



# CENTRO DE OPERAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO APOIADO POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: APLICAÇÃO DE FUNCIONALIDADES PARA LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE DEFEITOS E SIMULAÇÃO DE MANOBRAS

**Tema:** Tecnologias Emergentes

**Autores:** Luiz Henrique Leite Rosa (USP)

**Co-Autores:** Carlos Frederico M. Almeida (USP), Nelson Kagan (USP), Renan Correa de Moura (USP), Renato Spalding (USP), Thiago Saúde Medeiros (USP), Clarissa Raimundo (EDP Brasil), Fabricio Expedito Viana (EDP Brasil), Fernando Vargas Baldotto (EDP Brasil), Gabriel Batista (EDP Brasil), Marcos Morita Otuka (EDP Brasil), Willamy Siqueira Conde (EDP Brasil)

**Empresa:** Universidade de São Paulo

---

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e aplicação da plataforma computacional ADA\_USP composta dos módulos de localização de faltas e simulação de manobras baseada em inteligência artificial e integração aos sistemas de informação do Centro de Operação da Distribuição. O projeto foi desenvolvido no âmbito do programa PROPDJ ANEEL, código PD-00391-0047/2023, tendo as empresas EDP SP e EDP ES como proponentes e o ENERQ/USP como entidade executora. A plataforma permite a identificação automática de falta permanentes ou temporárias na rede e localização dos possíveis locais de defeito, bem como a determinação automática da melhor sequência de tarefas para uma ocorrência, contemplando tarefas para isolamento da porção de rede com defeito, alívio dos alimentadores, remanejamento de cargas, retorno à configuração inicial e todas as tarefas relevantes para a segurança das equipes e para a estabilidade da rede. Os resultados apresentados comprovam a efetividade dos blocos funcionais descritos, com destaque para a aplicação do OpenDSS como motor de cálculo de fluxos de potência e curto-circuito e algoritmos de inteligência artificial, sendo executados em tempo real e de forma integrada com os diversos sistemas da distribuidora como OMS, SCADA, GIS, Power BI e Sistema de notas de manutenção.

## 1. Introdução

Em sistemas de distribuição de energia, um defeito na rede requer ações rápidas do operador que contemplam, dentre outras ações, a localização do defeito, manobras para isolamento deste trecho e manobras de remanejamento na rede para minimizar a quantidade e o tempo de clientes sem energia e atender aos indicadores de qualidade do fornecimento.

Além disso, segundo (MORAIS, 2020), a identificação de áreas com maior índice de faltas temporárias possibilita o direcionamento de ações preventivas na rede de distribuição na medida que permite análises sobre sua vulnerabilidade e correlação com indicadores da manutenção das redes de distribuição de energia.

Diversas pesquisas apresentam metodologias de localização de faltas, sejam utilizando medições de diversos equipamentos da rede, incluindo medidores inteligentes como apresentados em (PEREIRA, ALMEIDA, ROSA, KAGAN e DOMINICE, 2021) e (TRINDADE, FREITAS e VIEIRA, 2014) ou trabalhos que consideram redes neurais treinadas a partir de dados históricos de ocorrências conforme apresentado em (DASHT-DAR, DASHTI e SHAKER, 2018). Entretanto, a baixa penetração de medidores inteligentes nos sistemas de distribuição do Brasil, dificulta a aplicação dessas metodologias.

Após a localização da falta/defeito o operador deverá definir as melhores manobras para isolamento do local do defeito e as manobras de remanejamento, ou seja, a reconfiguração da rede visando a transferência dos blocos de carga não afetados para serem alimentados por um ou mais alimentadores vizinhos, e isso normalmente só é possível após longa análise de dados encontrados nos sistemas SCADA (níveis de tensão e corrente dos alimentadores que poderão servir para o remanejamento, status das chaves telecomandas), nos sistemas OMS (topologia da rede, identificação das chaves de manobra NA e NF e outros dispositivos da rede, quantidade de clientes) e em outras ferramentas para estimar a evolução do carregamento dos alimentadores caso a manobra se estenda além do tempo previsto.

