

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO: ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA MELHORIAS E EXPANSÃO**PLANNING ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS: TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS FOR IMPROVEMENTS AND EXPANSION** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.005-006>**Joelson Lopes da Paixão**

Mestre em Engenharia Elétrica, especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e em Educação Básica, Tecnológica e EAD
E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

Alzenira da Rosa Abaide

Doutora em Engenharia Elétrica, professora titular na UFSM
E-mail: alzenira@ufsm.br

RESUMO

O planejamento e a otimização dos sistemas elétricos de distribuição são fundamentais para garantir a confiabilidade do fornecimento de energia, a qualidade da eletricidade entregue aos consumidores e a viabilidade econômica dos investimentos no setor. A definição de alternativas para expansão e reforço da rede deve considerar critérios técnicos e econômicos, visando atender às exigências regulatórias e aos indicadores de continuidade e qualidade da energia elétrica. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma abordagem estruturada para a formulação e análise técnico-econômica de alternativas de melhoria nos sistemas de distribuição. São explorados aspectos como previsão de carga, modelagem da rede, otimização de investimentos e viabilidade operacional. A metodologia proposta permite a avaliação de diferentes cenários, considerando restrições operacionais, custos de investimento e indicadores de desempenho. Dessa forma, os resultados obtidos podem auxiliar na tomada de decisão, garantindo que as soluções adotadas sejam eficientes e sustentáveis para o setor elétrico.

Palavras-chave: Planejamento de Sistemas Elétricos; Análise Técnico-Econômica; Qualidade da Energia Elétrica; Redes de Distribuição.

ABSTRACT

The planning and optimization of electrical distribution systems are essential to ensure the reliability of power supply, the quality of electricity delivered to consumers, and the economic feasibility of investments in the sector. The definition of alternatives for network expansion and reinforcement must consider both technical and economic criteria, aiming to meet regulatory requirements and continuity and power quality indicators. In this context, this study presents a structured approach to the formulation and techno-economic analysis of improvement alternatives in distribution systems. Key aspects such as load forecasting, network modeling, investment optimization, and operational feasibility are explored. The proposed methodology enables the evaluation of different scenarios, considering operational constraints, investment costs, and performance indicators. Thus, the results obtained can support decision-making, ensuring that the adopted solutions are both efficient and sustainable for the electrical sector.

Keywords: Power System Planning; Techno-Economic Analysis; Power Quality; Distribution Networks.



1 INTRODUÇÃO

O planejamento e a operação dos sistemas elétricos de distribuição são processos fundamentais para garantir a confiabilidade, a eficiência e a sustentabilidade do fornecimento de energia elétrica. Aspectos como continuidade do serviço, qualidade dos níveis de tensão e análise técnico-econômica das alternativas disponíveis desempenham um papel central na definição das estratégias de expansão e modernização da infraestrutura elétrica. Dessa forma, torna-se essencial a adoção de metodologias que permitam avaliar, com precisão, as necessidades futuras do sistema e otimizar os investimentos necessários para a adequação da rede (ELETROBRAS, 1982).

O desempenho do sistema de distribuição está diretamente relacionado à previsão de carga e ao correto dimensionamento dos componentes da rede, de modo a minimizar riscos de sobrecarga, quedas de tensão e perdas elétricas excessivas. Para isso, é necessário um planejamento criterioso, que leve em consideração restrições técnicas, como limites de fluxo e fornecimento de potência em linhas e subestações, bem como a máxima queda de tensão permitida nos alimentadores e circuitos da rede elétrica (BERNARDON et al., 2010).

A formulação de alternativas para expansão e reforço da rede requer uma abordagem estruturada, contemplando a modelagem da rede elétrica e a realização de estudos de fluxo de potência para diagnosticar o comportamento do sistema frente ao crescimento da demanda. Essas análises permitem identificar áreas críticas e propor soluções, como a construção de novos circuitos, ampliação de subestações, instalação de equipamentos de compensação reativa ou reconfiguração da rede existente. No entanto, o maior desafio do planejamento está na necessidade de equilibrar o atendimento da demanda com a minimização de custos e a conformidade com as restrições operacionais, físicas e econômicas (SOUSA et al., 2010).

