



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
ENGENHARIA DE ENERGIAS

JULIO SIMÃO DA CUNHA CUMBA

**AVALIAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE REDES ELÉTRICAS
INTELIGENTES AO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

REDENÇÃO

2024

JULIO SIMÃO DA CUNHA CUMBA

AVALIAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE REDES ELÉTRICAS
INTELIGENTES AO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Energias da
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira.
Orientadora: Prof. Ma. Janaína Barbosa Almada

REDENÇÃO

2024

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Cumba, Julio Simão da Cunha.

C969a

Avaliação da integração das tecnologias de redes elétricas inteligentes ao sistema elétrico de potência / Julio Simão da Cunha Cumba. - Redenção, 2024.

42fl: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2024.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Janaína Barbosa Almada.

1. Smart Grid. 2. Sistema Elétrico de Potência. 3. Tecnologias. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 537

JULIO SIMÃO DA CUNHA CUMBA

AVALIAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE REDES ELÉTRICAS
INTELIGENTES AO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

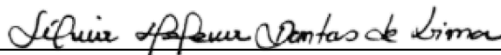
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Energias da
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira.

Aprovada em: 09/02/202.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Ma. Janaína Barbosa Almada (Orientadora)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Profa. Dra. Silvia Helena Dantas de Lima
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Documento assinado digitalmente

JAIRO LIMA DO NASCIMENTO

Data: 28/02/2024 09:33:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Mr. Jairo Lima do Nascimento

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por toda honra e louvor pelo dom da vida e pelas inúmeras bênçãos.

Quero expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Simão Da Cunha Cumba e Antonia Cumba, por aceitarem a missão de cuidar de mim neste mundo. Sou imensamente grato a vocês por toda a educação, conselhos e amor infinito.

Agradeço à minha orientadora, Professora M^a Janaina Barbosa Almada, por sua orientação valiosa, paciência e apoio ao longo de todo o processo de elaboração deste trabalho.

Agradeço também à UNILAB pela oportunidade, ao meu Instituto IEDS e aos professores.

Quero expressar minha gratidão aos meus irmãos/as, tios, tias e a minha namorada pelo apoio, carinho, parceria, compreensão, e a paciência ao longo dessa caminhada.

Agradeço aos amigos e colegas que estiveram ao meu lado, compartilhando conhecimento, oferecendo suporte moral e incentivando-me a persistir diante dos desafios acadêmicos.

RESUMO

A avaliação da integração das tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes no Sistema Elétrico de Potência refere-se às consequências e mudanças resultantes da incorporação de soluções na infraestrutura elétrica tradicional. Avalia-se os impactos e os desafios para aprimorar a eficiência e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Para atingir esse propósito, é necessário identificar as principais tecnologias e componentes nas Redes Elétrica Inteligente, analisar os impactos das tecnologias de *Smart Grid* na qualidade, confiabilidade e disponibilidade da energia elétrica, e a investigar os benefícios econômicos decorrentes da implantação da *Smart Grid*, como a redução de perdas e aumento da eficiência energética. A metodologia empregada neste estudo é uma revisão da literatura, um método que busca discutir o desenvolvimento do tema sob diferentes perspectivas. Essa abordagem envolve uma análise crítica de literatura publicada em artigos científicos, livros e revistas eletrônicas, permitindo uma atualização do conhecimento sobre o tema. Ao adotar essa abordagem metodológica, o estudo visa consolidar conhecimentos, identificar lacunas e apresentar uma análise abrangente sobre a integração das tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes no contexto do Sistema Elétrico de Potência.

Palavras-chave: Integração; Tecnologias; *Smart Grid*; Sistema Elétrico de Potência.

ABSTRACT

The technology assessment of Smart Grid technologies in the Electric Power System refers to the consequences and changes resulting from the incorporation of solutions into traditional electrical infrastructure. Assess the impacts and challenges to improve the efficiency and reliability of the amount of electrical energy. To achieve this purpose, it is necessary to identify the main technologies and components in Smart Electric Grids, analyze the impacts of Smart Grid technologies on the quality, reliability and availability of electrical energy, and investigate the economic benefits arising from the implementation of the Smart Grid, such as reducing losses and increasing energy efficiency. The methodology used in this study is a literature review, a method that seeks to discuss the development of the topic from different perspectives. This approach involves a critical analysis of literature published in scientific articles, books and electronic magazines, allowing for an update of knowledge on the topic. By adopting this methodological approach, the study aims to consolidate knowledge, identify gaps and present a comprehensive analysis on the integration of Smart Grid technologies in the context of the Electric Power System.

Keywords: Integration; Technologies; Smart Electrical Grids; Electrical Power System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Primera central de energia.	17
Figura 2- Cabos elétricos em Nova York no final do século XIX	18
Figura 3- Hierarquia tradicional do SEP	19
Figura 4- Esquema básico do Sistema Elétrico de Potência.....	20
Figura 5- Motivadores regionais das REI.....	23
Figura 6- Motivadores para a implantação de redes elétricas	23
Figura 7- Motivadores para a implantação das REIs no Brasil	24
Figura 8 - Modelo conceitual de Rede Inteligente	25
Figura 9 - Comparação entre a medição convencional e inteligente.....	27
Figura 10 - Medidor inteligente de Enel.....	27
Figura 11- Infraestrutura de comunicação.....	29
Figura 12- Arquitetura de comunicação entre domínios.	30
Figura 13 - Arquitetura do sistema SCADA	31
Figura 14- Medidores ZEUS 8021, ZEUS 8031 e ZEUS 8023.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

REI	Redes Elétricas Inteligentes
SG	<i>Smart Grid</i>
SEP	Sistema Elétrico Potência
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
EUA	Estados Unidos De América
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia
GD	Geração Distribuída
LED	Diodo emissor de luz
AMR	Leitura Automática do Medidor
AMI	Infraestrutura de medição Avançado
AMM	Gerenciamento Avançado de Medidor
MDM	Gerenciamento de dados de Medidor
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
TIC	Sistema de Informação e Comunicação
WAN	Wide Area Network
NAN	Neighborhood Area Network
HAN	<i>Home Area Network</i>
MME	Ministério de Minas Energias
PLC	Controlador lógico programável
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
PMU	Unidade de Medição Fasorial
IEDs	Intelligent Electronic Devices
RTUs	Unidades Terminais Remotas
SCADA	Sistema de automação e Aquisição de Dados
HMI	Homem-Máquina
EMA	<i>Energy Market Authority</i>
AIR	Avaliação de Impacto Regulatório
ACB	Análise Custo-Benefício

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivos Específicos.....	15
1.3	Metodologia	15
1.4	Estrutura do trabalho	16
2	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	17
2.1	Histórico.....	17
2.2	Configuração do SEP	18
2.2.1	Modernização do SEP.....	21
2.3	Redes elétricas inteligentes.....	22
2.3.1	Desafios para as REI.....	25
2.3.2	Tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes.....	26
3	TRANSFORMAÇÃO DO SEP EM REI.....	33
3.1	Integração de tecnologias de REI.....	33
3.2	Desafios e oportunidades.....	34
3.3	Casos de sucesso	37
4	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das décadas, as redes elétricas tradicionais passaram por uma evolução significativa, incorporando avanços tecnológicos e melhorias operacionais para atender à crescente demanda por eletricidade, tornando a distribuição de energia mais eficiente e confiável.

A vivência humana está entrelaçada com equipamentos e dispositivos elétricos que tornam a vida mais prática e confortável. Entretanto, quando ocorre uma interrupção do fornecimento de energia por problemas técnicos, as consequências são transtornos, aflições e prejuízos financeiros (Piran, 2020).

Portanto, a sociedade atual deve considerar a necessidade de investimentos em infraestrutura e políticas de energia mais robustas para garantir a continuidade e a qualidade do serviço de energia elétrica. A utilização de equipamentos de proteção e controle, ao longo das redes elétricas, com acesso à comunicação e à informação formam as Redes Elétricas Inteligentes (REI), em inglês, *Smart Grids* (SG), que garantem uma maior resiliência sistêmica. O maior impacto negativo na implementação das REI é o fator econômico e regulatório. Destaca-se que independentemente da tecnologia a ser implantada, inicialmente pode ser percebida como um investimento sem retorno imediato, sendo apenas com o passar do tempo que se revelam os benefícios (Dutra et al. 2021).

A integração das tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes no sistema elétrico tradicional representa um avanço significativo na gestão e eficiência do fornecimento de energia elétrica. Essa transição marca uma evolução em todo mundo, impulsionado pelo progresso tecnológico e pela necessidade de enfrentar os desafios modernos no setor.

As REI incorporam tecnologias avançadas de comunicação, automação e controle para aprimorar a confiabilidade e a eficiência das operações dos sistemas elétricos. Essa integração permite um monitoramento em tempo real, facilitando a detecção e resolução proativa de falhas, otimizando a distribuição de energia e reduzindo as falhas e perdas na transmissão (Cabello, 2012, Falcão, 2010).

O tema é relevante devido às REI fornecerem uma gestão energética mais eficiente e dinâmica, permitindo a otimização dos recursos na identificação das falhas rapidamente, facilitando a reconfiguração da rede de forma mais rápida. Outro ponto relevante é a maior facilidade de integração de fontes renováveis intermitentes promovendo a sustentabilidade ambiental (Arceno, 2022 e Alcântara, 2012).

Nesse contexto, o desenvolvimento de uma revisão da literatura sobre o tema proposto deve contribuir com a divulgação do assunto que deve ser relevante aos profissionais da área nos próximos anos, além de possibilitar uma análise sobre um determinado assunto a partir de diferentes perspectivas, auxiliando em sua compreensão (Rother, 2007).

1.1 Justificativa

Apesar da evolução do tema nas duas últimas décadas, os estudos de Piran (2020) e de Arceno (2022) mostram que até o momento a maioria dos países estão num estágio inicial de instalação dos seu projetos de implementação de tecnologias inteligentes em sistemas de potência.

Dessa maneira, a revisão da literatura sobre integração das tecnologias de REI ainda é oportuna e necessária. Contribuindo com a ampliação dos conhecimentos dos leitores sobre essa temática específica, pois as revisões têm a função de preencher lacunas existentes através da combinação de diferentes pesquisas bibliográficas (Cordeiro, 2007).