O desafio de implementar a solução de reconfiguração das redes de distribuição é a grande quantidade de combinação possíveis em uma rede e a escolha dos melhores candidatos de reconfiguração ideal (MOSBAH, ARIF, MOHAMMEDI e HELLAL, 2017). Muitos algoritmos meta-heurísticos têm sido propostos para resolução deste problema como algoritmos genéticos (CHAVALI, PAHWA e DAS, 2002), mas a aplicação destas técnicas para a determinação da sequência otimizada das manobras em redes reais, com muitas possibilidades de manobras, constitui um grande desafio (WATANABE e NODU, 2004).

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento e aplicação da plataforma computacional ADA\_USP composta dos módulos de localização de faltas/defeitos e simulação de manobras baseadas em inteligência artificial com atuação integrada aos sistemas OMS, SCADA e GIS para aplicação em larga escala nas redes de distribuição de energia. O módulo de localização de defeitos tem por objetivo identificar automaticamente uma falta permanente ou temporária na rede por meio de alarmes provenientes do sistema SCADA, fazer a localização dos possíveis locais de defeito e enviar as informações georreferenciadas para o sistema OMS utilizado na gestão de ocorrências em tempo real no COD. O módulo de simulação de manobras tem por objetivo determinar automaticamente a melhor sequência de tarefas para a uma dada ocorrência, contemplando tarefas para isolamento da porção de rede com defeito, remanejamento de cargas, retorno à configuração inicial e todas as tarefas relevantes para a segurança das equipes e para a estabilidade da rede.

## **2. Desenvolvimento**

Para alcançar o objetivo de apoiar a operação da distribuição, com fornecimento de novas informações em tempo real, de forma automática e sem novas interfaces para o operador além do próprio OMS já utilizado pelas empresas, a metodologia proposta de desenvolvimento do ADA\_USP contemplou uma plataforma de módulos computacionais integrados aos sistemas legados das empresas por meio de um Front END, o que permitiu o funcionamento dos módulos sem interfaces com o usuário, obtendo dados necessários de diversos sistemas legados e levando os resultados para o OMS de forma automática. Os detalhamentos das integrações e das funcionalidades dos módulos de localização de faltas e simulação de manobras são apresentados nos itens a seguir.

### *2.1 Integração*

A integração dos módulos de localização de faltas e simulador de manobras com os sistemas legados da empresa, mais especificamente com o SCADA, GIS e OMS, se dá pelo módulo Front End através de interfaces específicas para com os respectivos sistemas, conforme ilustrado na figura 1 a seguir.

