



APLICAÇÕES DE BIG DATA E ANALYTICS NA GESTÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

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

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

ÁREA: 3 – PESQUISA OPERACIONAL

SUBÁREA: 3.1. – MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

RESUMO: ESTE ARTIGO EXPLORA A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE BIG DATA E ANALYTICS PARA OTIMIZAR A GESTÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. INICIALMENTE, O ARTIGO DISCUTE A RELEVÂNCIA DA GESTÃO EFICIENTE DESSAS REDES E INTRODUZ CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE BIG DATA E ANALYTICS. SEGUE APRESENTANDO AS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DESSAS TECNOLOGIAS NO SETOR, INCLUINDO MANUTENÇÃO PREDITIVA, OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS E PREVISÃO DE FALHAS E INTERRUPÇÕES. O ARTIGO DESTACA DIVERSOS ESTUDOS DE CASO E EXEMPLOS PRÁTICOS DE EMPRESAS DE ENERGIA QUE IMPLEMENTARAM SOLUÇÕES BASEADAS EM BIG DATA, ANALISANDO OS RESULTADOS OBTIDOS E AS LIÇÕES APRENDIDAS. EM SEGUIDA, ABORDA OS DESAFIOS TÉCNICOS E ORGANIZACIONAIS ENFRENTADOS NA IMPLEMENTAÇÃO DESSAS TECNOLOGIAS, ALÉM DAS QUESTÕES DE PRIVACIDADE E SEGURANÇA DE DADOS. FINALMENTE, O ARTIGO EXAMINA AS TENDÊNCIAS FUTURAS E ÁREAS PROMISSORAS PARA PESQUISA, COMO AVANÇOS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E INTERNET DAS COISAS (IOT). CONCLUI COM UM RESUMO DOS PRINCIPAIS PONTOS DISCUTIDOS, ENFATIZANDO AS CONTRIBUIÇÕES DO USO DE BIG DATA E ANALYTICS PARA A EFICIÊNCIA E CONFIABILIDADE DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

PALAVRAS-CHAVES: BIG DATA; ANALYTICS; REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA; MANUTENÇÃO PREDITIVA; INTERNET DAS COISAS (IOT).

1. INTRODUÇÃO

A gestão eficiente das redes de distribuição de energia elétrica é fundamental para garantir a confiabilidade e a sustentabilidade do fornecimento de energia, essenciais para o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida. Com o advento de novas tecnologias, *Big Data* e *analytics* emergiram como ferramentas poderosas para transformar a maneira como essas redes são geridas, oferecendo soluções inovadoras para otimização de recursos, manutenção preditiva e prevenção de falhas. *Big Data* se caracteriza por um grande volume, variedade e velocidade de dados gerados, que podem ser analisados para extrair informações valiosas (ZAINAB et al., 2021).

As técnicas de *analytics*, incluindo *machine learning* e *data mining*, permitem interpretar esses dados e fornecer insights que melhoram a tomada de decisões na gestão das redes de distribuição de energia. Por exemplo, um modelo baseado em *big data analytics* foi desenvolvido para prever a demanda de ordens de serviço em empresas de distribuição de energia, mostrando resultados promissores na gestão da demanda e otimização dos recursos (FERREIRA et al., 2021).

Além disso, a integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e a computação em nuvem com *Big Data* está transformando a operação das redes elétricas inteligentes, oferecendo novas possibilidades para a análise e gerenciamento de grandes volumes de dados (RABIE; SALEH; ALI, 2021). No contexto de altas disponibilizações de energia fotovoltaica distribuída, a análise de dados pode ajudar a gerenciar a tensão e a regular a geração, beneficiando tanto os consumidores quanto os operadores de rede (STRINGER et al., 2021).

Este artigo revisa as principais aplicações de *Big Data* e *analytics* na gestão de redes de distribuição de energia elétrica, apresentando estudos de caso e exemplos práticos de empresas que adotaram essas tecnologias, analisando os resultados obtidos e as lições aprendidas. Além disso, são discutidos os desafios técnicos e organizacionais enfrentados na implementação dessas soluções, bem como as questões de privacidade e segurança de dados. Também são exploradas as tendências futuras e áreas promissoras para pesquisa, destacando avanços em inteligência artificial e IoT e suas potenciais contribuições para a gestão de redes de distribuição de energia (SCHNIDRIG et al., 2024).

