemas elétricos com conversores de potência.

O desenvolvimento de métodos híbridos, combinando MC com algoritmos genéticos e técnicas de programação estocástica, pode levar a abordagens mais robustas para a avaliação de sistemas elétricos. Sadeghi, Hesami Naghshbandy e Bahramara (2020) demonstraram o potencial dessa abordagem híbrida ao otimizar o dimensionamento de *microgrids*. Além disso, a adoção de tecnologias de computação de alto desempenho (HPC) pode superar os desafios

computacionais da simulação MC, permitindo simulações em paralelo e análises mais complexas.

A expansão da aplicação da simulação MC para novos domínios, como a integração de sistemas de energia distribuída, armazenamento de energia e redes inteligentes, pode abrir novas oportunidades de pesquisa. Recalde e Alvarez-Alvarado (2020) demonstraram a aplicação da MC na otimização de *microgrids* integradas com energias renováveis. O desenvolvimento de ferramentas e *frameworks* específicos para a simulação MC, com interfaces intuitivas e funcionalidades avançadas, facilitará sua adoção. Investimentos em software especializado que integram MC com aprendizado de máquina e otimização serão fundamentais para o avanço da área.

7. CONCLUSÃO

A simulação Monte Carlo se destaca como uma ferramenta poderosa e versátil para a avaliação de confiabilidade e desempenho de sistemas elétricos. Ao longo deste artigo, foi explorado a aplicação dessa técnica na modelagem de falhas, interrupções e variáveis estocásticas, demonstrando como ela pode fornecer uma análise detalhada e robusta de sistemas complexos.

Este método permite a análise de sistemas complexos por meio de amostragens aleatórias e probabilidades, sendo amplamente utilizado em engenharia elétrica para modelar incertezas e variabilidades. Foi possível avaliar a confiabilidade de sistemas elétricos, identificar componentes críticos e desenvolver estratégias de manutenção preventiva. Exemplos práticos incluíram a modelagem de falhas devido a eventos sísmicos e a avaliação da confiabilidade de *microgrids* integradas com energias renováveis.

Além disso, a simulação Monte Carlo foi aplicada para analisar o desempenho operacional de sistemas elétricos, considerando o impacto de variáveis estocásticas. Estudos de caso demonstraram como essa técnica pode otimizar a eficiência e a robustez de sistemas sob diferentes condições operacionais. A combinação com aprendizado de máquina e métodos de otimização mostrou-se eficaz para aprimorar a análise de sistemas elétricos, melhorando a precisão das previsões e desenvolvendo soluções mais robustas para problemas complexos.

Foi identificado os principais desafios na aplicação da simulação Monte Carlo, incluindo a complexidade computacional e a necessidade de dados de alta qualidade. As perspectivas futuras incluem a integração de tecnologias avançadas, o desenvolvimento de

métodos híbridos e a utilização de computação de alto desempenho para superar essas limitações.

Ao integrar a simulação com outras técnicas avançadas e explorar novos domínios de aplicação, espera-se que futuros estudos possam desenvolver soluções ainda mais eficazes e inovadoras para os desafios enfrentados pelas redes elétricas modernas. A contínua evolução tecnológica e metodológica na área de simulação e modelagem certamente abrirá novas oportunidades para a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas elétricos mais robustos e eficientes.

8. AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa PROSUC.

REFERÊNCIAS

ALTAMIMI, A.; JAYAWEERA, D. Reliability of power systems with climate change impacts on hierarchical levels of PV systems. **Electric Power Systems Research**, v. 190, 1 jan. 2021.

ANAND, M. P.; BAGEN, B.; RAJAPAKSE, A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 117, 1 maio 2020.

ASSIS, F. A. et al. Unsupervised machine learning techniques applied to composite reliability assessment of power systems. **INTERNATIONAL TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS**, v. 31, n. 11, nov. 2021.

GKIKI, A.; ZACHARIS, E. A.; SKIKOS DIMITRIOS N. AND LEKKAS, E. L. Battling the extreme: lessons learned from weather-induced disasters on electricity distribution networks and climate change adaptation strategies. **HYDROLOGY RESEARCH**, v. 54, n. 10, p. 1196–1226, out. 2023.