A tomada de decisão no setor elétrico exige um processo de análise que integre critérios técnicos e econômicos, permitindo a seleção da alternativa mais viável sob diferentes cenários. Para isso, ferramentas computacionais que aplicam métodos de otimização são amplamente utilizadas, auxiliando na escolha das soluções que melhor atendem aos requisitos de confiabilidade e eficiência energética. A avaliação da viabilidade econômica das alternativas deve considerar fatores como investimentos iniciais, custos de operação e manutenção, impacto sobre as perdas elétricas e retorno financeiro ao longo da vida útil dos ativos (PFITSCHER et al., 2015).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia estruturada para a formulação e análise técnico-econômica de alternativas de melhoria nos sistemas de distribuição. Serão abordados aspectos como horizonte de planejamento, análise de carga e configuração da rede, visando fornecer subsídios para a tomada de decisão de forma otimizada e alinhada às necessidades do setor elétrico.



2 FORMULAÇÃO DE ALTERNATIVAS

A formulação de alternativas para a melhoria dos SEDs é um processo essencial para atender às deficiências futuras da rede elétrica, garantindo que o sistema possua a capacidade necessária para suprir a demanda projetada dentro do horizonte de planejamento. Além disso, as alternativas propostas devem estar alinhadas com os indicadores de qualidade estabelecidos, assegurando confiabilidade, eficiência operacional e viabilidade econômica.

A primeira etapa desse processo consiste na **triagem inicial** dos projetos propostos, considerando as metas financeiras da concessionária ou da entidade responsável. Projetos que excedam os limites de custo estabelecidos podem ser descartados nessa fase. Em seguida, as alternativas tecnicamente viáveis são submetidas a uma análise mais detalhada, contemplando critérios técnico-econômicos, previsão de carga e características operacionais do sistema elétrico analisado (ELETROBRAS, 1982).

2.1 HORIZONTE DE PLANEJAMENTO

O horizonte de planejamento define o período de análise para a projeção da demanda e a avaliação da necessidade de investimentos na rede elétrica. Em sistemas de distribuição, os períodos típicos adotados são:

- **Redes aéreas:** horizonte de planejamento de até **10 anos**;
- **Redes subterrâneas:** horizonte de planejamento de até **15 anos**.

Para garantir uma avaliação adequada, é necessário considerar as particularidades de cada sistema, incluindo fatores como taxa de crescimento da carga, disponibilidade de infraestrutura e diretrizes estratégicas da concessionária (BERNARDON et al., 2010).

2.2 ANÁLISE DA CARGA

A análise de carga é um elemento central na formulação de alternativas, pois permite a identificação das necessidades futuras do sistema elétrico dentro do horizonte de planejamento. Essa análise se baseia em estudos de previsão de carga, que auxiliam na definição do tipo de sistema mais adequado (aéreo ou subterrâneo) e dos arranjos de rede que melhor atendem às demandas projetadas.

Os principais fatores a serem considerados incluem:

- Evolução histórica do consumo e tendências de crescimento;
- Distribuição espacial da carga e impacto de novos consumidores;
- Influência da sazonalidade e variações de consumo ao longo do tempo;
- Efeitos de políticas de eficiência energética e introdução de novas tecnologias.

Com base nesses fatores, torna-se possível estruturar alternativas de expansão e reforço da rede de maneira otimizada, garantindo confiabilidade no fornecimento de energia (PFITSCHER et al., 2015).