Este trabalho visa fornecer uma visão abrangente e atualizada sobre o uso de *Big Data* e *analytics*, contribuindo para o avanço e aprimoramento contínuo deste setor crítico.

2. FUNDAMENTOS DE *BIG DATA* E *ANALYTICS*

A era digital trouxe consigo um aumento exponencial na quantidade de dados gerados diariamente. Esses dados, se bem gerenciados e analisados, têm o potencial de transformar a tomada de decisões em diversas áreas, incluindo a gestão de redes de distribuição de energia elétrica. *Big Data* e *analytics* são ferramentas fundamentais nesse contexto, permitindo a coleta, armazenamento e análise de vastas quantidades de informações provenientes de diversas fontes. Neste tópico, serão exploradas as definições e características de *Big Data*, bem como as principais técnicas e ferramentas de *analytics* aplicáveis para transformar esses dados em insights valiosos.

2.1. Definição de *Big Data* e suas características

Big Data refere-se a conjuntos de dados extremamente grandes e complexos que são difíceis de processar e analisar utilizando métodos tradicionais de gerenciamento de dados. Esses dados são caracterizados por cinco principais atributos, frequentemente referidos como os "5 Vs": volume, velocidade, variedade, veracidade e valor.

- **Volume:** Refere-se à enorme quantidade de dados gerados e coletados. Esses dados podem variar de terabytes a petabytes, sendo impossível gerenciá-los com sistemas tradicionais de banco de dados (WANG et al., 2021);
- **Velocidade:** Relaciona-se à rapidez com que os dados são gerados e precisam ser processados. Em muitas aplicações, como redes de distribuição de energia, a capacidade de analisar dados em tempo real é essencial (RABIE; SALEH; ALI, 2021);
- **Variedade:** Refere-se aos diferentes tipos de dados que podem ser coletados, incluindo dados estruturados, semiestruturados e não estruturados, provenientes de diversas fontes como sensores, redes sociais, vídeos e transações financeiras (FERREIRA et al., 2021);
- **Veracidade:** Envolve a qualidade e a confiabilidade dos dados. Com a grande quantidade de dados gerados, é importante assegurar que os dados sejam precisos e confiáveis para análises eficazes (SINGH et al., 2022);
- **Valor:** Diz respeito ao potencial de extrair informações valiosas dos dados. A análise eficaz de *Big Data* pode revelar insights importantes que podem melhorar a tomada de decisões e otimizar operações (HERRERA-FRANCO et al., 2024).

2.2. Técnicas e ferramentas de *analytics* aplicáveis

As técnicas de *analytics* aplicáveis ao *Big Data* incluem uma variedade de métodos de análise de dados que permitem extrair informações significativas e tomar decisões informadas. As principais técnicas incluem:

- **Machine Learning:** Envolve o uso de algoritmos que permitem aos sistemas aprender e melhorar automaticamente a partir da experiência sem ser explicitamente programados. É utilizado para prever tendências futuras e identificar padrões ocultos nos dados (RABIE; SALEH; ALI, 2021);
- **Data Mining:** Consiste em explorar grandes conjuntos de dados para descobrir padrões e relações significativas. É essencial para identificar tendências e comportamentos relevantes (FERREIRA et al., 2021);
- **Estatística Avançada:** Utiliza técnicas estatísticas complexas para analisar dados e inferir conclusões precisas. É fundamental para validar modelos de previsão e análise de dados (SINGH et al., 2024).

As ferramentas utilizadas para a análise de *Big Data* são diversas e poderosas, permitindo o processamento e a análise eficiente de grandes volumes de dados:

- **Hadoop:** Um *framework* de *software open-source* que suporta o processamento de grandes conjuntos de dados em um ambiente distribuído;
- **Spark:** Um mecanismo de análise unificado para processamento de dados em larga escala, conhecido por sua velocidade e facilidade de uso;
- **Tableau:** Uma ferramenta de visualização de dados que ajuda a criar gráficos interativos e *dashboards*, facilitando a interpretação dos dados analisados.

Essas técnicas e ferramentas são fundamentais para transformar o vasto potencial dos dados em insights práticos e aplicáveis, especialmente na gestão de redes de distribuição de energia elétrica.