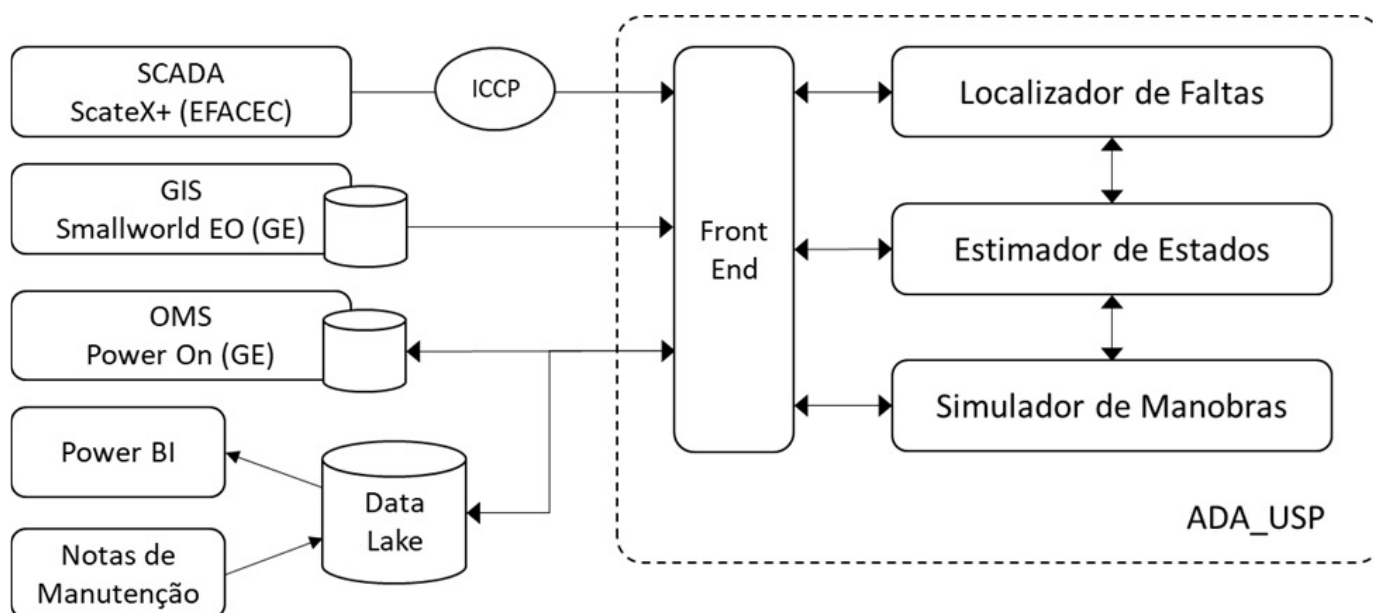


Figura 1 – Integração da plataforma ADA\_USP contendo os módulos Localizador de Faltas, Estimador de Estados e Simulador de Manobras com os sistemas legados da EDP através do módulo Front End.

A comunicação com o ScateX acontece via protocolo ICCP, um protocolo de alto nível para integração de sistemas supervisórios com troca de dados em tempo real como dados de tensões e correntes em todos os disjuntores e religadores supervisionados por este SCADA.

Os dados georreferenciados de rede são obtidos do sistema GIS chamado Smallworld EO por meio de Views criadas em seu banco de dados Oracle e acessadas diariamente, desta forma todas as informações de topologia de rede e características dos circuitos e equipamentos estão sempre disponíveis e atualizadas para os processos seguintes.

Os dados de localização de faltas permanentes e temporárias são enviados para um Data Lake que abriga também informações das notas de manutenção provenientes do sistema COFEE da EDP, permitindo que os dados das localizações de falta e notas de manutenção sejam analisados de forma conjunta no Power BI.

Por fim, são as interfaces com o Power On que permitem a obtenção dos estados anormais da rede e a visualização, na própria tela deste OMS, dos resultados do localizador de faltas e do simulador de manobras em tempo real.

## 2.2 Módulo de estimação de estados

A funcionalidade de estimação de estados é responsável por atualizar o modelo da rede elétrica, de forma que este fique o mais próximo possível das condições reais da rede, a partir dos dados de rede cadastrados originalmente no GIS, dos dados do SCADA e das informações e manobras (estados anormais) inseridas pelos operadores no OMS.

A estimação de estados para localização de faltas e simulação de manobras utiliza a rede em seu estado real, ou seja, a rede modelada na etapa de preparação da rede com dados do GIS é atualizada de acordo

com os dados de estados anormais dos equipamentos (aberto, fechado), tags de bloqueio e outras informações provenientes do OMS.

Na sequência, a demanda das cargas da rede é atualizada com os resultados da execução do algoritmo iterativo Load Allocation do OpenDSS, onde a potência inicial das cargas é definida com base nas curvas típicas de demanda, provenientes do GIS, e as medições de referência para ajuste da demanda do algoritmo são definidas com base nas medições de corrente de equipamentos telecomandos provenientes do SCADA.

### *2.3 Módulo de Localização de Falhas*

O algoritmo inteligente do módulo de localização de falhas faz a interpretação e seleção dos alarmes de interesse, dentre a avalanche de dados recebidos via ICCP do SCADA, e os resultados das localizações georreferenciadas são enviados para o OMS e para o Power BI.

Os alarmes de interesse selecionados pelo módulo para caracterizar uma falta contemplam informações sobre o horário do alarme, código do equipamento, tipo de alarme (proteção atuada, corrente de curto-circuito, autobloqueio, abertura e fechamento de chaves) os quais são agrupados e tratados em um mesmo processo.

Com as informações dos equipamentos sobre as correntes de falta trifásica, bifásica ou curto franco fase-terra, o algoritmo faz a comparação com os módulos das correntes de falta simulados em todos os nós da rede, através de um motor de cálculos de curto-circuito baseado na função FaultStudy do simulador OpenDSS (DUGAN e MCDERMOTT, 2011), sendo consideradas soluções os casos em que o módulo da diferença entre as correntes obtidas do SCADA e as simuladas estejam dentro de uma tolerância especificada.

