



Segmentação de Redes de Distribuição Prescrição de Religadores Automáticos como Estratégia de Manutenção Prescritiva

Tema: Redes de Distribuição

Autores: "Fabricio Expedito Viana" <fabricio.viana@edp.com>

Co-Autores: "Lima Filho, Vicente" <vicente.limafilho@kearney.com>; "Renan Franco De Moraes" <renan.demoraes@edp.com>; "Fernando Vargas Baldotto" <fernandobaldotto@edp.com>; "Willamy Siqueira Conde" <willamy.conde@edp.com>; "Julia Prado" <julia.prado@edp.com>; "Karen Meirelles Silva" <karen.silva@edp.com>; "Jose Dorlando De Souza Junior" <jose.dorlando@edp.com>; "Janailton Zumba De Melo" <janailton.melo@edp.com>

Empresa: EDP São Paulo Distribuição de Energia S.A

Resumo

A crescente complexidade das redes de distribuição de energia elétrica, aliada às expectativas cada vez mais exigentes dos consumidores, desafia as concessionárias a inovar na gestão de ativos e manutenção. Este artigo apresenta uma abordagem inovadora para segmentação de redes de distribuição, utilizando religadores automáticos como estratégia de manutenção prescritiva. Parte do projeto de P&D "Centro de Gestão Analítica e Computacional de TOTEX 4.0", desenvolvido pela EDP, a proposta integra Inteligência Artificial e Programação Inteira Mista (MIP) para otimizar a alocação de religadores em redes de média tensão.

O sistema, aplicado a mais de 70 mil km de rede, avalia milhões de cenários em apenas 5 minutos, identificando pontos ideais para instalação de religadores para seccionar e automatizar a rede. Como resultados práticos, houve uma redução média de 31% no FEC e 11% no DEC entre 2020 e 2023, com aumento significativo na cobertura de clientes beneficiados por transferências automáticas.

A solução também envolve um robusto reforço da infraestrutura de telecomunicações, com novas interligações em média tensão, substituição de baterias e tecnologias em religadores "master" e novas lógicas de Transferências Automáticas (TA). Essa infraestrutura possibilita maior flexibilidade e eficiência na rede ao garantir transferências automáticas rápidas e seguras em situações de contingência, principalmente em eventos climáticos extremos que tem se tornado mais frequentes.

Essa solução, baseada em análise preditiva e hiperautomação de dados, não apenas melhora a continuidade do fornecimento e a eficiência operacional, mas também promove uma gestão otimizada do TOTEX. O artigo destaca os avanços na resiliência da rede, demonstrando como a aplicação prática dessa tecnologia pode transformar o setor de distribuição de energia no Brasil.

1. Introdução

A crescente demanda dos consumidores por um fornecimento contínuo e confiável de energia coloca as concessionárias de distribuição diante do desafio de construir redes mais resilientes e eficientes. Eventos climáticos extremos, falhas de ativos e limitações operacionais exigem que as distribuidoras

adotem soluções tecnológicas inovadoras capazes de minimizar o tempo e a frequência das interrupções, melhorando a qualidade do fornecimento.

Nesse contexto, estratégias tradicionais de manutenção, como as abordagens corretiva e preventiva, têm mostrado limitações em redes de distribuição cada vez mais complexas. A manutenção prescritiva, aliada ao uso de Inteligência Artificial e algoritmos avançados, surge como uma solução de alto impacto ao permitir não apenas a identificação, mas também a prescrição otimizada de ações que aumentam a eficiência operacional e a resiliência da rede.

Este trabalho, parte do projeto de P&D "Centro de Gestão Analítica e Computacional de TOTEX 4.0", desenvolvido pela EDP e regulamentado pela ANEEL, apresenta uma metodologia inovadora para segmentação de redes de distribuição utilizando religadores automáticos. A solução integra ferramentas de otimização baseadas em Programação Inteira Mista (MIP), possibilitando a alocação estratégica de religadores em pontos críticos da rede para minimizar o impacto das falhas e garantir uma rápida transferência automática (TA) entre alimentadores.