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a integração das tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes no sistema elétrico de potência tradicional, identificando seus impactos, eficácia e desafios para aprimorar a eficiência e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Identificar as principais tecnologias e componentes envolvidos nas Redes de Distribuição Inteligente.
- Analisar os impactos das tecnologias de *Smart Grid* na qualidade, confiabilidade e disponibilidade de energia elétrica.
- Investigar os benefícios econômicos decorrentes da implantação da *Smart Grid*.

1.3 Metodologia

Este estudo trata-se de uma revisão da literatura. As revisões são publicações amplas com a função de discutir o desenvolvimento de um assunto sob pontos de vista

diferentes. Esse tipo de estudo constitui basicamente da análise da literatura publicada em artigos científicos, livros, revistas impressas ou eletrônicas na interpretação e análise crítica do autor, com o objetivo de permitir ao leitor uma atualização do seu conhecimento sobre um determinado tema (Cordeiro et al., 2007; Vosgerau e Romanowski, 2014).

Para essa revisão, foi realizada uma busca por artigos, livros, dissertações e teses nas bases de dados Google Acadêmico, periódicos capes, SciELO, IEEE XPLORE e google. Além da busca nas bases de dados, também foram realizadas pesquisas em sites, jornais e revistas. As buscas ocorreram no mês de julho a dezembro de 2023 e as palavras-chave utilizadas na busca foram: redes elétricas inteligentes, *smart grid*, *smart meters*, eficiência energética e automação de sistemas elétricos.

Como critério de inclusão dos materiais literários neste estudo, definiu-se o período de publicação de 17 anos pela possibilidade de poder ser encontrado um maior número de artigos científicos sobre o tema. Além disso, incluíram-se apenas artigos disponibilizados em português e inglês, dissertações, teses, livros, matérias de revistas eletrônicas e sites. Como critérios de exclusão, foram rejeitados os materiais literários que não tinham relação direta com o tema proposto pelo trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 4 capítulos. O capítulo 1, Introdução, apresenta brevemente o contexto, os objetivos a serem alcançados, a justificativa para a realização do trabalho e a metodologia. O capítulo 2, Sistema Elétrico de Potência (SEP), discorre sobre a história às suas configurações e modernização, também foi abordado sobre as redes elétricas inteligentes com seguintes tópicos: desafios e tecnologias.

O capítulo 3 descreve sobre Transformação de SEP em REI com os tópicos relacionados à implementação de redes elétricas inteligentes no sistema elétrico convencional, desafios e obstáculos na implementação, e os exemplos de alguns países que já implementaram o sistema. Por fim, o capítulo 4 apresenta as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho.

2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

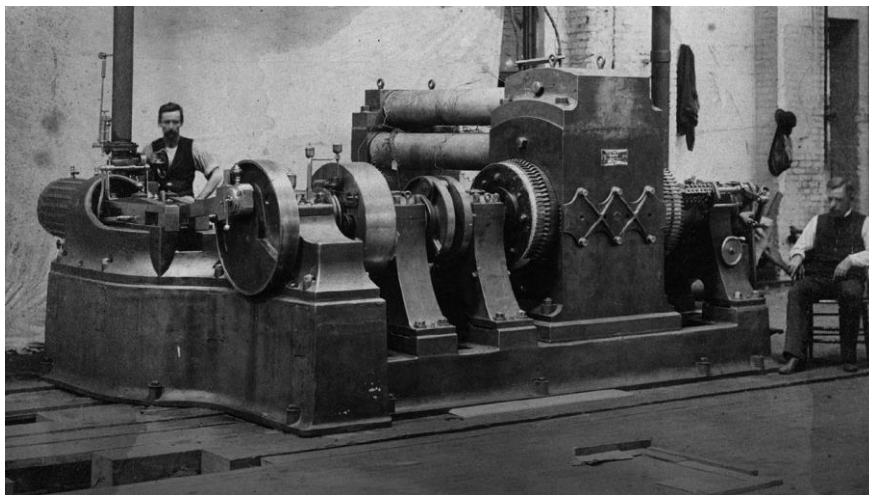
2.1 Histórico

O sistema elétrico de potência começou a ser discutido no final do século XIX, na época do desenvolvimento de várias tecnologias relacionadas à energia elétrica. Essa época caracterizou-se por diversas descobertas que vários autores denominam de “Guerra das correntes”, descrita pelo documentário "A Batalha das Correntes" (The Current War, EUA, 2017).

No documentário, foi abordada a rivalidade existente entre Nikola Tesla e Thomas Edison para determinar qual sistema deveria prevalecer na distribuição de eletricidade em Nova Iorque. Tesla defendia a utilização da corrente alternada, que entendia como mais simples e barata sua instalação, contra Thomas Edison que propôs a corrente contínua, que já era utilizada na iluminação pública e tinha se mostrado segura. Embate das ideias entre estes estudiosos e inventores envolveu a disputa de patentes e o desenvolvimento comercial dos equipamentos que utilizariam a energia elétrica que seria gerada por uma usina (Martins, 2020).

Thomas Edison com a sua utilização de corrente contínua iniciou em vantagem devido ao desenvolvimento e comercialização das lâmpadas incandescentes em 1881 (Matos, 2017). A história registra a empresa *Manhattan Pearl Street Station* como pioneira do sistema elétrico estabelecido em Nova Iorque por Edison, que entrou em operação no ano de 1882. Esse sistema inicial era uma de distribuição abastecida por um único gerador movido a carvão, Figura 1, que fornecia 100 volts de tensão elétrica para acender algumas centenas de lâmpadas.

Figura 1- Primera central de energia.



Fonte: Mattede(2019).

Nesse período, as redes elétricas eram de pequenas distâncias, pois as fontes de geração eram localizadas próximas aos consumidores finais. A Figura 2 mostra uma das primeiras redes de distribuição. Com o passar do tempo e o crescimento da demanda por eletricidade, essas redes evoluíram para sistemas maiores e interconectados, similares ao formato atual. Hoje, as redes elétricas são mais complexas, tem-se diversas usinas geradoras, linhas de transmissão e redes de distribuição interligadas (Zame et al., 2018).

Figura 2- Cabos elétricos em Nova York no final do século XIX



Fonte: Electrecidad (2019).

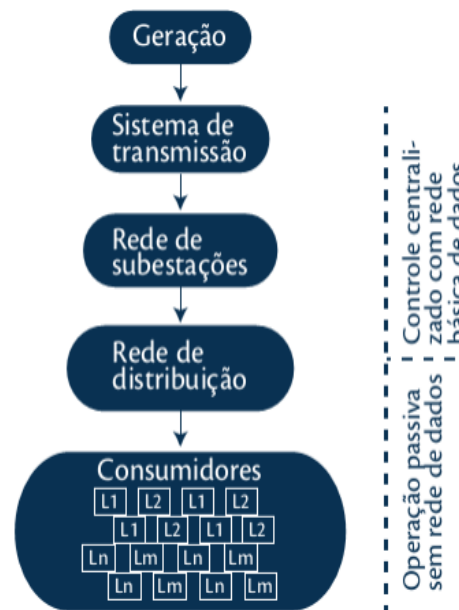
Essa disputa científica e comercial resultou na vitória de Tesla, que estava associado com o empresário George Westinghouse, que comprou todas suas patentes de equipamentos em corrente alternada, tornando o sistema em corrente alternada comercial (Lima, 2017).

2.2 Configuração do SEP

O esquema básico do modelo convencional de fornecimento de energia elétrica é ilustrado na Figura 3, como observa-se a energia flui de maneira unidirecional, desde a geração até chegar aos consumidores finais. Os consumidores têm participação limitada na operação e eficiência do sistema. A geração de energia, composta por usinas hidrelétricas, termelétricas e nucleares, é a parte mais automatizada. A transmissão conta com sistemas avançados de supervisão de contingências. Por outro lado, a distribuição apresenta automação pouco expressiva (Figueiró, 2013).

A Figura 3 mostra um aspecto comum do SEP que seria a ausência de um sistema de coleta de dados abrangente nas redes de distribuição e consumidores. Essa lacuna resulta na dependência de um controle centralizado simplificado para a gestão das operações, o que pode comprometer a eficiência e a capacidade de resposta do sistema como um todo.

Figura 3- Hierarquia tradicional do SEP

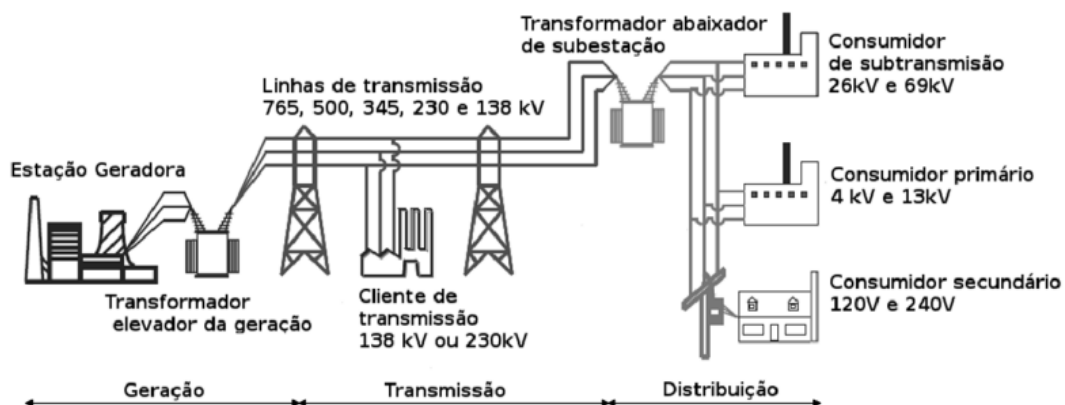


Fonte: Figueiró (2013).

A geração de energia geralmente ocorre em locais distantes dos consumidores, o que requer uma transmissão de longa distância para os centros de distribuição locais. Isso é feito em alta tensão para minimizar as perdas de energia durante o transporte. Nos centros de distribuição, a tensão é reduzida antes que a energia seja fornecida aos consumidores, garantindo um abastecimento confiável e seguro.

Essa infraestrutura complexa, mostrada na Figura 4, desempenha um papel fundamental no fornecimento de eletricidade (Sorebo et al, 2012). Observa-se, uma rede elétrica convencional que opera em um sistema de fluxo unidirecional, indo da geração até o consumidor final. Esse modelo representa as redes elétricas há décadas, mas as crescentes demandas por eficiência, resiliência e integração de energias renováveis estão levando a uma transformação significativa.

Figura 4- Esquema básico do Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Guimaraes et al. (2013).