Ao final deste processo, a falta é classificada em temporária, se dispositivo permaneceu fechado após os religamentos, ou permanente, se após os religamentos o dispositivo ficou aberto e entrou em autobloqueio. Na sequência, a lista de possíveis locais de defeito é ranqueada segundo os seguintes critérios:

- i. Localizações na zona de proteção do dispositivo atuado, priorizando as localizações com corrente de curto mais próxima da corrente de trip;
- ii. Localizações fora da zona de proteção do dispositivo atuado, mas em área protegida por fusível e existência de curva rápida parametrizada no dispositivo atuado à montante, priorizando os fusíveis com maior elo;
- iii. Localizações fora da zona de proteção do dispositivo atuado, mas em área protegida por fusível e ausência de curva rápida parametrizada no dispositivo atuado à montante, priorizando os fusíveis com maior elo;
- iv. Demais localizações fora da zona de proteção do dispositivo atuado, priorizando as localizações com corrente de curto mais próxima da corrente de trip;

Por fim os resultados são enviados para o sistema o OMS e para o Data Lake, um banco de dados que abriga também informações das notas de manutenção, permitindo que os dados das localizações de falta e notas de manutenção sejam analisados de forma conjunta no Power BI.

### *2.4 Módulo de Simulação de Manobras*

O módulo de simulação de manobras é baseado em uma inteligência artificial que usa a rede de distribuição modelada em grafos da rede para aplicação do algoritmo AG (Algoritmos Genéticos). A Figura 2 apresenta

a ideia de representação da rede por grafo com a indicação da porção de rede onde se encontra o defeito apontado pelo operador.

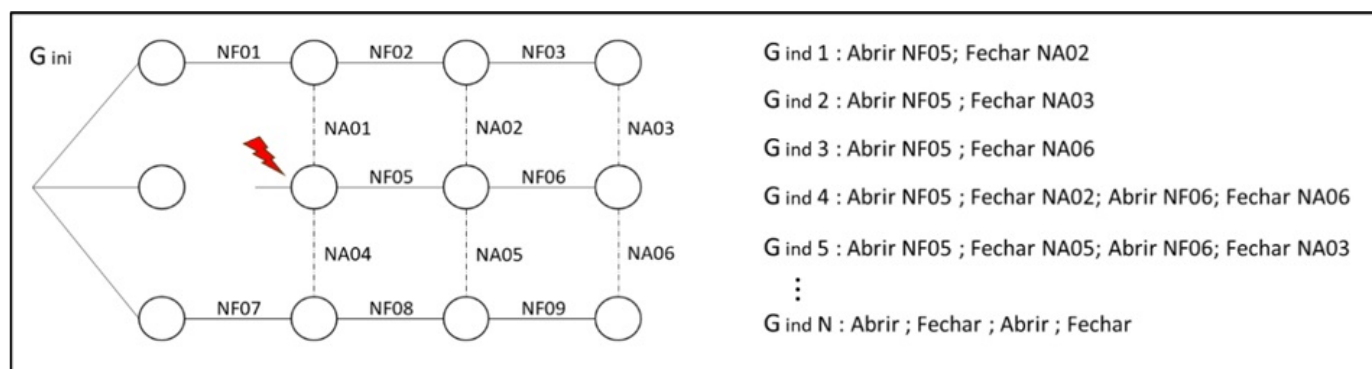


Figura 2 - Representação da rede por grafo com a indicação do defeito (esquerda) e manobras para obtenção de cada indivíduo gerado e analisado pelo algoritmo Genético de Grafos.

Na figura, cada circunferência representa um nó (blocos de cargas). As arestas em linha contínua representam as chaves normalmente fechadas (NF) e, por fim, as arestas em linha pontilhada representam as chaves normalmente abertas (NA). A figura apresenta ainda as diversas manobras possíveis para obtenção de novos grafos (G ind 1 até G ind N) que são os indivíduos analisados em cada estágio do algoritmo genético de grafos para remanejamento dos blocos de carga.