Além da prescrição de religadores, a proposta envolve o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta que inclui novas interligações em média tensão, reforço de rede, substituição de baterias e modernização da tecnologia dos religadores "master", além da implementação de infraestrutura de telecomunicações para suportar lógicas avançadas de TA. Esses elementos combinados aumentam significativamente a flexibilidade e a automação da rede, reduzindo custos operacionais e o impacto das interrupções no fornecimento. Nos resultados apresentados, demonstra-se que a metodologia proposta foi capaz de reduzir o FEC em 31% e o DEC em 11% entre os anos de 2020 e 2023, com um aumento expressivo na cobertura de clientes beneficiados por transferências automáticas, passando de 30% para 76%. Esses ganhos evidenciam o potencial da solução para transformar a gestão de ativos e manutenção em redes de distribuição, alinhando eficiência operacional e satisfação dos consumidores.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a próxima seção apresenta a metodologia adotada para a prescrição de religadores automáticos; em seguida, são discutidos os resultados obtidos com a aplicação prática da solução; por fim, são apresentadas as conclusões e as perspectivas de aplicação da proposta em outras concessionárias.

2. Desenvolvimento

Para enfrentar os desafios crescentes das redes de distribuição de energia elétrica, como a alta frequência de interrupções e a necessidade de manutenção eficiente, este trabalho apresenta uma metodologia inovadora baseada em Inteligência Artificial (IA), Programação Inteira Mista (MIP) e análise preditiva. A solução foi concebida no âmbito do projeto de P&D "Centro de Gestão Analítica e Computacional de TOTEX 4.0", com o objetivo de reduzir custos operacionais, melhorar os indicadores de qualidade e fortalecer a resiliência da rede.

1. Modelagem Matemática com Programação Inteira Mista (MIP)

A alocação estratégica de religadores automáticos foi formulada como um problema de Programação Inteira Mista (MIP), uma técnica robusta utilizada para resolver problemas de otimização complexos em cenários com múltiplas restrições. O MIP foi escolhido devido à sua capacidade de modelar variáveis discretas e contínuas de forma eficiente, permitindo a análise simultânea de milhões de combinações possíveis.

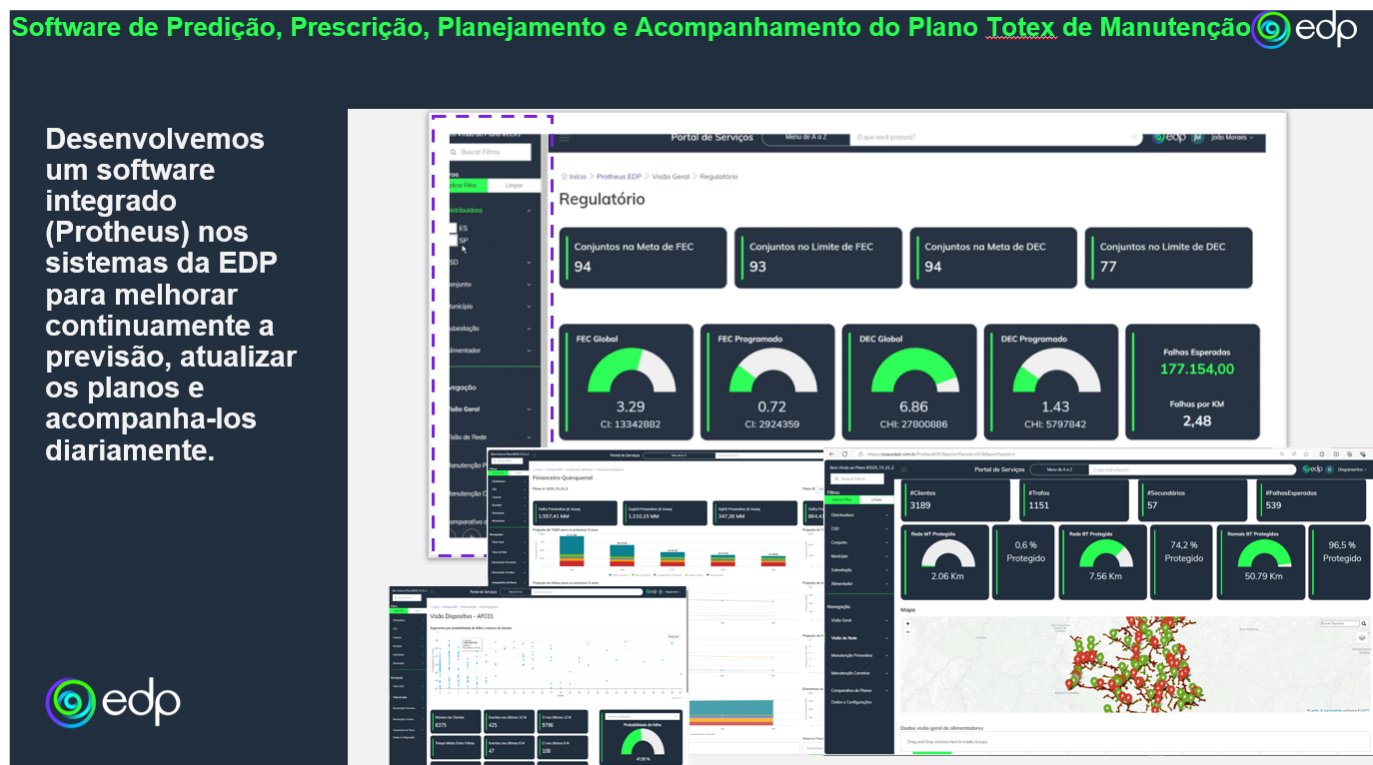
O modelo possui três objetivos principais:

Minimização do impacto das falhas: Redução do número de clientes afetados em eventos de interrupção.

Segmentação eficiente da rede: Divisão estratégica da rede em blocos menores para facilitar as transferências automáticas (TA).

Otimização do TOTEX: Definição do equilíbrio ideal entre investimentos em novos religadores (CAPEX) e os benefícios resultantes, como redução de OPEX.

O sistema utiliza solvers matemáticos de alta performance para processar grandes volumes de dados em um curto espaço de tempo. Como resultado, em apenas 5 minutos, o modelo foi capaz de analisar mais de 70 mil km de rede de média tensão, prescrevendo os pontos ótimos para instalação de religadores automáticos, de forma a maximizar os benefícios operacionais e financeiros.



2. Sistema de Predição e Análise Preditiva

Integrado à modelagem de otimização, o sistema incorpora uma camada de análise preditiva baseada em Machine Learning para identificar falhas temporárias e permanentes antes que se tornem críticas. Utilizando dados históricos e operacionais da rede, como:

- Medições em tempo real de disjuntores e religadores,
- Histórico de falhas temporárias, com padrões de recorrência,
- Sazonalidade da carga e características dos alimentadores.

Os algoritmos de classificação aplicados permitiram realizar predições precisas de ocorrências de falhas, com taxas de acerto superiores a 85%. Esse nível de precisão possibilitou:

- A antecipação de manutenções, reduzindo deslocamentos improdutivos de equipes.
- A identificação assertiva do local das falhas, diminuindo o tempo de restabelecimento do fornecimento.
- A prescrição automatizada de ações, integrando a manutenção prescritiva com a operação da rede.

O Protheus usa diversos algoritmos de machine learning integrado nos sistemas da EDP com mais de 150 variáveis.

O banco de dados do projeto foi dividido em 4 grupos de informações, originados de 9 sistemas diferentes com 50+ tabelas processadas até o momento.