HEYDARI, A. et al. A combined multi-objective intelligent optimization approach considering techno-economic and reliability factors for hybrid-renewable microgrid systems. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 383, jan. 2023.

JOHNSON, B. et al. A Monte Carlo methodology for earthquake impact analysis on the electrical grid. **Electric Power Systems Research**, v. 184, 1 jul. 2020.

KIM, G.; HUR, J. Probabilistic modeling of wind energy potential for power grid expansion planning. **Energy**, v. 230, 1 set. 2021.

KRUPENEV, D.; BOYARKIN, D.; IAKUBOVSKII, D. Improvement in the computational efficiency of a technique for assessing the reliability of electric power systems based on the Monte Carlo method. **RELIABILITY ENGINEERING & SYSTEM SAFETY**, v. 204, dez. 2020.

LI, S. et al. A Machine Learning-Based Reliability Evaluation Model for Integrated Power-Gas Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 37, n. 4, p. 2527–2537, jul. 2022.

LIU, L. et al. Climate change impacts on planned supply-demand match in global wind and solar energy systems. **NATURE ENERGY**, v. 8, n. 8, p. 870–880, ago. 2023.

OLAJUYIN, E. A.; OLULOPE, P. K.; FASINA, E. T. An overview on reliability assessment in power systems using CI approaches. **ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING**, v. 71, n. 2, p. 425–443, 2022.

RECALDE, A. A.; ALVAREZ-ALVARADO, M. S. Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation. **Electric Power Systems Research**, v. 188, 1 nov. 2020.

REYES, A. et al. **Critical scenarios identification in power system simulations using graph measures and machine learning**. 2021 IEEE CHILEAN CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS ENGINEERING, INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (IEEE CHILECON 2021). **Anais...**345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2021.

SADEGHI, D.; HESAMI NAGHSHBANDY, A.; BAHRAMARA, S. Optimal sizing of hybrid renewable energy systems in presence of electric vehicles using multi-objective particle swarm optimization. **Energy**, v. 209, 15 out. 2020.

SAKKI, G. K. et al. Stochastic simulation-optimization framework for the design and assessment of renewable energy systems under uncertainty. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, v. 168, out. 2022.

SHANG, C. et al. Joining resilience and reliability evaluation against both weather and ageing causes. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, v. 152, dez. 2021.

SHI, J.; FAN, H. Regulatory mechanisms for climate-resilient urban energy systems. **SUSTAINABLE CITIES AND SOCIETY**, v. 102, mar. 2024.

TEIXEIRA, T. P.; BORGES, C. L. T. Operation Strategies for Coordinating Battery Energy Storage with Wind Power Generation and Their Effects on System Reliability. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 9, n. 1, p. 190–198, 1 jan. 2021.

YANG, D.; YAGLI, G. M.; SRINIVASAN, D. Sub-minute probabilistic solar forecasting for real-time stochastic simulations. **RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, v. 153, jan. 2022.

YANG, Z.; JIANG, Y. Quantifying resilient urban energy systems: Statistical analysis of climate adaptation, renewable integration, and socioeconomic dynamics. **SUSTAINABLE CITIES AND SOCIETY**, v. 101, fev. 2024.

ZHANG, B. Z.; WANG, M.; SU, W. Reliability Assessment of Converter-Dominated Power Systems Using Variance-Based Global Sensitivity Analysis. **IEEE OPEN ACCESS JOURNAL OF POWER AND ENERGY**, v. 8, p. 248–257, 2021.