A crescente demanda por energia elétrica nas últimas décadas realça as limitações das redes elétricas tradicionais. Mostra-se que a infraestrutura das redes elétricas convencionais não foi projetada para lidar com as atuais necessidades de consumo de energia. Conseqüentemente, problemas como interrupções ocasionais no fornecimento de energia e sobrecargas, tornam-se mais frequentes, prejudicando a qualidade de vida das pessoas e a produtividade das empresas. Segundo Budka et al. (2010) a infraestrutura está envelhecendo e se tornando muitas vezes obsoleta. Esse tipo de problema coloca em risco a operação de todo sistema, principalmente, a longo prazo.

Além disso, a dependência das fontes de energia convencionais, como combustíveis fósseis, tem levado a preocupações ambientais e mudanças climáticas significativas. EIA (2014) indica que mais de 80% dos recursos utilizados para a produção de energia ao longo dos tempos são de combustíveis fósseis, ou seja, recursos não-renováveis.

Percebe-se que a queima de combustíveis não era historicamente uma preocupação até o efeito estufa causar consideráveis mudanças climáticas e impacto ambiental (Lo e Ansari 2012). A geração de energia elétrica a partir de fontes não renováveis nos sistemas elétricos tradicionais contribui consideravelmente para as emissões de gases de efeito estufa, que se torna um tema de preocupação mundial.

Essas limitações do sistema tradicional de redes elétricas têm impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras, como a integração de energias renováveis, sistemas de armazenamento de energia avançados e redes inteligentes. Como observado por Brown (2008), a transição para redes elétricas modernas e adaptáveis é crucial para atender às necessidades futuras de energia de forma sustentável e confiável.

Com a demanda crescente por energia, as preocupações ambientais e a necessidade de instalação de fontes renováveis com maior resiliência, as limitações do sistema tradicional de redes elétricas estão se tornando cada vez mais evidentes. Para superar essas limitações e garantir um fornecimento de energia seguro, limpo e eficiente no futuro, é útil a adoção de tecnologias e métodos mais sofisticados.

2.2.1 Modernização do SEP

O SEP desempenha um papel crucial na entrega de energia elétrica para comunidades em todo o mundo. No entanto, diante dos avanços tecnológicos e mudanças no panorama energético global, a necessidade de modernização desse sistema torna-se fundamental.

Para compreender plenamente os requisitos dessa modernização, é essencial analisar as complexidades e desafios enfrentados pelo SEP. Conforme mostrado no estudo do Carvalho (2014), o vínculo entre a sociedade humana e os serviços de energia elétrica nunca foi tão forte como atualmente.

A crescente demanda por energia, impulsionada pelo aumento da urbanização e do desenvolvimento industrial, representa um desafio significativo para a capacidade do SEP de manter um fornecimento estável e confiável. Além disso, a integração de fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, cria desafios adicionais de estabilidade e confiabilidade, conforme ressaltado por (Simabukulo et al. 2019). A infraestrutura elétrica existente muitas vezes não é capaz de lidar eficientemente com a variabilidade causada por essas fontes de energia renovável.

A sociedade está cercada por equipamentos e dispositivos elétricos que melhoram a acessibilidade de informação. No entanto, quando o fornecimento de energia elétrica é interrompido por qualquer motivo, todos os processos nas cidades são interrompidos de forma abrupta, causando confusões, preocupações e danos. Um exemplo desse tipo de situação ocorre durante um apagão em uma determinada região por chances de acidentes aumentam decorrente da falta de semáforos.

Os custos desta interrupção de energia estão muito além dos valores financeiros de quem deixa de produzir e de quem deixa de comprar, pois toda cadeia produtiva sofre com a falta de energia elétrica (Siirto, Osmo et al., 2015).

O estudo de Rigodanzo (2015) mostra que é necessário aprimoramento do sistema elétrico de potência, com a finalidade de reduzir custos, otimizar os recursos e manter a população consciente e participativa em relação ao consumo.

O trabalho de Gallotti (2021) indica que a motivação de modernização de rede elétrica ocorre devido a busca pelas eficiências comercial e energética, a segurança operacional, o aumento da confiabilidade e a sustentabilidade econômica e ambiental.

Para enfrentar esses desafios de necessidade de modernização do SEP, devem ser implementadas soluções inovadoras e estratégias abrangentes de tecnologias avançadas de monitoramento e controle, como sistemas de automação e sensores inteligentes, para aprimorar a capacidade do SEP de se adaptar e responder dinamicamente às flutuações de carga e à geração distribuída. Além de tudo, a aplicação de técnicas de análise de dados e inteligência artificial pode melhorar a operação e a manutenção do sistema, aumentando sua eficiência e confiabilidade. A modernização do SEP é uma oportunidade de transição para uma infraestrutura energética mais sustentável e resiliente.

2.3 Redes elétricas inteligentes

A necessidade de modernizar os sistemas elétricos convencionais foi estimulada pelas limitações do SEP em termos de eficiência. Isso levou ao desenvolvimento de novos conceitos e componentes, que deram origem às redes elétricas inteligentes.

Redes elétricas inteligentes são sistemas de distribuição de energia elétrica sofisticados que incorporam tecnologias de comunicação, automação e controle para melhorar a eficiência (energética e econômica), confiabilidade e durabilidade das redes elétricas. Em comparação com as redes elétricas convencionais, esses sistemas estão um passo à frente.

De acordo com CGEE (2012), às Redes Elétricas Inteligentes podem ser compreendidas como a rede que utiliza tecnologia digital avançada para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade em tempo real com fluxo de energia e de informações bidirecionais entre o sistema de fornecimento de energia e o cliente final.

Gellings (2009), apontou o conceito de redes elétricas inteligentes, ou *smart grids*, como utilização de sensores de monitoramento, de telecomando, de automação desde a geração de energia até o consumo, visando otimizar a operação e utilização do sistema elétrico. Como se pode ver, quase todas as definições citadas acima estão se referindo a mesma ideia, automação, comunicação e eficiência, com a mesma característica de facilitar a comunicação entre os consumidores e a concessionária.

Não há uma definição universalmente aceita para o conceito de *smart grid*; na verdade cada região têm as suas perspectivas sobre o que constitui uma rede inteligente e qual é o objetivo da sua implementação, conforme ilustrado na Figura 5, como classificado no trabalho desenvolvido pela CGEE sobre Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional.

Figura 5- Motivadores regionais das REI



Fonte: CGEE

A Figura 5 mostra que cada região possui perspectivas diferentes sobre uma rede elétrica inteligente e com diferentes objetivos na sua implementação. Isso ocorre devido às diferentes necessidades de infraestrutura e das prioridades de cada lugar, destacando a adaptabilidade desse conceito para atender aos objetivos específicos. Portanto, a definição e implementação da REI estão ligadas às características locais e às metas propostas pelas autoridades e comunidades em cada região.

Em seu estudo, Rivera (2013) considera a multiplicidade de conceitos e benefícios. Dessa forma a implantação das REIs tem seus principais direcionadores diferentes em cada região e/ou país, como aponta a Figura 6, cada um dos locais na implementação de redes elétricas inteligentes.

Figura 6- Motivadores para a implantação de redes elétricas

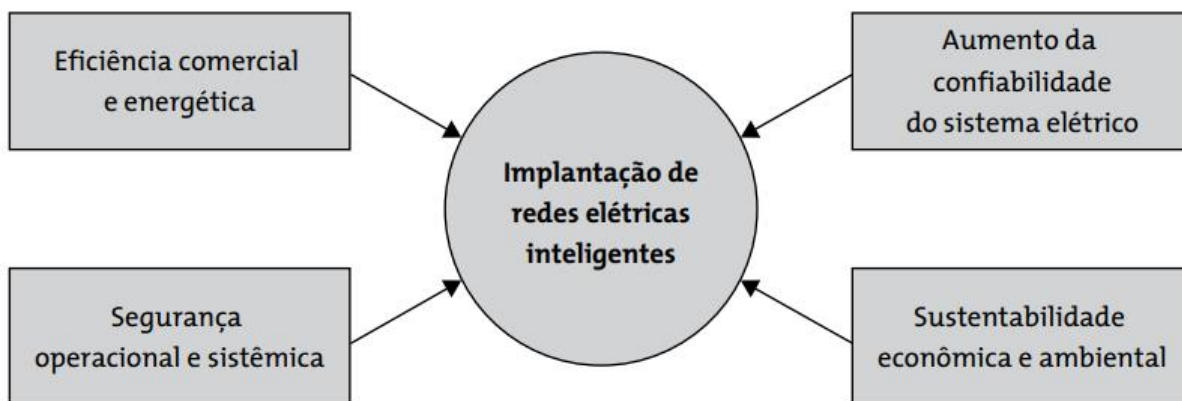
EUA	Europa	Japão	China
<ul style="list-style-type: none"> • Agenda tecnológica para recuperação econômica • Infraestrutura obsoleta • Geração distribuída de energia • Confiabilidade, segurança e eficiência do sistema • Uso de veículos elétricos e híbridos 	<ul style="list-style-type: none"> • Integração de diversas fontes de energia renováveis • Infraestrutura envelhecida • Uso de veículos elétricos 	<ul style="list-style-type: none"> • Diversificação energética (acidentes nucleares) • Uso de veículos elétricos • Implantação de cidades inteligentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Implantação de cidades inteligentes e protagonismo mundial em IoT • Eficiência energética • Diversificação energética (renováveis)

Fonte: Rivera (2013).

Enquanto em alguns países, a prioridade pode ser a modernização da infraestrutura elétrica para melhorar a eficiência e a confiabilidade, em outros, a ênfase pode estar na

integração de fontes de energia renovável e na redução das emissões de carbono. Essas diferenças refletem as necessidades e os desafios específicos de cada nação, destacando a importância de estratégias adaptadas às características locais. As motivações que se destacam no Brasil para a implantação de redes elétricas inteligentes são apresentadas na Figura 7.

Figura 7- Motivadores para a implantação das REIs no Brasil



Fonte: Rivera (2013).