150 Variáveis totais
Melhorias no Processo



3. Infraestrutura de Telecomunicações e Automação

A eficácia da solução proposta exigiu uma infraestrutura robusta de telecomunicações e automação, garantindo a execução rápida e segura das transferências automáticas. As melhorias implementadas incluem:

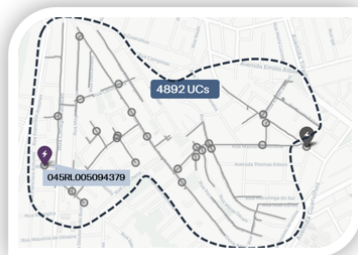
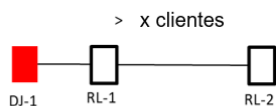
- Novas interligações em média tensão (MT): Reforço da rede com interligações estratégicas para segmentação e flexibilidade.
- Modernização dos religadores “master”: Substituição de baterias e revisão tecnológica para otimizar a comunicação e o controle.
- Novas lógicas de Transferências Automáticas (TA): Algoritmos avançados implementados para responder com maior agilidade e precisão às contingências.
- Reforço na infraestrutura de comunicação: Implementação de soluções de telecomunicações integradas para monitoramento e comando em tempo real.

Transferências Automáticas: Divisão de blocos e reforço na infraestrutura para automação

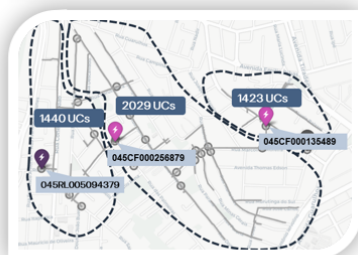
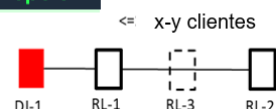
Seccionamento de toda rede com religadores

Instalação de Religadores em pontos estratégicos

Antes

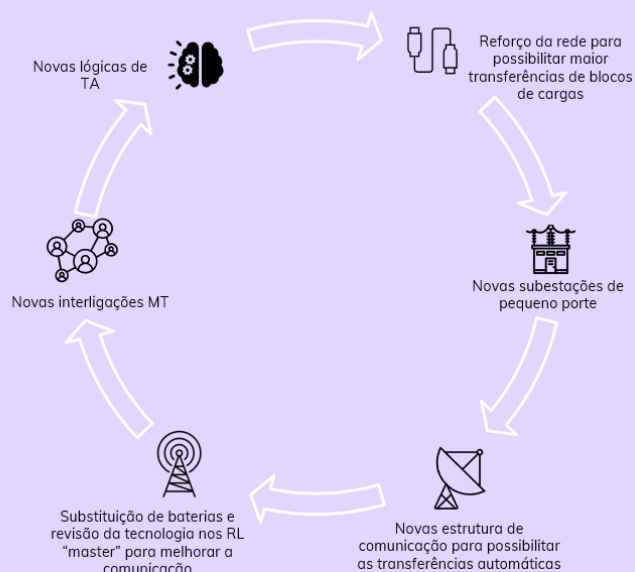


Depois



Infraestrutura para possibilitar as transferências

Preparar toda infraestrutura para garantir as transferências



Transferências Automáticas, a lógica para aumentar as possibilidades...

Até 2020

Transferência Unidirecional 2 alimentadores, apenas 1 religador NF e 1 religador NA

Nesta configuração apenas um dos alimentadores pode socorrer a carga do outro.



Transferência Bidirecional (2 alimentadores, 2 religadores NF e 1 religador NA)

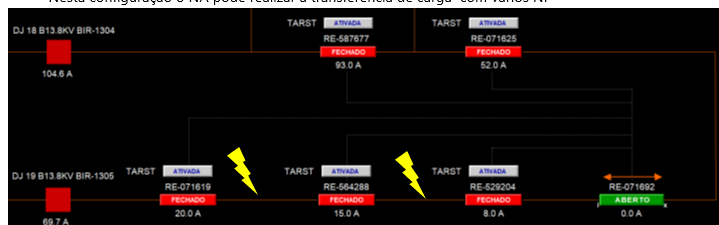
Nesta configuração as cargas dos dois alimentadores podem ser socorridas