2.3 ASPECTOS CONSIDERADOS E CONFIGURAÇÕES DE REDE UTILIZADAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

A formulação de alternativas exige uma compreensão detalhada dos aspectos técnicos que influenciam a operação da rede elétrica, bem como das diferentes configurações utilizadas nos sistemas de distribuição. Entre os principais fatores a serem analisados, destacam-se:

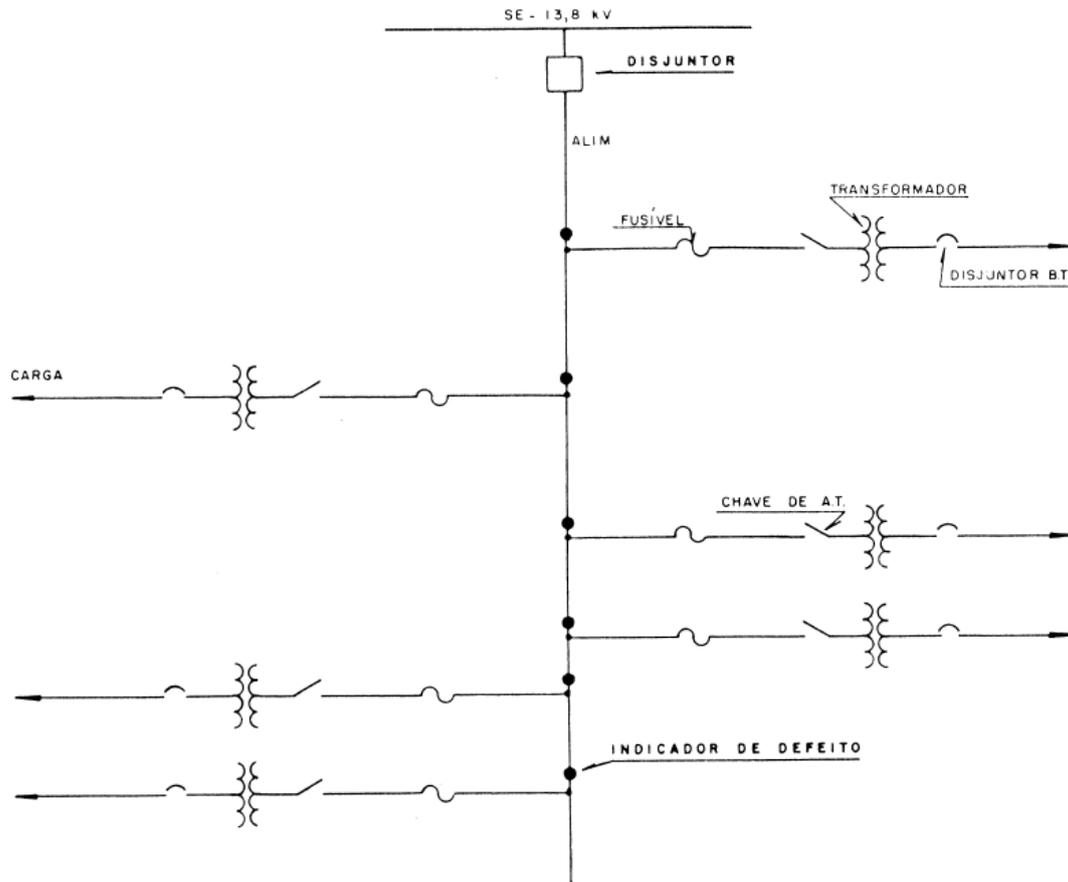
- **Tensão nominal do sistema de distribuição:** consideração das tensões já existentes, previsão de carga de longo prazo, densidade de carga, disponibilidade de equipamentos e distância média entre subestações.
- **Transformadores e circuitos secundários:** análise das configurações de redes secundárias, considerando alternativas aéreas (radiais e em anel) e subterrâneas (radiais e articuladas).
- **Distribuição primária:** avaliação das opções de redes aéreas e subterrâneas, com diferentes topologias operacionais, como sistemas radiais simples, radiais com recurso, primário seletivo e anel aberto.
- **Subestações:** planejamento da capacidade de transformação, do arranjo e da localização das subestações, visando garantir a confiabilidade do fornecimento de energia.
- **Subtransmissão:** escolha entre linhas aéreas e subterrâneas, levando em conta aspectos técnicos e econômicos. Em áreas densamente povoadas, as linhas subterrâneas podem ser mais adequadas, apesar do maior custo de implantação.