O estudo de Falcão (2010) mostra que para as redes elétricas ficarem inteligentes é preciso um acréscimo de infraestrutura de comunicação bidirecional nas redes tradicionais. Entre outras características de Rede Elétrica Inteligente as que mais se destacam são:

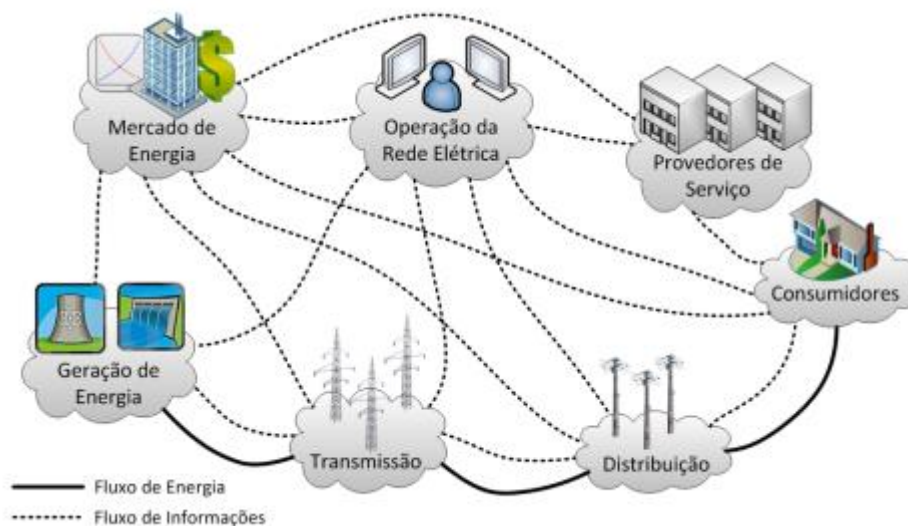
- A autorrecuperação que permite a detecção e restauração automática de falhas;
- Empoderamento dos consumidores, envolvendo-os nos processos de planejamento e operação;
- Tolerância a ataques externos, resistindo a ameaças físicas e cibernéticas;
- Qualidade de energia, atendendo às exigências da sociedade digital;
- Acomodação de variedades de fontes e demandas, integrando diversas fontes de energia e tecnologias de forma transparente (*plug and play*).

O autor deixa claro que essas características refletem o avanço tecnológico e a adaptabilidade de redes elétricas inteligentes para atender às necessidades de um sistema elétrico moderno e eficiente.

De acordo com o relato no estudo de Menezes (2020), o modelo conceitual da nova estrutura de rede elétrica, conforme definido pelo Instituto de Padrões de Tecnologia Americano (NIST), compreende sete principais domínios interligados entre si: geração, transmissão, distribuição, consumidor, mercados, operadores de rede e provedores de serviço, como se pode ver na Figura 8. Todos os domínios são conectados entre si, nesta configuração

o consumidor torna-se mais atuante a sinais de preço e com possibilidade de gerar sua própria energia associando a sua instalação às tecnologias de geração.

Figura 8 - Modelo conceitual de Rede Inteligente



Fonte: Guimaraes et al. (2013).

2.3.1 Desafios para as REI

O avanço tecnológico está transformando nossa sociedade em uma escala sem precedentes, e o setor de energia elétrica não é exceção. As REI representam a próxima fase na evolução desse setor. No entanto, a implementação bem-sucedida dessas redes não é isenta de obstáculos.

Alcântara (2012) destacou que a implementação das REI traz consigo uma série de desafios significativos. Seguem-se algumas delas:

- Modernização da infraestrutura existente que é um processo dispendioso e complexo, exigindo investimentos substanciais.
- Segurança cibernética torna-se uma preocupação crítica, uma vez que as REI são vulneráveis a ataques digitais.
- Cooperação entre os diversos interessados do setor, como empresas de energia, reguladores, provedores de serviços e consumidores, é fundamental, mas muitas vezes difícil devido a interesses divergentes.
- Integração de fontes de energia renováveis, como solar e eólica, exige uma gestão eficaz para garantir a estabilidade do sistema.

- A privacidade dos dados do consumidor deve ser cuidadosamente considerada na coleta e uso das informações. Portanto, a implementação bem-sucedida das redes elétricas inteligentes requer abordagens abrangentes para superar esses desafios.

O estudo de Coutinho (2022), mostra-se que apesar das melhorias fornecidas pelas Redes Elétricas Inteligentes a incerteza dos custos de instalação é um desafio crucial. Devido a instalação requer aprimoramento da arquitetura elétrica, incorporando sensores, gerenciando usuários geradores de energia e realizando manutenções periódicas.

2.3.2 *Tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes*

As tecnologias das REI estão se tornando cada vez mais visíveis no panorama energético global devido à crescente procura de energia eficiente e sustentável. As tecnologias fundamentais deste avanço tecnológico são medidores inteligentes, sistemas de comunicação e sistema de automação, estes três tópicos principais serão analisados adiante bem como suas contribuições para a construção de uma rede mais inteligente e eficiente.

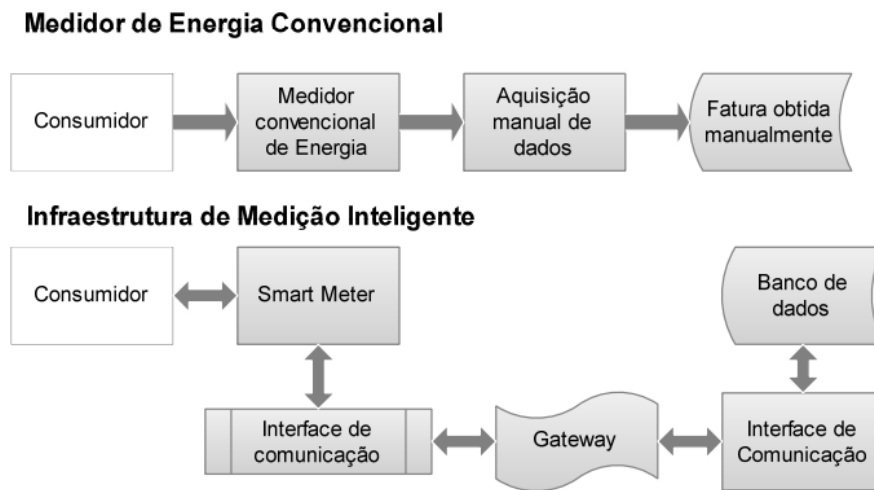
2.3.2.1 *Medidores inteligentes (smart meters)*

Os medidores inteligentes representam uma peça-chave nas redes elétricas inteligentes. Ao permitirem a medição e tarifação de uma forma remota, esses dispositivos oferecem detalhes precisos sobre a demanda de energia dos consumidores. A capacidade de monitorar o consumo de energia individual e disponibilizar dados em tempo real, promovendo uma maior conscientização entre os consumidores (Guimaraes, 2013).

Esses dispositivos substituem os medidores tradicionais, que exigem a presença de um técnico para realizar a leitura, o corte ou o religamento da energia. Com os medidores inteligentes, essas atividades podem ser feitas à distância, com mais rapidez e eficiência.

No estudo de Menezes (2020), foi mostrado que a introdução da medição inteligente traz diferenças estruturais notáveis em relação à abordagem convencional, como evidenciado na Figura 9. Esta nova dinâmica destaca a presença de bidirecionalidade, bancos de dados e interfaces de comunicação, revolucionando a forma como a energia é medida e gerenciada, promovendo eficiência e controle para os consumidores.

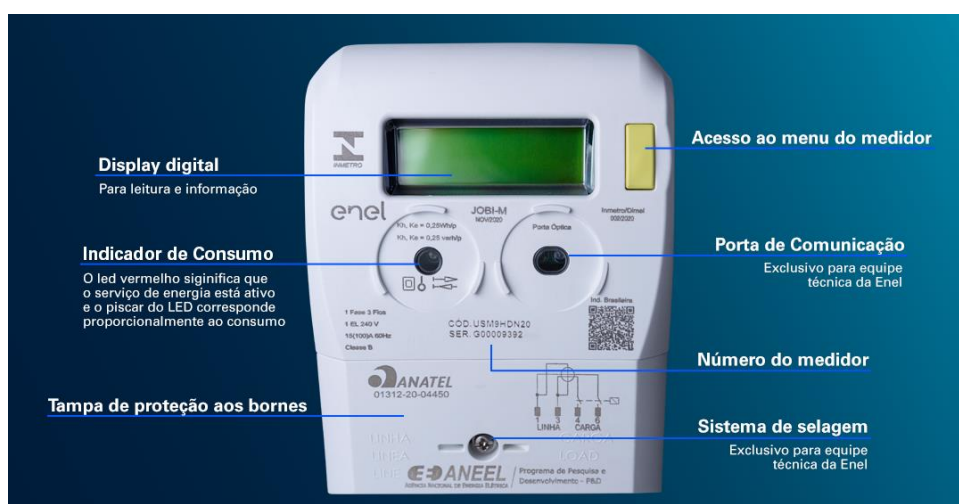
Figura 9 - Comparação entre a medição convencional e inteligente.



Fonte: Menezes (2020).

Os medidores inteligentes oferecem uma gama de funcionalidades e características técnicas abrangentes para atender às demandas do setor elétrico. Com topologias específicas para diferentes modelos que se destacam no mercado, o dispositivo suporta medição monofásica, bifásica ou trifásica, fornecendo medição precisa de energia ativa, reativa. Além disso, com indicadores LED, alarmes configuráveis, opções de comunicação remota e atualização de firmware assinada digitalmente. Um exemplo é o medidor utilizado pela Enel detalhado na figura 10.

Figura 10 - Medidor inteligente de Enel



Fonte: Enel.com

No cenário da Medição Inteligente, a compreensão de termos como Leitura Automática do Medidor (AMR, sigla em inglês), Infraestrutura de Medição Avançada (AMI,

sigla em inglês), Gerenciamento Avançado do Medidor (AMM, sigla em inglês) e Gerenciamento de Dados do Medidor (MDM, sigla em inglês) é essencial para a evolução desse conceito.

- AMR implica na automação da coleta de dados,
- AMI vai além, permitindo comunicação bidirecional entre medidores e o sistema central.
- AMM se concentra na administração avançada dos medidores,
- MDM gerencia e consolida os dados brutos. Esses termos são pilares na criação de sistemas eficientes e inteligentes para a distribuição de serviços públicos (Vieira; Granato, 2011).

Os medidores inteligentes também oferecem vantagens para os consumidores, que podem acompanhar o seu consumo de energia em tempo real, por meio de aplicativos ou sites das distribuidoras. Assim, eles podem planejar melhor o seu uso da energia, evitando desperdícios e economizando na conta de luz. Além disso, os medidores inteligentes permitem que os consumidores recebam alertas e avisos personalizados sobre o seu consumo, bem como tenham acesso a novos serviços no futuro.