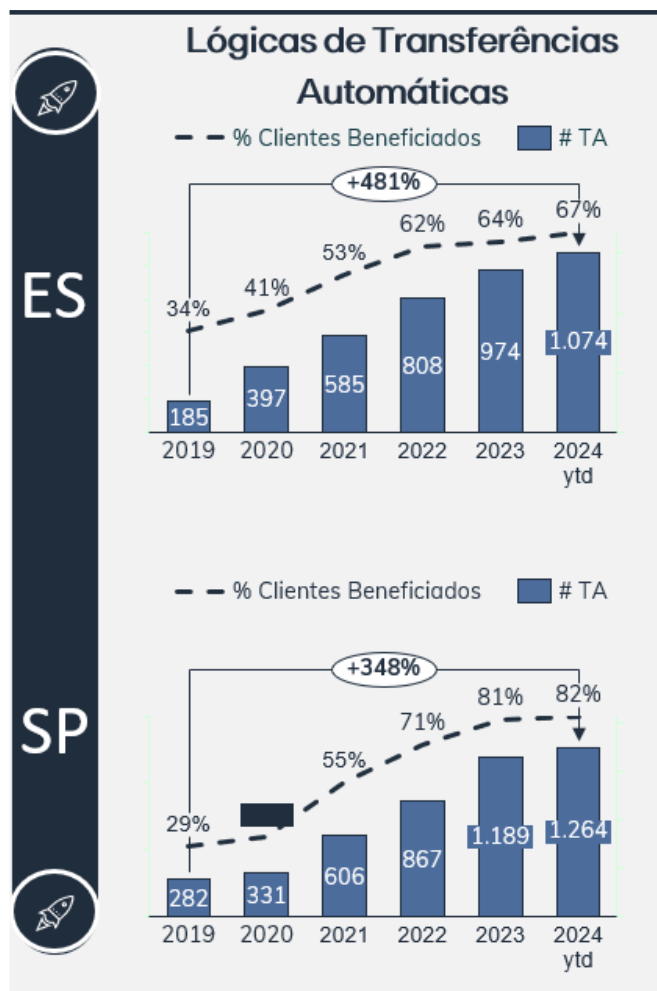
Atualmente

CASCATA - Mesmo RL NA fazendo transferência com vários NF

Nesta configuração o NA pode realizar a transferência de carga com vários NF



Futuro:
Com o ADMS novas possibilidades surgirão...



4. Aplicação Prática e Resultados

A metodologia foi aplicada em duas regiões de distribuição entre os anos de 2020 e 2023. A análise prática demonstrou resultados expressivos nas duas distribuidoras, como:

Redução de 31% no FEC (Frequência Equivalente de Interrupções por Consumidor).

Redução de 11% no DEC (Duração Equivalente de Interrupções por Consumidor).

Aumento na cobertura de transferências automáticas: A porcentagem de clientes beneficiados passou de 30% para 76%, ampliando significativamente a capacidade de resposta da rede.

Além dos ganhos quantitativos, os resultados reforçam os benefícios qualitativos da abordagem, como:

Aumento da resiliência operacional: A segmentação da rede em blocos menores garante uma rápida resposta em situações de contingência.