O estudo dessas configurações permite estruturar soluções que otimizem a operação da rede, equilibrando custos e desempenho.

2.4 EXEMPLOS DE CONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

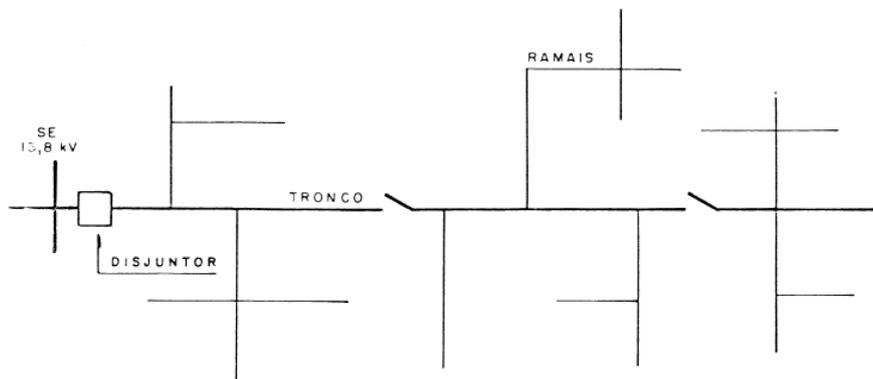
A seguir, são apresentados exemplos de sistemas de distribuição de média tensão (SDMT), ilustrando diferentes configurações de rede.

Figura 1 – Sistema de Distribuição de Média Tensão, Subterrâneo e Radial.



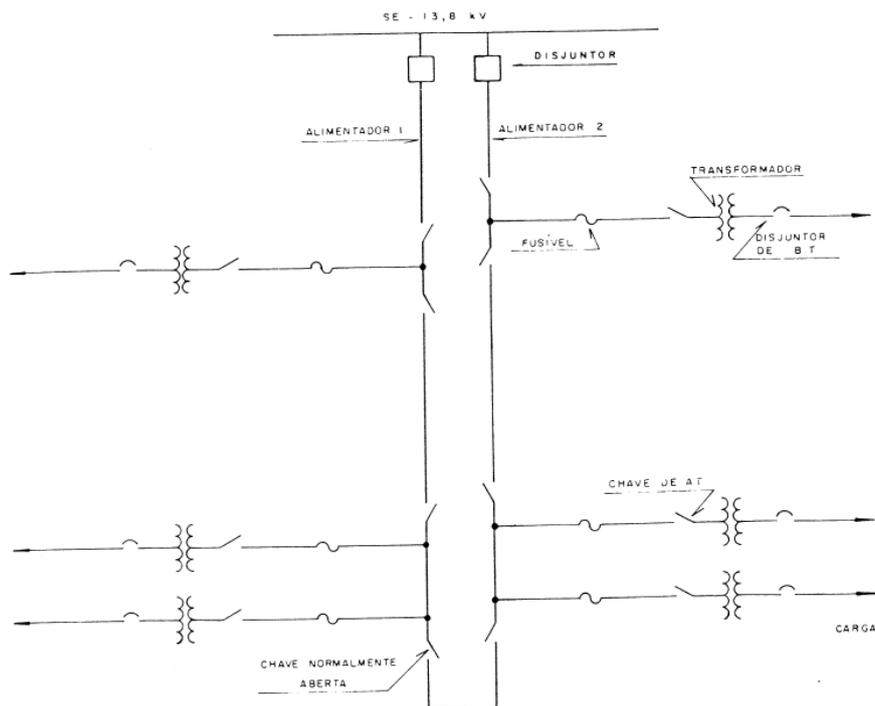
Fonte: (ELETROBRAS, 1982).