Os medidores inteligentes fazem parte das redes do futuro, que visam modernizar e digitalizar o sistema elétrico, tornando-o mais sustentável, confiável e resiliente. No Brasil, algumas distribuidoras já estão implantando projetos pilotos de medição inteligente, com o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e da fabricação nacional em colaboração com as concessionárias. A expectativa é que os medidores inteligentes se tornem cada vez mais presentes nas residências e nos estabelecimentos comerciais e industriais do país, contribuindo para a melhoria da qualidade do serviço e da satisfação dos clientes.

2.3.2.2 Tecnologias de informação e de comunicação (TIC)

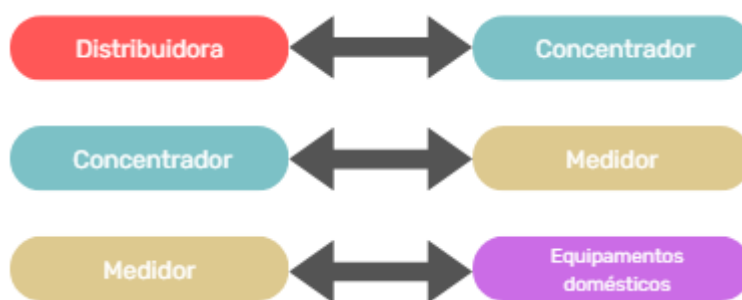
As tecnologias de informação e de comunicação (TIC), em redes elétricas inteligentes, desempenham um papel fundamental na modernização da infraestrutura elétrica. Esses sistemas permitem a troca de dados em tempo real entre dispositivos e centros de controle, melhorando a eficiência e a confiabilidade da distribuição de energia.

Além disso, facilitam a detecção rápida de falhas e a implementação de ações corretivas, contribuindo para a redução de interrupções no fornecimento de energia. Com a comunicação eficaz, as redes elétricas inteligentes podem ser mais resilientes e adaptáveis, promovendo uma distribuição de energia mais eficiente e sustentável.

Diante dessa diversidade, várias tecnologias de redes de comunicação são empregadas para atender às demandas distintas, conforme destacado por Wenye e Zhuo (2013). Na Figura 11, são ilustradas as redes de comunicação entre os domínios, com a rede de longo alcance desempenhando um papel vital na comunicação inter-domínio.

De acordo com o Ministério de Minas e Energias (MME) no Brasil, essa infraestrutura de comunicação deve ser organizada a partir de três fluxos distintos (MME, 2012):

Figura 11- Infraestrutura de comunicação

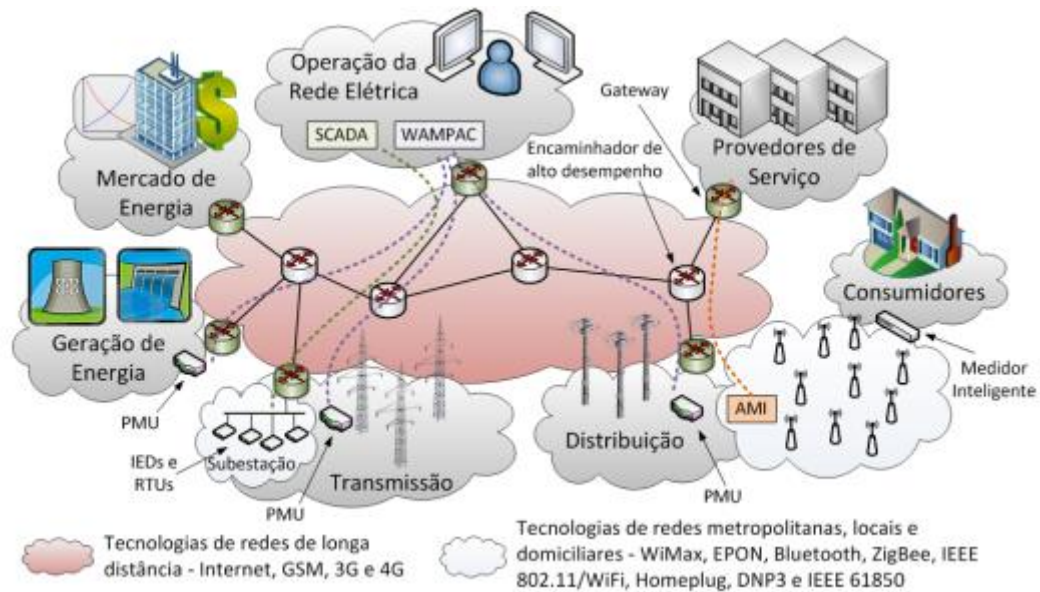


Fonte: Adaptado de MME

Essa perspectiva nos leva ao estudo de Rivera (2013), que mostra que a comunicação nas *smart grids* segue uma trajetória bem definida dividida em três segmentos. Primeiramente, a *Wide Area Network* (WAN) abrange toda a extensão, desde o centro de controle até a região local da *Neighborhood Area Network* (NAN). Em seguida, a NAN cobre a comunicação da WAN até a *Home Area Network* (HAN), incluindo a rede de média tensão. Por fim, a HAN concentra a comunicação no ambiente residencial, conectando utensílios domésticos ao medidor. Essa tipologia de rede de telecomunicações, estabelece uma estrutura eficiente para garantir a fluidez da energia elétrica desde sua geração até o consumidor final.

No mesmo estudo de MME (2012) destacou-se a importância da HAN, uma interface local baseada em protocolos abertos, próxima ao medidor, para conectar dispositivos domésticos, garantindo controle e acesso em tempo real aos dados disponíveis. Essas tecnologias variam entre conexões sem fio, como radiofrequência e Wimax, e por cabo, como Controlador Lógico programável (PLC, em inglês) ou *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL).

Figura 12- Arquitetura de comunicação entre domínios.



Fonte: Guimaraes et al. (2013)

As redes de comunicação de longo alcance facilitam a aquisição de dados e o controle remoto dos centros de operação da rede elétrica, conectando subestações de transmissão e distribuição, além de estabelecer comunicações com os domínios de mercados de energia e provedores de serviços. A infraestrutura dessas redes incorpora elementos direcionados ao tráfego de alta capacidade para a comunicação entre diversos atores e *gateways* para a interface com as redes locais, garantindo uma integração eficiente.

2.3.2.3 Sistemas de automação

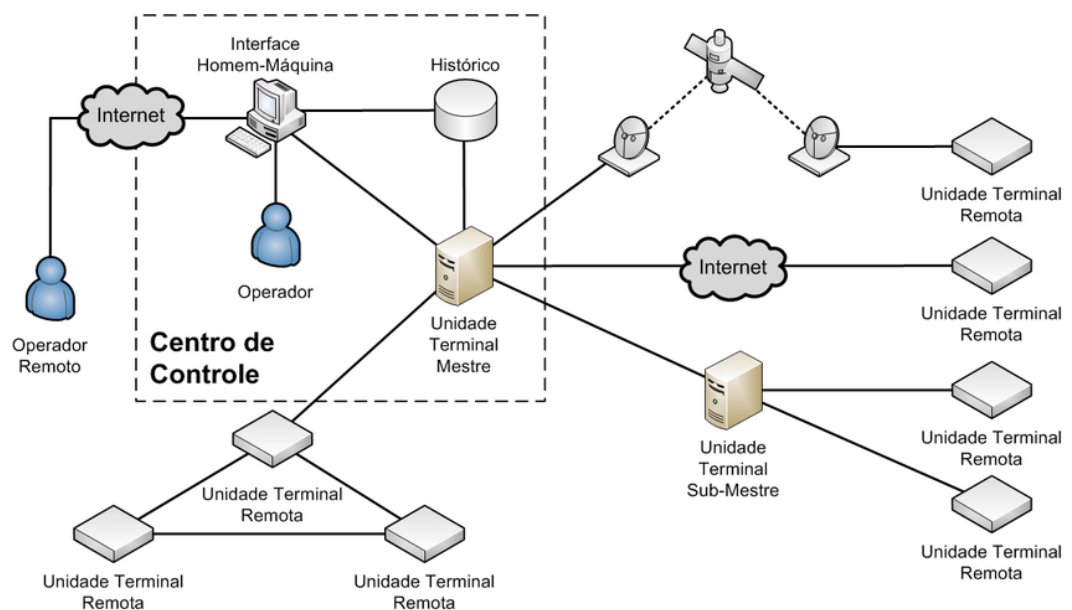
Os sistemas de automação de redes elétricas inteligentes é uma das partes que integram tecnologias avançadas de comunicação e controle para monitorar e gerenciar a infraestrutura elétrica em tempo real. Ao utilizar dispositivos eletrônicos inteligentes, sensores e medidores interconectados, a automação busca otimizar a eficiência operacional, reduzir perdas de energia e melhorar a confiabilidade do fornecimento elétrico. Nesse estudo será abordado sobre o sistema mais comumente utilizado em automações, SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*, em inglês), e uma aplicação dessa automação nas redes elétricas de distribuição, *self-healing* ou autorecuperação.

Os sistemas supervisórios são uma parte vital das redes elétricas modernas, fornecendo monitoramento em tempo real e controle de processos operacionais essenciais. E com a crescente complexidade e interconectividade das redes elétricas, a implementação de

recursos de autorrecuperação tornou-se fundamental para garantir a confiabilidade e resiliência do sistema em face de falhas e interrupções.

O SCADA desempenha um papel crucial em ambientes industriais, facilitando a comunicação entre dispositivos, sensores e atuadores. A arquitetura desse sistema, apresentada na figura 12, mostra que através da interface homem-máquina (HMI) permite o controle eficiente dos processos industriais pelos operadores remotamente, proporcionando mais segurança e rapidez nas intervenções. Essa tecnologia baseia-se em uma rede de comunicação que conecta dispositivos de campo, como sensores e atuadores, monitorados e controlados centralmente por meio de um computador pessoal ou PLC. O SCADA visa melhorar o monitoramento e controle de instalações industriais dispersas, consolidando dados em um centro de controle remoto para uma gestão eficaz da rede (GUIMARAES et al. 2013).

Figura 13 - Arquitetura do sistema SCADA



Fonte: Henrique (2019).

O desenvolvimento de sistemas supervisórios tem sido amplamente impulsionado pela necessidade de monitorar e controlar os fluxos de energia em tempo real. De acordo com os estudos de Pires et al. (2017), os sistemas SCADA evoluíram significativamente para integrar tecnologias avançadas, como sensores inteligentes e análise de dados em tempo real, permitindo uma gestão mais eficaz e eficiente das operações da rede.