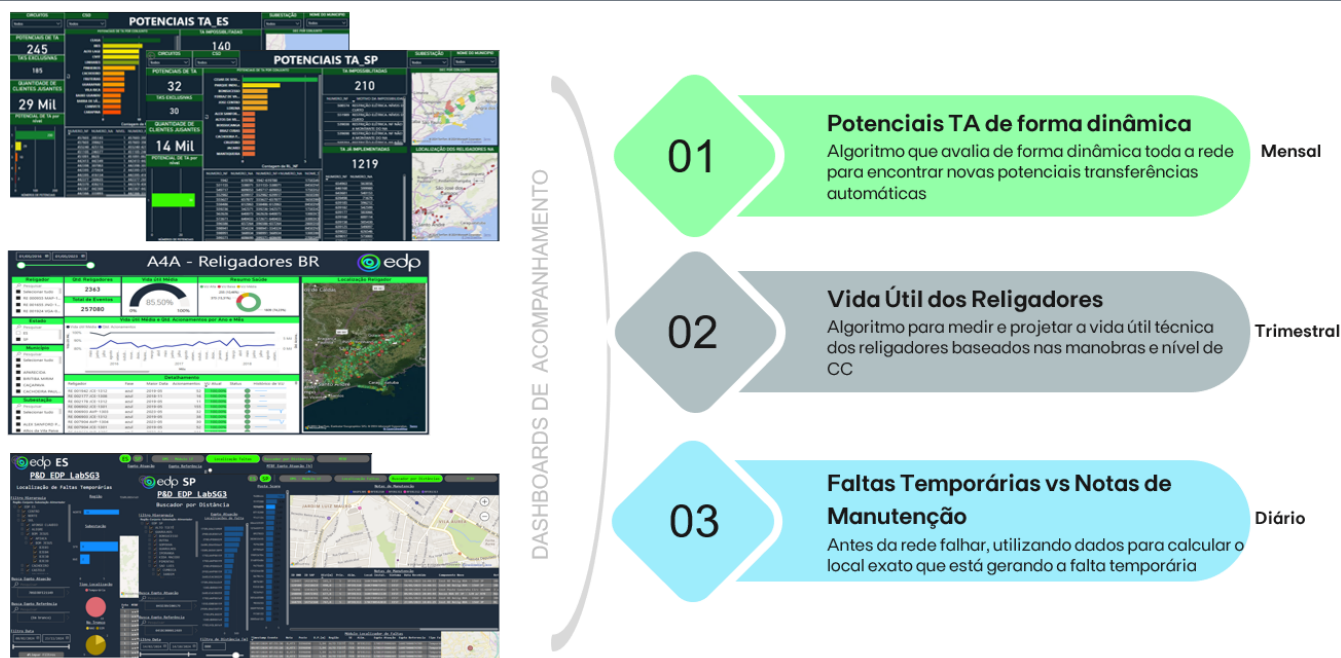
Redução dos custos operacionais: A otimização no despacho de equipes e a automação minimizam despesas com manutenções corretivas.

Maior satisfação dos consumidores: A redução do tempo e da frequência de interrupções reflete diretamente na melhoria da qualidade percebida pelos clientes.

3. Conclusão

Visto o maior volume de religadores na rede foi possível criar outro projeto para monitorar alertas de faltas temporárias identificando o local exato do defeito a ser mantido antes mesmo de se tornar uma falta permanente.

Visto o aumento de religadores, maior sensoriamento e automatismo para controle...



A metodologia proposta apresentou resultados significativos, estabelecendo um novo padrão para a gestão de redes de distribuição de energia elétrica. A integração de **Programação Inteira Mista (MIP)**, **análise preditiva baseada em IA** e **infraestrutura avançada de telecomunicações** revelou-se essencial para o sucesso da solução.

Os principais avanços incluem:

- **Redução de 31% no FEC e 11% no DEC**, promovendo um fornecimento mais estável e confiável.
- **Cobertura ampliada de Transferências Automáticas (TA)**, com um aumento de clientes beneficiados de 30% para 76%, fortalecendo a resiliência da rede.
- **Alta precisão nas predições de falhas**, com taxa de acerto superior a 85%, permitindo intervenções proativas e redução de custos operacionais.

Além dos resultados imediatos, o projeto destacou-se pela sua **escalabilidade** e **potencial de replicação** em outras concessionárias de energia, independentemente das características específicas da rede.

A abordagem apresentada representa um marco na transição para redes mais inteligentes e resilientes. A **manutenção prescritiva**, sustentada por tecnologias avançadas, provou ser uma ferramenta indispensável para atender às crescentes exigências regulatórias e às expectativas dos consumidores por um serviço mais confiável.