Figura 2 – Sistema de Distribuição de Média Tensão, Aéreo e Radial



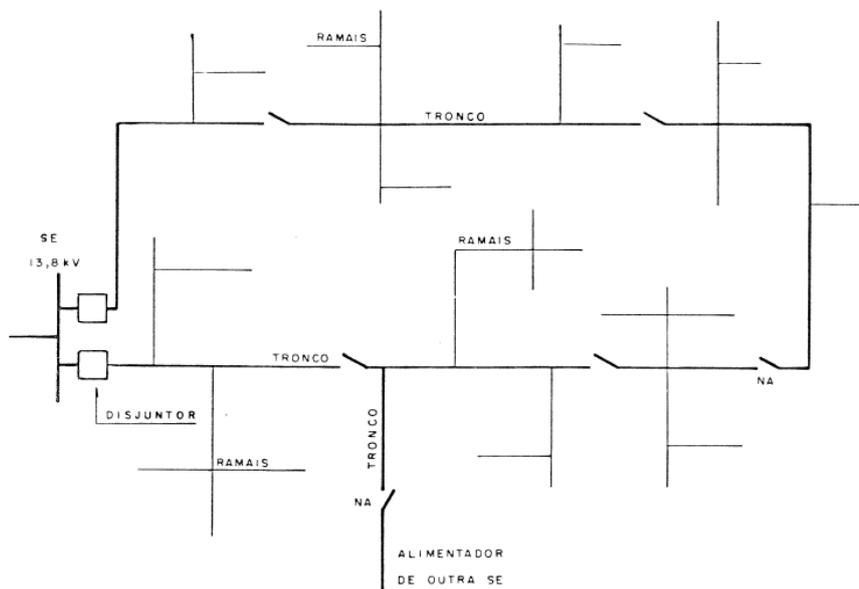
Fonte: (ELETROBRAS, 1982).

Figura 3 – Sistema de Distribuição de Média Tensão, Subterrâneo com Anel Aberto



Fonte: (ELETROBRAS, 1982).

Figura 4 – Sistema de Distribuição de Média Tensão, Aéreo com Recurso



Fonte: (ELETROBRAS, 1982).

Cada uma dessas configurações apresenta vantagens e desafios específicos, que devem ser considerados na formulação das alternativas. Redes subterrâneas oferecem maior confiabilidade e menor impacto visual, mas possuem custos mais elevados. Por outro lado, redes aéreas apresentam menor custo de instalação e manutenção, porém estão mais sujeitas a interferências climáticas e eventos externos.



Dessa forma, a escolha da configuração mais adequada depende da análise técnica e econômica realizada para cada caso específico, conforme discutido na próxima seção.

3 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DAS ALTERNATIVAS

A análise técnico-econômica é uma etapa fundamental na avaliação das alternativas propostas para melhorias nos SEDs. O objetivo desse processo é selecionar a solução que melhor atenda aos critérios técnicos e regulatórios, ao mesmo tempo em que minimize os custos operacionais e de investimento. A análise é composta por duas fases principais: avaliação técnica, onde são verificados aspectos operacionais e de desempenho da rede, e avaliação econômica, que considera os custos envolvidos ao longo da vida útil da alternativa selecionada (ELETROBRAS, 1982).

3.1 ANÁLISE TÉCNICA

A análise técnica das alternativas propostas visa garantir que a solução selecionada proporcione confiabilidade, qualidade e eficiência ao sistema elétrico. Essa etapa envolve a avaliação de três fatores principais: **níveis de tensão, índices de continuidade e carregamento dos condutores e equipamentos.**

1. **Análise dos níveis de tensão:**

A verificação dos níveis de tensão é essencial para garantir que a qualidade da energia fornecida esteja dentro dos limites estabelecidos pelas normas regulatórias. Esse processo pode ser realizado por meio de simulações computacionais de fluxo de potência, que permitem identificar trechos da rede com desvios de tensão e definir soluções corretivas, como a instalação de reguladores de tensão e compensadores reativos (BERNARDON et al., 2010).