Aplicações de *self-healing* são empregadas em diversos, que através de comunicação entre eles e com o SCADA se tornam capazes de identificar e corrigir falhas no fornecimento de energia elétrica. Ao detectar uma falha, a rede é automaticamente configurada,

isolando o trecho afetado e ativando alternativas para garantir o fornecimento contínuo ao cliente, conforme destacado por Coutinho (2022). Essa técnica é uma solução eficaz para a redução no tempo de interrupção de fornecimento de energia causada por falhas no circuito, proporcionando uma maior resiliência ao sistema elétrico.

O *self-healing* opera em duas etapas. A primeira envolve identificação e isolamento de falha, enquanto a segunda é a recomposição do sistema. Para garantir uma recomposição eficaz, é essencial seguir princípios como evitar falhas no trecho a ser religado e garantir uma conexão equilibrada com outro alimentador, evitando sobrecargas. Ao adotar esses critérios, o processo de autocura da rede elétrica será mais eficiente e confiável.

A implementação dessa técnica representa evolução na utilização dos sistemas SCADA para detecção automática e resposta rápida a interrupções e falhas no sistema de distribuição de energia. Conforme destacado por Silva (2021), os recursos de autorrecuperação podem minimizar o tempo de inatividade do sistema e restaurar automaticamente a energia em áreas afetadas, resultando em uma maior confiabilidade no fornecimento de energia.

As tecnologias anteriormente mencionadas foram concebidas para promover benefícios abrangentes em áreas fundamentais, tais como confiabilidade do sistema, economia, eficiência, preservação ambiental e segurança de dados. Essas inovações representam um avanço significativo, contribuindo para aprimorar o funcionamento do sistema de maneira integral e sustentável (Chagas et al, 2020).

3 TRANSFORMAÇÃO DO SEP EM REI

3.1 Integração de tecnologias de REI

Ao longo do tempo a sociedade lidou com diferentes níveis de apagões, entre eles destacou o apagão do Brasil do ano de 2009 onde foi evidenciado fragilidade do setor energético, causado pela dependência excessiva de fontes hidrelétricas, crescimento econômico acelerado e falta de investimentos. Suas consequências foram significativas, resultando em perdas financeiras, paralisação de atividades produtivas e comprometimento da qualidade de vida da população (Furtado, 2023).

Cenário semelhante é encontrado em outras regiões do mundo, como nos Estados Unidos. O apagão de 2011, por exemplo, resultou em prejuízos substanciais de \$118 milhões, incluindo custos relacionados a alimentos estragados, horas extras governamentais e perda de produtividade. Estudos da Universidade de Berkeley apontam para perdas anuais de cerca de \$80 bilhões devido a interrupções no setor elétrico nos EUA (Lopes et al, 2012).

Para evitar tais prejuízos é necessária uma transição para as REI que representam um marco na reestruturação tecnológica das redes elétricas, promovendo a diversificação da matriz energética, a modernização da infraestrutura, a promoção da eficiência energética e geração distribuída que é um dos fatores da implementação da REI (Fracari, 2015).

Em Rivera et.al (2013), foi realizado o estudo de Redes elétricas inteligentes: oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local e no qual foi mostrado que para implementação de redes elétricas inteligentes devem ser compreendidas as três dimensões independentes: inteligência ao sistema de fornecimento de energia elétrica, substituição dos medidores eletromecânicos por eletrônicos inteligentes e a inteligência nos centros consumidores.

Oliveira (2017), mostra que o termo "rede" se refere ao sistema de energia elétrica composto por geração, transmissão e distribuição. Essa rede projetada para transportar energia de grandes centrais geradoras para milhões de unidades consumidoras, apesar da evolução tecnológica, permanece como a base dos sistemas elétricos atuais. A inteligência acrescentada é um aprimoramento, resultante da convergência entre tecnologias de informação, comunicação e engenharia de sistemas de potência, conforme demonstrado na Tabela 1. Destaca-se as diferenças qualitativas entre os sistemas tradicionais e inteligentes.

Tabela 1 – Comparação entre a rede elétrica tradicional e a rede elétrica inteligente.

Rede elétrica tradicional	Rede elétrica inteligente
Eletromecânica	Digital
Fluxo de energia e comunicação unidirecional	Fluxo de energia e comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração centralizada e distribuída
Poucos sensores	Muitos sensores
Monitoração manual	Auto monitoração
Recomposição manual após falta	Auto recomposição
Falhas e blecautes	Adaptação e ilhamento
Controle limitado	Controle abrangente
Pouca liberdade do consumidor	Muitas opções para o consumidor

Fonte: Adaptado de Oliveira (2017).

De acordo com Tabela 1 foi mostrado que a rede elétrica inteligente representa uma transformação na estrutura tradicional do sistema elétrico, integrando participantes e atendendo às necessidades por meio de uma troca eficiente de informações. Essa infraestrutura inovadora combina componentes, subsistemas e funções, apoiadas por uma rede de comunicação e controle eficiente.

Além dessas análises, o estudo de Piran (2020) mostra que a comunicação numa REI é de forma contínua e em tempo real entre seus componentes, diferenciando-se das redes convencionais onde os equipamentos operam de forma independente. Esse avanço é impulsionado por sensores distribuídos por toda a extensão do sistema, fornecendo informações cruciais ao servidor principal. Essa automação avançada possibilita funções como identificação de defeitos, restauração de falta de energia e análise de contingência, destacando a eficiência e aprimoramento na gestão da qualidade e distribuição de energia.

No mesmo estudo, o Piran destaca os benefícios resultantes da introdução de Equipamentos de REI nos SEP, proporcionando vantagens significativas tanto para as concessionárias quanto para os consumidores. Por promover eficiência operacional, confiabilidade no fornecimento de energia aos clientes, sustentabilidade ambiental, redução de perdas e roubo de energia, além de melhorias no atendimento e resposta rápida a falhas. Esses benefícios refletem em uma gestão mais eficaz do sistema elétrico e na satisfação dos consumidores.

3.2 Desafios e oportunidades

Com o passar dos anos, as redes de transmissão convencional revelaram deficiências relacionadas à tecnologia. Essas deficiências incluem preocupações com a

segurança, como a vulnerabilidade a ataques cibernéticos que podem causar problemas, metas não atingidas na produção de energia, falta de controle em dispositivos e equipamentos, e gerenciamento inadequado de picos de demanda. Essas questões apontam que o setor requer uma reestruturação tecnológica progressiva e constante, inovando na gestão de energia, para atingir melhores índices de eficiência das redes (CGEE, 2012).

A integração das Tecnologias de REI nas redes elétricas tradicionais enfrenta diversos desafios e obstáculos. Um dos desafios é a interoperabilidade, ou seja, a capacidade dos dispositivos e sistemas das REI se comunicarem de forma eficiente com os sistemas já existentes. Como indicado por Farhangi (2010), a interoperabilidade é fundamental para a integração bem-sucedida das REI nas redes elétricas tradicionais.

Além disso, questões de segurança cibernética se tornaram uma preocupação crítica. Segundo Gungor e Hancke (2010), a interconexão de sistemas de controle e monitoramento em redes inteligentes pode tornar as redes elétricas vulneráveis a ataques cibernéticos.

A implementação de sistemas de redes inteligentes enfrenta barreiras econômicas, técnicas e sociais, sendo a principal relacionada à restrição do investimento que precisa ser realizado por etapas e em pequenas porções. Tem-se ainda que conseguir mão de obra qualificada para manter e gerir os diversos tipos de redes de comunicação ainda é um desafio que vai persistir por anos.

Outro desafio para uma completa implementação das REI é a conscientização dos consumidores sobre o seu papel de decisão no uso da energia e o entendimento dos sinais de mercado, que devem refletir a situação da rede elétrica. Sendo a classe de consumidores tão diversa como é a população, a abordagem precisa ser diferente e com incentivos diversos. A falta de dados práticos sobre a implementação das REI dificulta a definição de custos tangíveis. Além disso, há incertezas quanto ao uso efetivo pelos consumidores e para as concessionárias, que precisam se adaptar ao sistema de distribuição atual, gerando custos adicionais sem garantia de benefícios práticos que justifiquem os gastos iniciais (Coutinho et al. 2022).

Considerando o que foi abordado anteriormente, fica claro que para superar os desafios associados à implementação das redes inteligentes, é essencial investir em pesquisa de desenvolvimento tecnológico e colaboração entre os setores público e privado. O envolvimento e a conscientização dos consumidores também desempenham um papel crucial nesse processo. Ao enfrentar essas questões de maneira integrada, as redes inteligentes têm o potencial de se tornarem uma realidade amplamente utilizada, proporcionando benefícios significativos para a distribuição de energia elétrica.

Um outro ponto de visibilidade no contexto de desafio de REI e questão regulatória que foi abordado no estudo de Lamin (2013), que mostra a Avaliação de Impacto Regulatório (AIR) como um processo importante para embasar decisões políticas e modificação de regulamentos, adotando uma abordagem sistêmica. Outro ponto de relevância destacado no mesmo estudo foi Análise Custo-Benefício (ACB) que ganha maior importância ao avaliar intervenções políticas e regulamentares com elevado avanço tecnológico e implementações em larga escala. Portanto, realizar uma AIR interessante para maximizar os benefícios líquidos para toda a sociedade

O mesmo estudo mostra uma ACB realizado sobre troca de medidores inteligentes ao longo de 30 anos, considerando as unidades consumidoras existentes. Ele detalha a implantação de medidores em três níveis de grau: avançado, intermediário e tímido, conforme evidenciado na tabela 2. Esta análise abrange uma visão abrangente do impacto e evolução dessas tecnologias ao longo do tempo.

Tabela 2: Quantidades envolvidas no projeto ao final do tempo de análise

Grau	Medidores Inteligentes em Campo	Mercado de medidores inteligentes (compras acumuladas)
Avançado	125.623.316	252.345.747
Intermediário	100.498.653	201.876.598
Tímido	62.811.658	126.172.874

Fonte: Adaptado de Lamin (2013).

Segundo estudo de Pereira (2017), investir em redes inteligentes oferece inúmeros benefícios tanto para as distribuidoras e consumidores, no contexto da distribuidora tem a possibilidade de realizar leituras, cortes e religações remotamente reduz custos operacionais. Maior precisão na identificação de problemas na rede, como falhas e quedas de fio, evita gastos com multas e reembolsos, enquanto os consumidores têm a oportunidade de reduzir custos, promover eficiência energética e ter acesso a novas fontes de energia.