Perspectivas Futuras

As próximas etapas incluem:

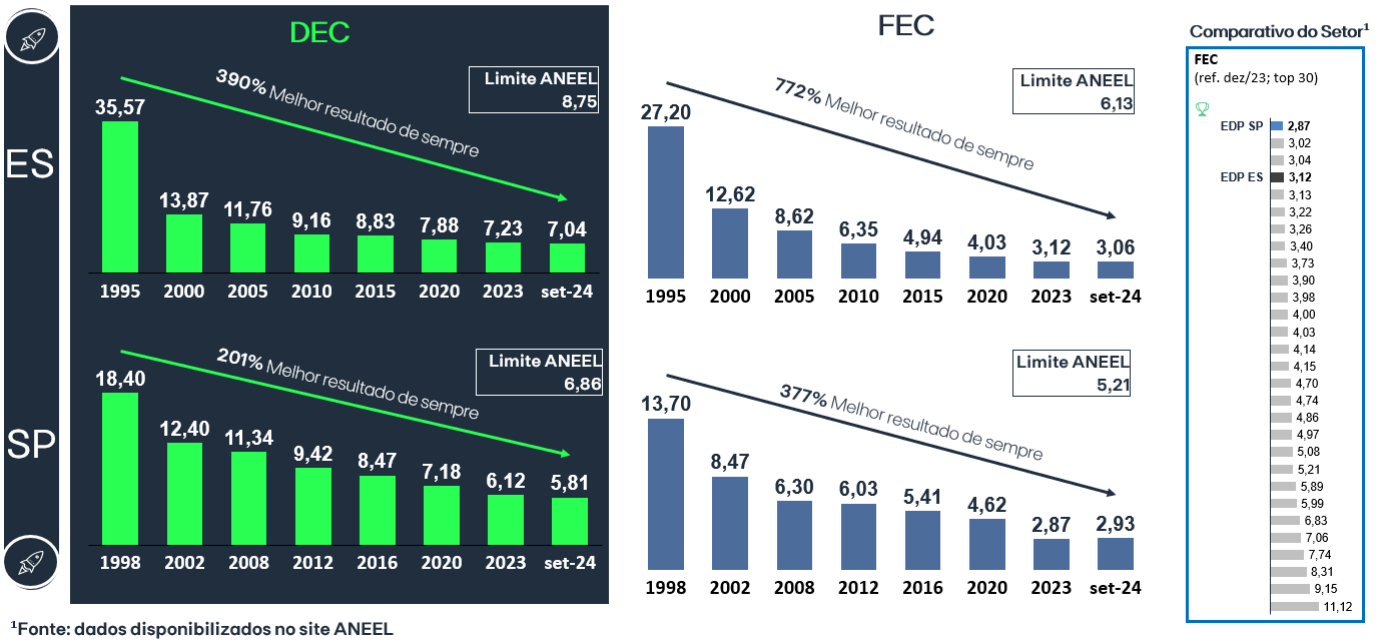
1. **Integração com redes inteligentes (smart grids)**: Explorando maior automação e conectividade entre os elementos da rede.
- 2.

Aplicações em redes subterrâneas: Desenvolvendo metodologias adaptadas para ambientes urbanos complexos.

3. **Avanços em análise preditiva:** Incorporando dados climáticos e de demanda para melhorar ainda mais as previsões e ações preventivas.

Com essas iniciativas, espera-se consolidar a transformação digital no setor de distribuição de energia, garantindo eficiência operacional e resiliência em um cenário de desafios crescentes.

O melhor resultado histórico de FEC e DEC é reflexo das pessoas que criam estratégias e aplicam recursos na continuidade do fornecimento...



4. Referências bibliográficas

KONDO, Daniela Vinci. Alocação de religadores automatizados em sistemas de distribuição. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29122015-160636/>. Acesso em: 09 dez. 2024.

TRINDADE, F. C. L.; FREITAS, W.; VIEIRA, J. C. M.; "Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 251-260, Feb. 2014.

DASHTDAR, M.; DASHTI AND, R.; SHAKER, H. R. "Distribution network fault section identification and fault location using artificial neural network," 2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), Istanbul, Turkey, 2018, pp. 273-278

VIANA, Fabricio Exedito. Sistema especialista para cálculo de sobretensões induzidas em sistemas de distribuição frente às descargas atmosféricas indiretas. 2019. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. doi:10.11606/D.18.2020.tde-05022020-154943. Acesso em: 2025-01-21.

DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E. "An open source platform for collaborating on smart grid research," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-7