2. **Índices de continuidade do fornecimento:**

A confiabilidade do sistema elétrico é avaliada com base nos índices regulatórios, como:

- **DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora)**, que mede o tempo médio de interrupção do fornecimento por consumidor.
- **FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora)**, que quantifica o número médio de interrupções por consumidor em um período determinado.

A análise da confiabilidade do sistema pode ser realizada por meio de fluxogramas operacionais, que permitem determinar o desempenho dos componentes da rede e projetar índices de continuidade para cada alternativa considerada (SOUSA et al., 2010).

3. **Carregamento dos condutores e equipamentos:**

O dimensionamento adequado dos condutores e equipamentos é essencial para evitar sobrecargas e garantir a estabilidade da rede. Os cálculos de carregamento consideram:

- O fluxo de potência ao longo dos circuitos;

- A corrente máxima suportada pelos condutores e transformadores;
- A capacidade de reserva dos alimentadores em caso de contingência.

Em sistemas com interligações entre alimentadores, a viabilidade de manobras operacionais depende da existência de margem de capacidade nos circuitos envolvidos (PFITSCHER et al., 2015).

3.2 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica tem como objetivo determinar os custos globais associados a cada alternativa e compará-los, garantindo que a escolha final seja a mais eficiente sob o ponto de vista financeiro. Os principais custos considerados são:

1. **Investimentos iniciais:**

Incluem os custos de aquisição de materiais e equipamentos, mão de obra, transporte, serviços contratados, aquisição de terrenos (quando aplicável) e taxas administrativas.

2. **Custos de operação e manutenção:**

Dependem do tipo de alternativa adotada, abrangendo despesas com inspeções, reparos, substituição de componentes e equipes de emergência.

3. **Custo das perdas elétricas no sistema:**

As perdas elétricas podem ser avaliadas com base em duas metodologias:

- **Cálculo do custo anual de perdas**, considerando a energia dissipada ao longo do tempo.
- **Cálculo com base na tarifa de compra de energia**, que estima o impacto financeiro das perdas no custo operacional da concessionária.

O custo das perdas pode ser expresso pela equação:

$$C_p = P \cdot C_p + E \cdot C_e \quad (1)$$

onde, C_p é o custo de perdas, P é a perda de ponta máxima em kW, C_p é o custo do kW comprado pela empresa, E é a perda anual em kWh, C_e é o custo do kWh comprado pela empresa.

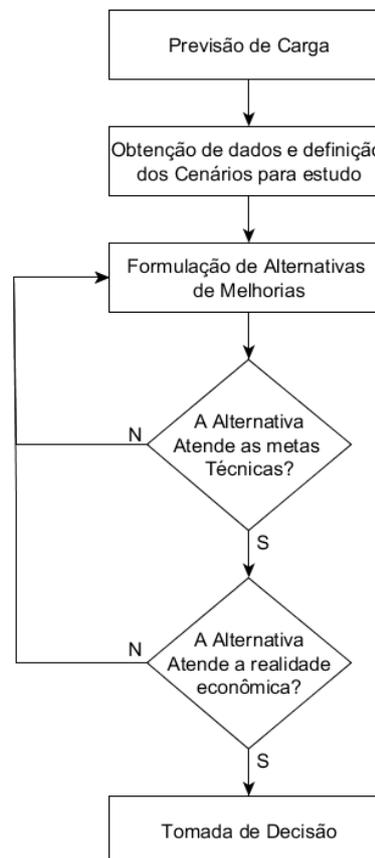
4. **Vida útil e valor residual dos ativos:**

A determinação da vida útil dos equipamentos e sua depreciação ao longo do tempo são fatores que impactam a análise econômica. Normalmente, considera-se um período médio de vida útil para os ativos do sistema, sem a necessidade de substituição imediata ao término desse período. O valor residual pode ser estimado pelo método linear de depreciação, garantindo que eventuais trocas de equipamentos sejam economicamente viáveis (SOUSA et al., 2010).