A modernização também colabora com a expansão do micro e minigeração distribuída, permitindo um controle eficiente da rede e evitando problemas como níveis de tensão inadequados. Esses ganhos, no entanto, nem sempre se refletem em redução tarifária para o consumidor, apesar do aumento na qualidade dos serviços energéticos e da oportunidade de desempenhar um papel mais ativo no gerenciamento do consumo de energia em tempo real

3.3 Casos de sucesso

Implementações dos conceitos relacionados às REI têm sido adotados ao redor do mundo, evidenciando os benefícios que a inovação pode trazer para os SEP. Na Finlândia, a concessionária consegue redução significativa da indisponibilidade do sistema, destacando um foco estratégico na melhoria da confiabilidade, especialmente em Helsinque. Onde 11% das subestações secundárias estão automatizadas, permitindo uma gestão eficaz de falhas e a rápida restauração do serviço, evidenciando os benefícios práticos da automação na melhoria da qualidade do fornecimento de energia (Piran, 2020).

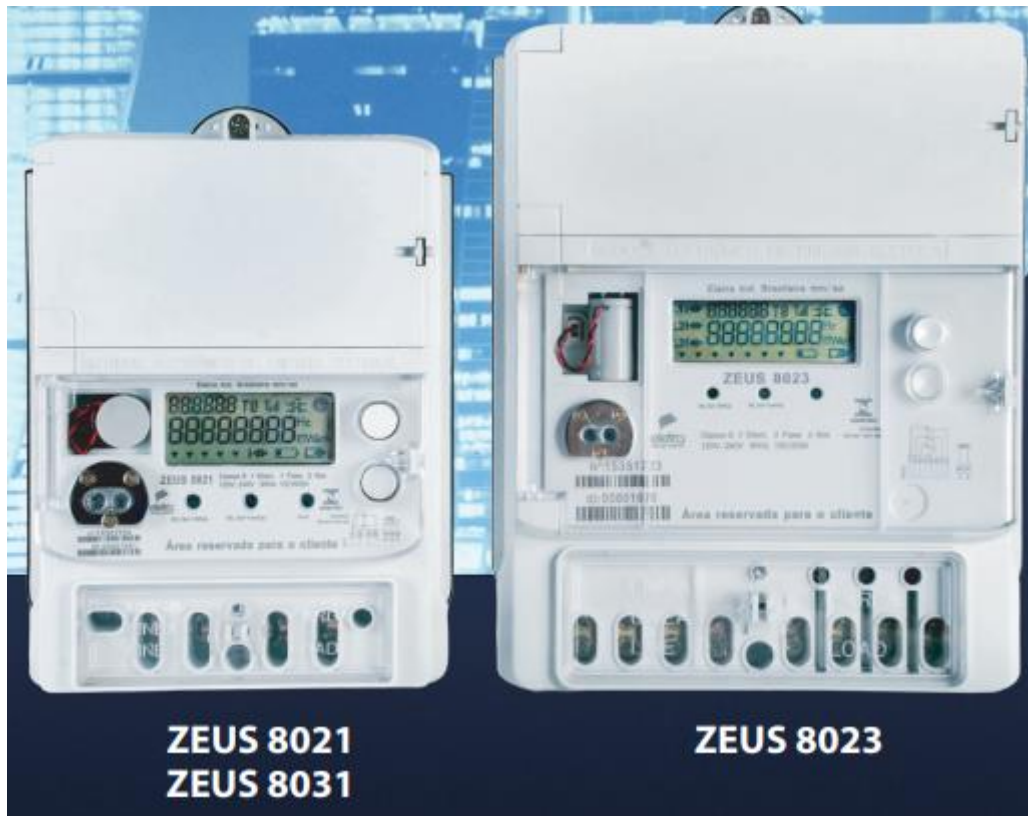
Outro caso de sucesso foi desenvolvido em Singapura, onde a *Energy Market Authority* (EMA) implementou um projeto com o objetivo de adoção de tecnologias que tornassem possível integração de fontes renováveis em maior escala. Essa iniciativa resultou em uma gestão mais eficaz da demanda de energia, redução das emissões de carbono e maior resiliência do sistema elétrico.

No Brasil, casos de sucesso em redes inteligentes têm sido implementados como projetos pilotos por concessionárias de distribuição, muitos dos projetos tem maior foco na troca dos medidores de energia, por modelos digitais. Com as funcionalidades desses dispositivos, busca-se, além dos benefícios já citados, o incentivo à eficiência energética.

Um desses projetos está sendo realizado no Paraná pela Copel. Uma das etapas é a instalação de 462 mil medidores inteligentes até 2023, com um investimento de R\$ 252 milhões que beneficiará diretamente 1,5 milhão de paranaenses em 73 cidades. A segunda fase estende a cobertura para 28 municípios, incluindo a Região Metropolitana de Curitiba, com investimento adicional de R\$ 208 milhões. A terceira fase abrange 50 municípios no Sudoeste e Oeste do Paraná, totalizando 1,5 milhões de medidores, um investimento de R\$ 820 milhões e a criação de 1.400 empregos diretos. Essas fases destacam o compromisso com a modernização da infraestrutura elétrica e o impulso econômico na região (Copel, 2023).

Este projeto utiliza medidores eletrônicos inteligentes (medidores ZEUS 8021, ZEUS 8031 e ZEUS 8023) da fabricante cearense-chinesa *Eletra Energy Solutions*, demonstrado na Figura 13.

Figura 14 - Medidores ZEUS 8021, ZEUS 8031 e ZEUS 8023



Fonte: Eletra Energy Solutions

A CPFL Energia também tem iniciativas que incorporam tecnologias avançadas, contribuindo para uma gestão mais eficiente e resiliente da rede elétrica. Já a Light, concessionária de energia no Rio de Janeiro, adotou tecnologias de REI para melhorar a eficiência operacional e oferecer serviços mais personalizados aos consumidores. Isso incluiu a implementação de medidores inteligentes e a modernização da infraestrutura, proporcionando uma resposta mais ágil a falhas e otimizando a distribuição de energia. Outros projetos são apresentados na tabela 3 com a perspectiva do total de investimento direto.

Tabela 3: Avaliação comparativa de Projetos de Redes Inteligentes

Empresa	Projeto	Local	Clientes	Investimento (Milhões R\$)
Eletrobrás	Cidade Inteligente - Parintins	Parintins – AM	15.000	21,8
Light Distribuição	Programa Light de Smart Grid	Rio de Janeiro – RJ	De 1.000 a 4.000	31,2
AES Eletropaulo	Rua Inteligente	Rua do Bairro Ipiranga – SP	2.000	4
CEMIG Distribuição	Cidade Digital Sete Lagoas	Sete Lagoas – MG	90.000	41,4
EDP Bandeirante	InovCity Aparecida	Aparecida do Norte – SP	15.000	10
CELPE	Cidade Inteligente Fernando de Noronha	Fernando de Noronha – PE	802	22,6
AMPLA	Cidade Inteligente Búzios	Búzios – RJ	10.300	37,6
CPFL	Projeto Tauron	São Paulo– SP	25.000	215

Fonte: Adaptado de Cavalcante (2019).

Esses casos de sucesso ilustram como as REI podem transformar positivamente a gestão e entrega de energia, resultando em sistemas mais eficientes, confiáveis e sustentáveis. O constante avanço dessas tecnologias promete continuar impulsionando melhorias significativas nos setores elétricos ao redor do mundo.

4 CONCLUSÃO

Na presente revisão bibliográfica, exploramos o cenário desafiador e dinâmico da integração das tecnologias de REI no sistema elétrico de potência tradicional. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar os impactos, a eficácia e os desafios associados a essa integração, melhorando a eficiência e a confiabilidade da disponibilidade de energia elétrica.

Ao longo da revisão, foi possível identificar as principais tecnologias e componentes envolvidos nas Redes de Distribuição Inteligente, destacando a complexidade e a interconexão de sistemas como medidores inteligentes, sensores, automação e comunicação. A compreensão desses elementos é fundamental para o desenvolvimento e implementação bem-sucedida das REI.

A análise dos impactos das tecnologias de Smart Grid na qualidade, confiabilidade e disponibilidade de energia elétrica revelou contribuições significativas para a melhoria desses parâmetros. A utilização de sensores e sistemas de monitoramento em tempo real possibilitou uma resposta mais rápida a eventos adversos, minimizando interrupções e melhorando a qualidade do serviço prestado aos consumidores.

Além disso, ao investigar os benefícios econômicos decorrentes da implantação da Smart Grid, foi planejada uma redução substancial de perdas no sistema elétrico, contribuindo para a eficiência energética. A maximização do aproveitamento da infraestrutura existente e a otimização do fluxo de energia resultaram em ganhos econômicos tangíveis, consolidando a Smart Grid como uma estratégia promissora para o setor elétrico.

Contudo, é importante considerar os desafios inerentes a essa transição tecnológica, tais como questões de segurança cibernética, padronização e interoperabilidade. Esses desafios exigem atenção contínua e esforços colaborativos para garantir o pleno desenvolvimento e a sustentabilidade das Redes Elétricas Inteligentes.