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:
 - $(TS=(Big\ Data)\ AND\ TS=(Analytics)\ AND\ TS=(energy\ distribution\ OR\ electrical\ distribution)\ AND\ PY=(2020-2024))$.
- 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 71 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 15 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 REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As tecnologias de *Big Data* e *analytics* têm sido amplamente adotadas para melhorar a eficiência e a confiabilidade das redes de distribuição de energia elétrica (ZHENG et al., 2021). Essas tecnologias permitem a coleta, processamento e análise de grandes volumes de dados provenientes de diversos pontos da rede, facilitando a identificação de padrões e tendências que ajudam na tomada de decisões informadas. A seguir, será explorado três aplicações principais dessas tecnologias no contexto da distribuição de energia elétrica: manutenção preditiva e monitoramento, otimização de recursos e gestão de demanda, e previsão de falhas e interrupções.

4.1. Manutenção preditiva e monitoramento

Big Data e *analytics* desempenham um papel importante na manutenção preditiva e no monitoramento das redes de distribuição de energia elétrica. Através da coleta e análise contínua de dados provenientes de sensores e dispositivos IoT instalados em equipamentos críticos, é possível prever falhas antes que elas ocorram. Técnicas de *machine learning* e algoritmos preditivos analisam padrões de dados históricos e em tempo real para identificar sinais de desgaste ou anomalias que possam indicar uma falha iminente. Isso permite que as

equipes de manutenção realizem intervenções preventivas, reduzindo significativamente as interrupções e os custos associados a reparos emergenciais (RABIE; SALEH; ALI, 2021).

4.2. Otimização de recursos e gestão de demanda

A análise de dados também é fundamental para a otimização de recursos e a gestão da demanda de energia. Utilizando técnicas avançadas de *data mining* e *machine learning*, as empresas de energia podem prever padrões de consumo e ajustar a distribuição de energia de maneira mais eficiente. Isso inclui a implementação de estratégias de resposta à demanda, onde os consumidores são incentivados a reduzir ou deslocar seu uso de energia durante períodos de pico. Além disso, a análise de *Big Data* permite identificar áreas onde a infraestrutura pode ser melhorada para reduzir perdas e aumentar a eficiência operacional. A alocação eficiente de recursos não apenas melhora a sustentabilidade da rede, mas também proporciona economias significativas para as empresas e consumidores (FERREIRA et al., 2021).

4.3. Previsão de falhas e interrupções

Prever falhas e interrupções é uma aplicação crítica de *Big Data* e *analytics* em redes de distribuição de energia elétrica. Utilizando grandes volumes de dados históricos e em tempo real, as metodologias de previsão de falhas aplicam algoritmos de *machine learning* para identificar padrões que precedem interrupções. Estas metodologias incluem modelos estatísticos avançados, análise de séries temporais e técnicas de aprendizado profundo que podem detectar anomalias sutis que indicam um possível problema. A capacidade de prever falhas com precisão permite que as operadoras de rede tomem medidas proativas para mitigar os impactos, como redirecionar a energia, realizar manutenções preventivas ou atualizar a infraestrutura necessária, minimizando assim as interrupções no fornecimento de energia (SHI; FAN, 2024).

As aplicações de *Big Data* e *analytics* transformam a gestão das redes de distribuição de energia elétrica, proporcionando maior eficiência, confiabilidade e resiliência. Esses avanços tecnológicos permitem uma abordagem mais inteligente e proativa na operação e manutenção das redes, garantindo um fornecimento de energia mais estável e sustentável para todos os usuários.

5. ESTUDOS DE CASO E EXEMPLOS PRÁTICOS

As tecnologias de *Big Data* e *analytics* têm sido implementadas com sucesso por várias empresas de energia ao redor do mundo. Esses estudos de caso destacam os métodos usados e os resultados alcançados, demonstrando o potencial transformador dessas tecnologias na gestão de redes de distribuição de energia elétrica.

5.1. Exemplos de aplicação de *Big Data* em empresas de energia

Empresas como National Grid, DTE Energy e Ausgrid implementaram a plataforma de insights da IBM para monitorar a saúde e manutenção de ativos, melhorando significativamente a tomada de decisões. Por exemplo, a National Grid utiliza *Big Data* para monitorar e prever a manutenção necessária, o que resulta em uma operação mais eficiente e reduz os custos de manutenção emergencial (ZAINAB et al., 2021).

A NextEra, uma das principais produtoras de energia renovável nos Estados Unidos, aplica técnicas de *machine learning* para a operação dinâmica de suas turbinas eólicas. Essa abordagem permite à empresa operar com uma eficiência de \$3 a \$4 por MWh melhor do que qualquer outra empresa no país (ZAINAB et al., 2021).