APÊNDICE A - Relação de artigos selecionados com seus respectivos dados, conforme metodologia adotada no tópico

Título	Qtde Pal.-chave	Citações	Ano	Valor do JCR	Autor(es)	Revista	Referências	Cit. no WoS
A Machine Learning-Based Reliability Evaluation Model for Integrated Power-Gas Systems	2	13	2022	7.326	LI, S. et al.	IEEE Transactions on Power Systems	42	12
A Monte Carlo methodology for earthquake impact analysis on the electrical grid	4	36	2020	3.818	JOHNSON, B. et al.	Electric Power Systems Research	32	35
A combined multi-objective intelligent optimization approach considering techno-economic and reliability factors for hybrid-renewable microgrid systems	2	17	2023	11.072	HEYDARI, A. et al.	Journal of Cleaner Production	78	17
An overview on reliability assessment in power systems using CI approaches	2	2	2022	1.200	OLAJUYIN, E. A.; OLULOPE, P. K.; FASINA, E. T.	Archives of Electrical Engineering	96	2
Battling the extreme: lessons learned from weather-induced disasters on electricity distribution networks and climate change adaptation strategies	1	1	2023	2.752	GKIKI, A.; ZACHARIS, E. A.; SKIKOS, D. N.; LEKKAS, E. L.	Hydrology Research	70	1
Climate change impacts on planned supply-demand match in global wind and solar energy systems	1	14	2023	67.439	LIU, L. et al.	Nature Energy	43	13
Critical scenarios identification in power system simulations using graph measures and machine learning	2	1	2021	-	REYES, A. et al.	IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies	33	1
Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation	3	19	2020	3.818	RECALDE, A. A.; ALVAREZ-ALVARADO, M. S.	Electric Power Systems Research	65	19
Improvement in the computational efficiency of a technique for assessing the reliability of electric power systems based on the Monte Carlo method	4	43	2020	7.247	KRUPENEV, D.; BOYARKIN, D.; IAKUBOVSKII, D.	Reliability Engineering & System Safety	33	43
Joining resilience and reliability evaluation against both weather and ageing causes	3	6	2021	16.799	SHANG, C. et al.	Renewable & Sustainable Energy Reviews	62	6
Operation Strategies for Coordinating Battery Energy Storage with Wind Power Generation and Their Effects on System Reliability	3	28	2021	4.469	TEIXEIRA, T. P.; BORGES, C. L. T.	Journal of Modern Power Systems and Clean Energy	21	28

Título	Qtde Pal.-chave	Citações	Ano	Valor do JCR	Autor(es)	Revista	Referências	Cit. no WoS
Optimal sizing of hybrid renewable energy systems in presence of electric vehicles using multi-objective particle swarm optimization	3	103	2020	8.857	SADEGHI, D.; HESAMI NAGHSHBANDY, A.; BAHRAMARA, S.	Energy	63	101
Probabilistic modeling of wind energy potential for power grid expansion planning	2	21	2021	8.857	KIM, G.; HUR, J.	Energy	48	21
Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles	4	44	2020	5.659	ANAND, M. P.; BAGEN, B.; RAJAPAKSE, A.	International Journal of Electrical Power and Energy Systems	27	42
Quantifying resilient urban energy systems: Statistical analysis of climate adaptation, renewable integration, and socioeconomic dynamics	2	1	2024	10.696	YANG, Z.; JIANG, Y.	Sustainable Cities and Society	26	1
Regulatory mechanisms for climate-resilient urban energy systems	1	1	2024	10.696	SHI, J.; FAN, H.	Sustainable Cities and Society	23	1
Reliability Assessment of Converter-Dominated Power Systems Using Variance-Based Global Sensitivity Analysis	2	11	2021	3.300	ZHANG, B. Z.; WANG, M.; SU, W.	IEEE Open Access Journal of Power and Energy	27	11
Reliability of power systems with climate change impacts on hierarchical levels of PV systems	4	19	2021	3.818	ALTAMIMI, A.; JAYAWEERA, D.	Electric Power Systems Research	34	17
Stochastic simulation-optimization framework for the design and assessment of renewable energy systems under uncertainty	2	21	2022	16.799	SAKKI, G. K. et al.	Renewable & Sustainable Energy Reviews	48	21
Sub-minute probabilistic solar forecasting for real-time stochastic simulations	1	12	2022	16.749	YANG, D.; YAGLI, G. M.; SRINIVASAN, D.	Renewable & Sustainable Energy Reviews	68	12
Unsupervised machine learning techniques applied to composite reliability assessment of power systems	4	5	2021	2.639	ASSIS, F. A. et al.	International Transactions on Electrical Energy Systems	38	5