Para terminar esta revisão bibliográfica destaca a importância e o potencial transformador das Redes Elétricas Inteligentes no contexto do sistema elétrico de potência. Ao avaliar suas tecnologias, impactos e benefícios econômicos, contribui para a compreensão abrangente dessa evolução no setor, fornecendo insights valiosos para pesquisadores, profissionais e decisores que buscam aprimorar a eficiência e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, Márcio Venício Pilar. Capítulo II–Desafios Tecnológicos e Regulatórios em Rede Inteligente no Brasil. **Fascículo Smart Grids–Redes Inteligentes ed.**, v. 66, p. 48-58, 2012.
- ASHER, Rebecca. Conselho de Energia Elétrica de Chattanooga (EPB): projeto de rede inteligente. **U.s. Department Of Energy: Smartgrid.gov. Estados Unidos**, p. 0-2. 10 set. 2014. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/project/epb_smart_grid_project.html. Acesso em: 05 nov. 2023.
- BAGDADEE, Amam Hossain; ZHANG, Li. Rede inteligente: uma breve avaliação das tecnologias de rede inteligente para sistemas de energia modernos. **Journal of Engineering Technology**, China, v. 8, n. 1, p. 122-142, 2019.
- BROWN, Richard E. Impacto da rede inteligente no projeto do sistema de distribuição. **In: Reunião Geral da IEEE Power and Energy Society de 2008 - Conversão e Fornecimento de Energia Elétrica no Século 21**. IEEE, 2008. p. 1-4.
- BUDKA, Ken *et al.* , "GERI - Bell Labs Smart Grid Research Focus: Economic Modeling, Networking, and Security & Privacy," *2010 Primeira Conferência Internacional IEEE sobre Comunicações de Rede Inteligente* , Gaithersburg, MD, EUA, 2010, pp. 208-213, doi: 10.1109/SMARTGRID.2010.5622043.
- CABELLO, A. F. Redes elétricas Inteligentes no Brasil: a necessidade de uma avaliação adequada de custos e benefícios. **In: IPEA. Radar – Tecnologia, Produção e Comércio Exterior**, n. 19, 2012.
- CARVALHO, Joaquim Francisco de. Energia e sociedade. **Estudos avançados**, Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente , São Paulo, Brazil, v. 28, p. 25-39, 2014.
- CAVALCANTE, Ney Wagner Freitas et al. Notas de Ensino. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 23, p. 416-435, 2019.
- CGEE (2012). **Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional**. <http://www.cgee.org.br/atividades/redirect/8050>. Acessado em julho/2023

CHAGAS, Gabriela Fuzetti et al. A inclusão da tecnologia da Smart Grid para o desenvolvimento do Brasil. **Revista eSALENG–Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO–Vol**, v. 9, n. 1, 2020.

CORDEIRO, Alexander Magno et al. Revisão sistemática: uma revisão narrativa. **Revista do colégio brasileiro de cirurgiões**, v. 34, p. 428-431, 2007.

COUTINHO, Rafael et al. **Implementação de redes inteligentes, seus benefícios e barreiras no mercado brasileiro. 2022.** Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/de8307ea-cb50-4f77-bd4f-04df5468ef5f>.

Acesso em: : 10 maio 2023

ARCENO, De Carvalho Jussara; VOGEL, Carla Anna. **Reconfiguração de redes de distribuição de energia com geração distribuída empregando conceitos de redes elétricas inteligentes.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/8207e4cd-bcaf-4277-8052-85ce6f139106>.

Acesso em: 5 de maio 2023.

FURTADO, Matheus dos Santos; SOUZA, Lucas Araujo Nora de; ANDRADE, José Antônio Bento de. O APAGÃO DE 2009 NO BRASIL: CAUSAS E IMPACTOS. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.]**, v. 9, n. 11, p. 3264–3278, 2023. DOI: 10.51891/rease.v9i11.12616. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/12616>. Acesso em: 7 jul. 2023.

DUTRA, Jaine; RODRIGUES, Lucas; MENDES, Thiago. **Eficiência operacional nos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica:" Smart Grid"**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade UNA de Catalão, 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/0ea8a086-dda8-47db-8c59-2fce445d8a06>. Acesso em: 8 nov 2023

EFING, A. C.; RABELO, C. A. CONSUMO CONSCIENTE E A INSTALAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Revista Direitos Sociais e Políticas Públicas (UNIFAFIBE)**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 27–44, 2020. DOI: 10.25245/rdspp.v8i1.503. Disponível em:

<https://portal.unifafibe.com.br:443/revista/index.php/direitos-sociais-politicas-pub/article/view/503>. Acesso em: 7 jun. 2023.

ELECTRECIDAD, Setor (org.). Redes elétricas em DC implementadas por Edison em Nova York: 2019. Pagina. Disponível em: <https://www.sectorelectricidad.com/22363/redes-electricas-en-dc-implementadas-por-edison-en-nueva-york/>. Acesso em: 10 maio 2023.

FALCAO, Djalma M. et al. Integração de tecnologias para viabilização da smart grid. **III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1-5, 2010.

FIGUEIRÓ, Iuri Castro et al. **A tarifa horária para os consumidores residenciais sob o foco das Redes Elétricas Inteligentes-REI**, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de tecnologia, Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2013.

FRACARI, Fabiano; SANTOS, Iverton; SANCHEZ, Gustavo. Smart Grid: uma nova forma de controle de Energia Elétrica. **Revista de Empreendedorismo, Inovação e Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 15-22, 2015.

GALLOTTI, VDM . Redes elétricas inteligentes (Smart Grids). **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento** , [S. l] , v. 10, n. 9, pág. e30010918322, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.18322. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18322>. Acesso em: 15 set. 2023.

GELLINGS, Clark W. **The Smart Grid: enabling energy efficiency and demand response**. The Fairmont Press, Inc.2009

GUIMARAES, Pedro Henrique V. et al. Comunicação em Redes Elétricas Inteligentes: eficiência, confiabilidade, segurança e escalabilidade. **Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores-SBRC**, p. 101-164, 2013.

GUNGOR, Vehbi C.; LU, Bin; HANCKE, Gerhard P. Oportunidades e desafios de redes de sensores sem fio em redes inteligentes. **Transações IEEE sobre eletrônica industrial** , v. 10, pág. 3557-3564, 2010.

LAMIN, Hugo; DE TOLEDO CAMARGO, Ivan Marques. Smart grids deployment in Brazil: A study from the perspective of a regulatory impact analysis. **In: 2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)**. IEEE, 2013. p. 1-8.

LIMA, André. Guerra perdida por Thomas Edison há um século volta à tona. **Jornal, Agência UFC**, ano 2017, p. 1-8, 15 ago. 2017. Disponível em: <https://agencia.ufc.br/um-seculo-depois-uma-guerra-perdida-por-thomas-edison-pode-voltar-a-tona/>. Acesso em: 12 set. 2023.

Lo, C.-H. e Ansari, N. (2012) O sistema progressivo de rede inteligente nos aspectos de energia e comunicação. **Pesquisas e tutoriais de comunicações IEEE**, 14, 799-821.

LOPES, Yona et al. Smart grid e iec 61850: Novos desafios em redes e telecomunicações para o sistema elétrico. **XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, 2012.

MARTINS, Marco Antônio dos Santos. Um novo capítulo da “Guerra das Correntes”. **Análise: conjuntura nacional e Coronavírus. FCE/UFRGS. Porto Alegre. 28 jul. 2020.**

MATTEDE, Henrique. Primeira usina de geração de eletricidade: primeira usina de geração de eletricidade. Primeira usina de geração de eletricidade. 2019. **Cursos de elétrica e eletrônica**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com/primeira-usina-de-geracao-de-eletricidade/>. Acesso em: 20 maio 2023.

Medidores Inteligentes. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Redes-do-Futuro/sp-do-futuro/medidor-inteligente.html>. Acesso em: 30 dez. 2023.

MENEZES, Wesley Rodrigues de et al. **Medidores inteligentes e comunicação de dados em redes inteligentes**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Departamento De Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2020.

MME. Relatório Smart Grid do Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. **Ministério das Minas e Energia**, [s. l.], p. 229, 2012.

OLIVEIRA, Gabriel Aurélio de et al. **Microrredes em mercados de energia elétrica**. Florianópolis: Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), 2017.

PEREIRA, Guilherme Armando de Almeida; ABREU, Mariana Weiss de. Redes inteligentes: principais desafios para o caso brasileiro. **Caderno Opinião –FGV Energia**, dezembro 2017.

PIRAN, Fábio Antonio Sartori; PANIZ, Antonio Marcos Frantz. ANÁLISE DOS EFEITOS PROPORCIONADOS PELA TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE CONVENCIONAL EM SMART GRID: ESTUDO DE CASO EM UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Latin American Journal of Business Management**, [S. l.], v. 11, n. 2,

2020. Disponível em: <https://lajbm.com.br/index.php/journal/article/view/614>. Acesso em: 20 out. 2024.

PIRES, Paulo Sérgio Motta; DE OLIVEIRA, Luiz Affonso H. Guedes; BARROS, Diogo Nascimento. **Aspectos de segurança em sistemas SCADA–Uma visão geral**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, 2004

Rede Elétrica Inteligente - Copel - Pura Energia. Disponível em: <<https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/rede-eletrica-inteligente/>>

Redes elétricas inteligentes: contexto nacional. – Brasília, DF :**Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, 2012.

RIGODANZO, Jonas. **Instalação De Medidores Inteligentes No Brasil**: Uma Análise Econômica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2015.

RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. **Revista do BNDES**, vol. 40, pp. 43–83, 2013.

ROTHER, Edna Terezinha. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta paulista de enfermagem**, v. 20, n. 2, p. vvi, 2007.

SIIRTO, Osmo et al. Improving Reliability in Urban Network. **Electric Power Systems Research** , v. 120, p. 47-55, 2015.

SILVA, Pedro Henrique Martins da. **Aplicação de Self-healin em redes smart grid para melhoria dos índices de continuidade**. 2021. Monografia - Universidade Presbiteriana Mackenzie. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/bitstream/handle/10899/29114/Pedro%20Henrique%20Martins%20da%20Silva%20-%20protegido.pdf?sequence=1> Acesso em: 20 maio. 2023.

SIMABUKULO, Lucas Antonio Nizuma et al. Energia, industrialização e modernidade: história social. **Energia e Saneamento**. Disponível em:< <http://www.museudaenergia.org.br/media/63129/03.pdf>> Acesso em, v. 7, 2006.

SOREBO, Gilbert N.; ECHOLS, Michael C. **Segurança da rede inteligente: uma visão de ponta a ponta da segurança na nova rede elétrica** . Imprensa CRC, 2011.

TOLEDO, Fabio. **Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes-Smart Grid Handbook**. 1ª ed.; Brasport: La Chaux-de-Fonds, Suíça, 2012.

VIEIRA, J. G.; GRANATO, S. Improving Reliability in Urban Network. **Electric Power Systems Research** , v. 120, p. 47-55, 2015.

VOSGERAU, Dilmeire Sant Anna Ramos; ROMANOWSKI, Joana Paulin. Estudos de revisão: implicações conceituais e metodológicas. **Rev. Diálogo Educ**, p. 165-190, 2014.

WANG, Wenye; LU, Zhuo. Segurança cibernética na rede inteligente: levantamento e desafios. **Redes de computadores** , v. 57, n. 5, pág. 1344-1371, 2013.

ZAME, Kenneth K. et al. Smart grid and energy storage: Policy recommendations. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 82, p. 1646-1654, 2018