Outro exemplo é a EDF Energy, que implementou uma plataforma de gestão de dados e *analytics* preditivo da SAS para modelagem de *churn* e avaliação da propensão de clientes mudarem de fornecedor de energia. A EDF conseguiu processar grandes volumes de dados com precisão, o que ajudou na retenção de clientes e na melhoria dos serviços oferecidos (ZAINAB et al., 2021).

5.2. Resultados obtidos e lições aprendidas

A implementação de soluções de *Big Data* e *analytics* resultou em vários benefícios para essas empresas. A National Grid, por exemplo, conseguiu reduzir o tempo de inatividade de seus equipamentos e melhorar a confiabilidade da rede elétrica. A NextEra aumentou sua eficiência operacional, resultando em custos operacionais mais baixos e maior competitividade no mercado de energia renovável. A EDF Energy, por sua vez, aprimorou suas estratégias de retenção de clientes, resultando em um aumento significativo na satisfação do cliente e na redução do *churn* (FERREIRA et al., 2021).

Esses estudos de caso também revelam várias lições importantes. A integração de novas tecnologias exige um planejamento cuidadoso e uma compreensão clara das capacidades e

limitações das ferramentas de *Big Data*. A colaboração entre diferentes departamentos e a formação de equipes interdisciplinares são essenciais para o sucesso das implementações. Além disso, a importância de investir em treinamento e capacitação dos funcionários para lidar com as novas tecnologias não pode ser subestimada (RABIE; SALEH; ALI, 2021).

Esses exemplos práticos demonstram como *Big Data* e *analytics* podem transformar a gestão das redes de distribuição de energia elétrica, proporcionando maior eficiência, confiabilidade e capacidade de resposta a mudanças no ambiente operacional.

6. DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO

A implementação de *Big Data* e *analytics* nas redes de distribuição de energia elétrica enfrenta vários desafios técnicos e organizacionais. Estes desafios podem afetar significativamente a eficiência e a eficácia dessas tecnologias se não forem adequadamente abordados.

6.1. Desafios técnicos e organizacionais

Integração de sistemas legados: Um dos maiores obstáculos técnicos é a integração de novos sistemas de *Big Data* com os sistemas legados já existentes. Muitas redes de distribuição de energia utilizam sistemas de gestão que foram implementados há décadas, e a integração desses sistemas com novas tecnologias pode ser complexa e onerosa. A compatibilidade entre diferentes formatos de dados e protocolos de comunicação pode exigir soluções personalizadas e extensos períodos de adaptação (BROSINSKY et al., 2024).

Resistência à mudança: A adoção de novas tecnologias geralmente encontra resistência organizacional. Os funcionários podem estar acostumados a métodos tradicionais e podem se sentir inseguros ou ameaçados pelas novas tecnologias. Para mitigar essa resistência, é essencial investir em programas de treinamento e capacitação que demonstrem os benefícios e a usabilidade das novas ferramentas (RABIE; SALEH; ALI, 2021).

Qualificação de pessoal: A falta de profissionais qualificados é outro desafio significativo. A implementação eficaz de *Big Data* e *analytics* requer conhecimentos especializados em ciência de dados, engenharia de dados e análise avançada. As empresas precisam investir em recrutamento, formação e retenção de talentos para garantir que tenham as habilidades necessárias para aproveitar ao máximo essas tecnologias (SEETHALAKSHMI; GOVINDASAMY; AKILA, 2020).

6.2. Questões de privacidade e segurança de dados

Privacidade dos dados: A coleta e análise de grandes volumes de dados podem levantar preocupações significativas sobre a privacidade dos consumidores. Dados detalhados sobre o consumo de energia podem revelar informações pessoais sensíveis, como hábitos diários e presença em casa. As empresas de energia precisam garantir que estão em conformidade com as regulamentações de proteção de dados e implementar medidas robustas para proteger a privacidade dos dados dos consumidores (FERREIRA et al., 2021).

Segurança dos dados: A segurança dos dados é crítica, especialmente em redes de energia, que são consideradas infraestruturas críticas. A implementação de *Big Data* e *analytics* expande a superfície de ataque, tornando as redes mais vulneráveis a ciberataques. As empresas precisam adotar práticas de segurança cibernética rigorosas, como criptografia, monitoramento contínuo de ameaças e resposta rápida a incidentes de segurança para proteger seus dados e sistemas (BABAR; TARIQ; JAN, 2020).