O objetivo do Algoritmo Genético de Grafos é determinar o grafo que representa a rede final, após os estágios de mutação, cruzamento e seleção (que são os operadores de algoritmo genético) aplicados a uma população de indivíduos gerados a partir de G ini (grafo da rede inicial). A seleção dos indivíduos (G ind), que passam de um estágio para outro, é baseada em uma função de avaliação calculada com os seguintes índices de mérito:

- Fluxo de potência: verifica ultrapassagem de limites de carregamento e tensão a partir de fluxos de potência tendo como motor de cálculo o OpenDSS.
- Chaves telecomandadas: prioriza grafos com manobras telecomandas.
- Número total de chaveamentos: potencializa grafos com menor número de manobras.

Ao final deste processo as manobras de abertura e fechamento determinadas no grafo de rede final são divididas em 2 grupos denominados de isolamento e remanejamento, e um terceiro grupo de manobras denominado retorno, que contempla a sequência inversa das manobras que trazem a rede alterada para o seu estado inicial.

A etapa seguinte de processamento do simulador de manobras é a criação de tarefas relacionadas aos aspectos de segurança das equipes de campo, de acordo com a NR10, como bloqueio de chaves e tarefas de testar e aterrar o trecho e tarefas relacionadas aos aspectos de estabilidade da rede durante as manobras como bloqueios de religamento, substituição de elo fusível por lâmina, colocação de reguladores de tensão em “tap neutro” (em caso de fluxo inverso), dentre outras.

## 2.5. Resultados Obtidos

O produto do projeto constitui uma plataforma com módulos computacionais baseados em inteligência artificial para localização de faltas e simulação de manobras e com forte integração com os sistemas legados da EDP SP e EDP ES conforme visto na figura 1.



Todos os resultados das localizações de faltas também foram enviados para o Data Lake da empresa, o que facilitou o armazenamento do histórico de informações e sua apresentação no Power Bi onde os dashboards permitem a visualização georreferenciada das informações e integração com os dados das notas de manutenção, orientando a tomada de decisão sobre as áreas de rede mais vulneráveis e prioritárias para receberem inspeção no local.

- Mapa georreferenciado para apresentação dos dados de localização em conjunto com as notas de manutenção.
- Mapa de calor realçando as áreas de com mais defeitos encontrados.
- Lista das localizações com informações sobre o defeito e identificação do poste mais próximo.
- Gráfico da curva do MTBF, com indicação do cálculo do tempo entre defeitos localizados em um dispositivo e sua evolução à cada mês do ano.

- Mapa georreferenciado para apresentação dos dados de localização em conjunto com as notas de manutenção.
- Mapa de calor realçando as áreas de com mais defeitos encontrados.
- Lista das localizações com informações sobre o defeito e identificação do poste mais próximo.
- Gráfico da curva do MTBF, com indicação do cálculo do tempo entre defeitos localizados em um dispositivo e sua evolução à cada mês do ano.



Figura 4 - Tela do Power BI para visualização das faltas e cruzamento dos dados com as notas de manutenção.

Com relação ao módulo de simulação de manobras, a figura 5 apresenta a tela de simulação criada no Power On onde o operador pode visualizar a listagem de simulações solicitadas, a tabela contendo todas as tarefas criadas automaticamente pela inteligência artificial e o gráfico da corrente simulada para o período de um dia (24 horas) para os alimentadores que receberam as cargas remanejadas do alimentador com defeito.