3.3 PROCESSO DE SELEÇÃO DA ALTERNATIVA ÓTIMA

A tomada de decisão na escolha da melhor alternativa de melhoria na rede elétrica deve integrar os resultados da análise técnica e econômica. O processo pode ser representado pelo Diagrama de Blocos da Figura 5, que ilustra a estrutura geral da análise técnico-econômica.

Figura 5 – Diagrama de Blocos do Processo de Análise Técnico-Econômica



A seleção da alternativa ideal deve ponderar tanto os critérios financeiros quanto os requisitos técnicos. Em alguns casos, uma solução que apresenta menor custo pode não atender adequadamente aos padrões de qualidade e continuidade exigidos, exigindo um compromisso entre investimento e confiabilidade.

Assim, a análise técnico-econômica desempenha um papel estratégico na definição das ações a serem adotadas para aprimorar a rede elétrica, proporcionando um processo de decisão embasado em critérios quantitativos e qualitativos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento e a otimização dos SEDs são fundamentais para garantir a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, a qualidade da eletricidade entregue aos consumidores e a viabilidade



econômica dos investimentos no setor. A formulação e a análise técnico-econômica de alternativas permitem que concessionárias e agentes reguladores tomem decisões mais assertivas na expansão e no aprimoramento da rede elétrica.

Este trabalho apresentou uma abordagem estruturada para a definição e avaliação de alternativas de melhoria nos sistemas de distribuição, abordando aspectos como horizonte de planejamento, análise de carga e configurações de rede. A análise técnico-econômica das alternativas foi discutida, destacando a importância da avaliação dos níveis de tensão, índices de continuidade e carregamento de condutores e equipamentos, além da necessidade de considerar os custos de investimento, operação e manutenção ao longo da vida útil dos ativos.

A escolha da melhor alternativa requer um equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômica. Alternativas mais robustas podem oferecer maior confiabilidade e qualidade da energia, mas com custos elevados de implementação e manutenção. Por outro lado, soluções mais econômicas podem não atender plenamente aos requisitos operacionais e regulatórios. Dessa forma, a utilização de metodologias baseadas em simulações computacionais, análise de fluxo de potência e otimização financeira são essenciais para garantir a tomada de decisão mais eficiente e sustentável.

A aplicação dessas metodologias impacta diretamente os indicadores técnicos do setor elétrico, incluindo o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), além de influenciar os custos operacionais e a imagem da concessionária perante consumidores e órgãos reguladores.

Por fim, com os avanços das redes elétricas inteligentes e da digitalização do setor elétrico, novas tecnologias podem aprimorar ainda mais a previsão de carga, a alocação de recursos e a análise de confiabilidade. A incorporação de big data, inteligência artificial e sistemas automatizados de monitoramento e controle tende a proporcionar maior eficiência na gestão dos sistemas de distribuição, possibilitando melhorias contínuas no planejamento e na operação da rede elétrica.

Dessa forma, a abordagem apresentada neste estudo pode servir como base para futuras pesquisas e aplicações práticas, contribuindo para um setor elétrico mais confiável, sustentável e economicamente viável.



REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 03 de dezembro de 2024.

BERNARDON, D. P.; SOARES, C.; SANTOS, M.; SPERANDIO, M. Curso de Extensão COTEU. Planejamento da Distribuição - PDD. Teutônia, 2010.

ELETROBRAS. Planejamento de Sistemas de Distribuição. Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v. 1. Rio de Janeiro: Editora Campus/Eletróbrás, 1982.

PFITSCHER, L. L.; CANHA, L. N.; MELLO, A. P. C.; ABAIDE, A. R.; SPERANDIO, M.; GARCIA, V. J.; RAMOS, M. J. S. Sistemas de Distribuição no Contexto das Redes Elétricas Inteligentes: Uma Abordagem para Reconfiguração de Redes. 1ª ed. Santa Maria: AGEPOC, 2015.

SOUSA, J. et al. Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Através de um Modelo de Otimização Clássica. XIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2010.