Para mitigar esses riscos, é fundamental que as empresas de energia invistam em soluções de segurança cibernética avançadas e promovam uma cultura de segurança em toda a organização. Isso inclui a adoção de políticas e procedimentos de segurança, treinamento regular dos funcionários e a colaboração com especialistas em segurança para manter as defesas atualizadas contra ameaças emergentes (ZAINAB et al., 2021).

A superação desses desafios técnicos e organizacionais é essencial para garantir o sucesso na implementação de *Big Data* e *analytics* nas redes de distribuição de energia elétrica, permitindo que as empresas tirem proveito total dessas tecnologias para melhorar a eficiência, a confiabilidade e a segurança de suas operações.

7. FUTURAS TENDÊNCIAS E PESQUISAS

O campo de *Big Data* e *analytics* continua a evoluir rapidamente, apresentando novas oportunidades e desafios para a gestão de redes de distribuição de energia elétrica. Este tópico explora as tendências emergentes e áreas promissoras para futuras pesquisas, com foco nos avanços tecnológicos e suas implicações, bem como na necessidade de uma análise contínua em tempo real e integração de fontes de dados diversificadas.

7.1. Avanços tecnológicos e suas implicações

Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (ML): A integração de IA e

ML com *Big Data* está revolucionando a forma como os dados são analisados e utilizados na gestão de redes elétricas. Algoritmos avançados de aprendizado de máquina podem analisar grandes volumes de dados para prever falhas, otimizar a operação da rede e melhorar a eficiência energética. Esses algoritmos também são capazes de aprender e adaptar-se a novas condições operacionais, tornando as redes mais resilientes e autônomas (RABIE; SALEH; ALI, 2021).

Internet das Coisas (IoT): A IoT desempenha um papel significativo ao conectar dispositivos e sensores em toda a rede de distribuição de energia, permitindo a coleta contínua de dados em tempo real. Esses dados podem ser analisados para fornecer insights detalhados sobre o desempenho da rede e identificar áreas que precisam de manutenção ou melhorias. A IoT também facilita a implementação de redes elétricas inteligentes, que podem responder automaticamente a mudanças na demanda e oferta de energia (CHEN; LIU, 2024).

Computação em Nuvem e na Borda (*Edge Computing*): A computação em nuvem permite o processamento e armazenamento de grandes volumes de dados, enquanto a computação na borda processa dados localmente perto da fonte de geração. Essa combinação melhora a eficiência do processamento de dados e reduz a latência, tornando possível a análise de dados em tempo real e a tomada de decisões imediatas (WANG et al., 2021).

7.2. Áreas promissoras para pesquisa futura

Análise em Tempo Real: A análise em tempo real é importante para a operação eficiente e confiável das redes de distribuição de energia. As futuras pesquisas devem se concentrar em desenvolver e aprimorar técnicas que permitam a coleta, processamento e análise de dados em tempo real, possibilitando respostas imediatas a eventos críticos e melhorando a resiliência da rede (RABIE; SALEH; ALI, 2021).

Integração de Fontes de Dados Diversificadas: A capacidade de integrar e analisar dados de diversas fontes, incluindo sensores IoT, sistemas SCADA, dados meteorológicos e informações de mercado, é essencial para uma visão holística da operação da rede. A pesquisa futura deve focar no desenvolvimento de plataformas de integração de dados que facilitem a combinação e análise desses diversos conjuntos de dados, oferecendo insights mais completos e acionáveis (SEETHALAKSHMI; GOVINDASAMY; AKILA, 2020).

Segurança e Privacidade dos Dados: À medida que mais dados são coletados e analisados, a segurança e a privacidade tornam-se questões cada vez mais críticas. As futuras pesquisas devem explorar novas técnicas de segurança de dados, incluindo criptografia

avançada e tecnologias de blockchain, para proteger os dados contra acessos não autorizados e garantir a conformidade com regulamentações de privacidade (BABAR; TARIQ; JAN, 2020).

Essas tendências e áreas de pesquisa promissoras demonstram o potencial contínuo de *Big Data* e *analytics* para transformar a gestão de redes de distribuição de energia elétrica, melhorando a eficiência, a confiabilidade e a segurança das operações.

8. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi explorado a importância e as aplicações de *Big Data* e *analytics* na gestão das redes de distribuição de energia elétrica. Inicialmente, definimos *Big Data* e suas características principais, como volume, velocidade, variedade, veracidade e valor, diferenciando esses dados dos dados tradicionais. Em seguida, detalhado as técnicas e ferramentas de *analytics*, incluindo *machine learning*, *data mining* e estatística avançada, e discutido como essas tecnologias podem transformar dados brutos em *insights* valiosos.

Foi abordado também as principais aplicações de *Big Data* em redes de distribuição de energia elétrica, destacando a manutenção preditiva e monitoramento, a otimização de recursos e gestão de demanda, e a previsão de falhas e interrupções. Exemplos de estudos de caso e resultados práticos demonstraram os benefícios tangíveis dessas tecnologias, como a melhoria da eficiência operacional e a redução de custos e interrupções.

Os desafios técnicos e organizacionais na implementação dessas tecnologias também foram discutidos, incluindo a integração de sistemas legados, a resistência à mudança e a necessidade de qualificação de pessoal, além de abordar as questões críticas de privacidade e segurança de dados, propondo medidas para mitigar esses riscos.

Por fim, foi examinado as tendências futuras e áreas promissoras para pesquisa, como os avanços em inteligência artificial e IoT, a análise em tempo real e a integração de fontes de dados diversificadas, destacando o potencial contínuo de *Big Data* e *analytics* para melhorar a eficiência e a resiliência das redes de distribuição de energia.

Este artigo fornece uma visão abrangente das aplicações dessas tecnologias, demonstrando como elas podem transformar a gestão de redes elétricas, melhorar a eficiência operacional e garantir um fornecimento de energia mais confiável e sustentável.

As recomendações para futuras implementações incluem a necessidade de um planejamento cuidadoso e uma abordagem integrada que considere tanto os aspectos técnicos quanto os organizacionais. É necessário investir na qualificação de pessoal e na criação de uma cultura de inovação que promova a adoção de novas tecnologias. Além disso, futuras pesquisas

devem focar no desenvolvimento de soluções que facilitem a análise em tempo real e a integração de fontes de dados diversificadas, garantindo a segurança e a privacidade dos dados.

Ao destacar as tendências emergentes e as áreas promissoras para pesquisa, este artigo fornece um roteiro para o avanço contínuo e a implementação eficaz de *Big Data* e *analytics* na gestão de redes de distribuição de energia elétrica, contribuindo para um futuro energético mais eficiente e sustentável.

9. AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa PROSUC.

REFERÊNCIAS

BABAR, M.; TARIQ, M. U.; JAN, M. A. Secure and resilient demand side management engine using machine learning for IoT-enabled smart grid. **Sustainable Cities and Society**, v. 62, 1 nov. 2020.

BROSINSKY, C. et al. A Fortunate Decision That You Can Trust: Digital Twins as Enablers for the Next Generation of Energy Management Systems and Sophisticated Operator Assistance Systems. **IEEE POWER & ENERGY MAGAZINE**, v. 22, n. 1, p. 24–34, jan. 2024.

CHEN, T.; LIU, C. Soft computing based smart grid fault detection using computerised data analysis with fuzzy machine learning model. **SUSTAINABLE COMPUTING-INFORMATICS & SYSTEMS**, v. 41, jan. 2024.

FERREIRA, V. H. et al. Big data analytics for spatio-temporal service orders demand forecasting in electric distribution utilities. **Energies**, v. 14, n. 23, 1 dez. 2021.

HERRERA-FRANCO, G. et al. A Sustainability Approach between the Water-Energy-Food Nexus and Clean Energy. **WATER**, v. 16, n. 7, abr. 2024.

RABIE, A. H.; SALEH, A. I.; ALI, H. A. Smart electrical grids based on cloud, IoT, and big data technologies: state of the art. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 12, n. 10, p. 9449–9480, 1 out. 2021.

SCHNIDRIG, J. et al. Power to the People: On the Role of Districts in Decentralized Energy Systems. **ENERGIES**, v. 17, n. 7, abr. 2024.

SEETHALAKSHMI, V.; GOVINDASAMY, V.; AKILA, V. Hybrid gradient descent spider monkey optimization (HGDSMO) algorithm for efficient resource scheduling for big data processing in heterogenous environment. **Journal of Big Data**, v. 7, n. 1, dez. 2020.

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

SINGH, D. et al. Enhanced solar and wind potential during widespread temperature extremes across the US interconnected energy grids. **ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS**, v. 19, n. 4, abr. 2024.

SINGH, R. et al. **Energy System 4.0: Digitalization of the Energy Sector with Inclination towards Sustainability**. **SensorsMDPI**, , 1 set. 2022.

STRINGER, N. et al. Fair consumer outcomes in the balance: Data driven analysis of distributed PV curtailment. **Renewable Energy**, v. 173, p. 972–986, 1 ago. 2021.

WANG, Q. et al. **Integrating digital technologies and public health to fight covid-19 pandemic: Key technologies, applications, challenges and outlook of digital healthcare**. International Journal of Environmental Research and Public Health. **Anais...MDPI**, 1 jun. 2021.

ZAINAB, A. et al. Big Data Management in Smart Grids: Technologies and Challenges. **IEEE Access**, v. 9, p. 73046–73059, 2021.

ZHENG, H. et al. A Distributed Hierarchical Deep Computation Model for Federated Learning in Edge Computing. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 12, p. 7946–7956, 1 dez. 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 Distributed Hierarchical Deep Computation Model for Federated Learning in Edge Computing	2	28	2021	11.648	ZHENG, H. et al.	IEEE Transactions on Industrial Informatics	41	26
A Fortunate Decision That You Can Trust: Digital Twins as Enablers for the Next Generation of Energy Management Systems and Sophisticated Operator Assistance Systems	2	0	2024	3.096	BROSINSKY, C. et al.	IEEE Power & Energy Magazine	0	0
A Sustainability Approach between the Water-Energy-Food Nexus and Clean Energy	1	1	2024	3.530	HERRERA-FRANCO, G. et al.	Water	112	1
Big Data Analytics for Spatio-Temporal Service Orders Demand Forecasting in Electric Distribution Utilities	2	3	2021	3.252	FERREIRA, V. H. et al.	Energies	25	3
Big Data Management in Smart Grids: Technologies and Challenges	2	17	2021	3.476	ZAINAB, A. et al.	IEEE Access	83	17
Enhanced Solar and Wind Potential during Widespread Temperature Extremes across the US Interconnected Energy Grids	1	0	2024	6.947	SINGH, D. et al.	Environmental Research Letters	88	0

Título	Qtde Pal.-chave	Citações	Ano	Valor do JCR	Autor(es)	Revista	Referências	Cit. no WoS
Energy System 4.0: Digitalization of the Energy Sector with Inclination towards Sustainability	2	34	2022	3.847	SINGH, R. et al.	Sensors	180	34
Fair Consumer Outcomes in the Balance: Data Driven Analysis of Distributed PV Curtailment	2	12	2021	8.634	STRINGER, N. et al.	Renewable Energy	89	11
Hybrid Gradient Descent Spider Monkey Optimization (HGDSMO) Algorithm for Efficient Resource Scheduling for Big Data Processing in Heterogenous Environment	2	19	2020	10.835	SEETHALAKSHMI, V.; GOVINDASAMY, V.; AKILA, V.	Journal of Big Data	30	19
Integrating Digital Technologies and Public Health to Fight COVID-19 Pandemic: Key Technologies, Applications, Challenges and Outlook of Digital Healthcare	2	77	2021	4.614	WANG, Q. et al.	International Journal of Environmental Research and Public Health	264	73
Power to the People: On the Role of Districts in Decentralized Energy Systems	1	0	2024	3.252	SCHNIDRIG, J. et al.	Energies	62	0
Regulatory Mechanisms for Climate-Resilient Urban Energy Systems	1	1	2024	10.696	SHI, J.; FAN, H.	Sustainable Cities and Society	23	1
Secure and Resilient Demand Side Management Engine Using Machine Learning for IoT-Enabled Smart Grid	2	81	2020	10.696	BABAR, M.; TARIQ, M. U.; JAN, M. A.	Sustainable Cities and Society	41	80
Smart Electrical Grids Based on Cloud, IoT, and Big Data Technologies: State of the Art	2	11	2021	3.662	RABIE, A. H.; SALEH, A. I.; ALI, H. A.	Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing	88	11
Soft Computing Based Smart Grid Fault Detection Using Computerised Data Analysis with Fuzzy Machine Learning Model	1	3	2024	4.923	CHEN, T.; LIU, C.	Sustainable Computing-Informatics & Systems	22	3