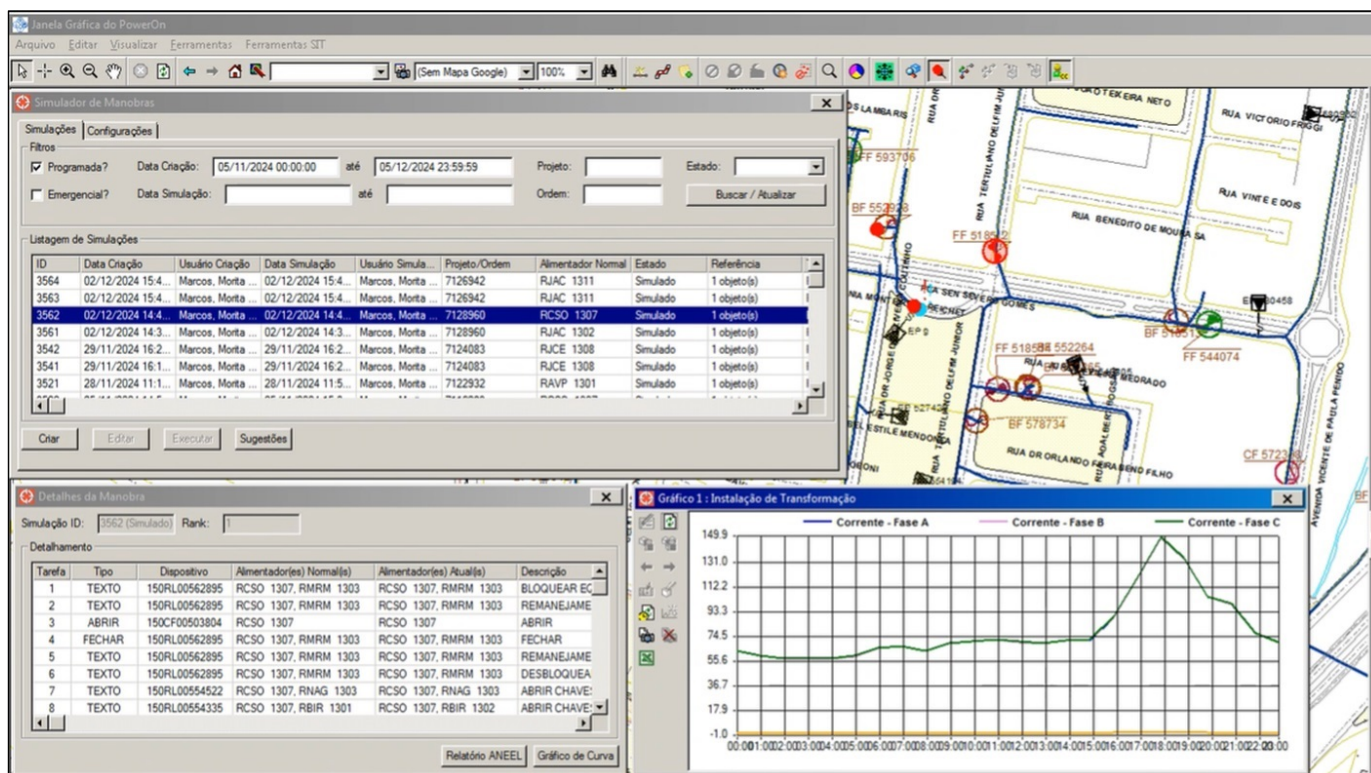


Figura 5 - Tela de simulação de manobras criada no Power On para visualização dos resultados do simulador com detalhamento das tarefas e manobras e gráfico da corrente simulada para os alimentadores de socorro.

Durante o ano de 2024 foram simuladas no Power On um total de aproximadamente 770 simulações de manobra (programadas ou emergenciais) considerando toda a área de concessão das empresas, com ganhos expressivos no tempo de criação das tarefas que, de forma manual, demoravam de 45 a 120 minutos (dependendo da complexidade), passaram a ser realizadas entre 5 e 10 minutos e com alto grau de confiabilidade.

### 3. Conclusão

Uma das principais tarefas dos operadores do COD é restaurar o fornecimento de energia no menor tempo possível após uma falta. A redução dos tempos de interrupção tem efeito direto sobre os índices de continuidade do fornecimento de energia.

Os esforços das distribuidoras têm contribuído para a trajetória de queda dos indicadores apurados, ficando abaixo dos limites estabelecidos pela ANEEL. Entretanto, o valor pago pelas distribuidoras com as compensações para consumidores em virtude do descumprimento dos limites de duração e frequência de interrupções individuais chegaram a 1,093 bilhão em 2023 conforme o relatório de desempenho das distribuidoras na continuidade do fornecimento de energia de 2024, um aumento de 41% em relação à 2022, quando o valor total de compensações foi de 773 milhões (ANEEL, 2024).

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e implantação da plataforma ADA\_USP para localização de faltas e simulação de manobras baseada em inteligência artificial com potencial para contribuir na melhoria da qualidade do fornecimento de energia, dos indicadores de continuidade e diminuição dos gastos



das distribuidoras com compensações aos consumidores. Na descrição das principais funções desempenhadas pelos módulos procurou-se apresentar as contribuições e inovações para obtenção de uma ferramenta com real potencial para utilização em tempo real nos centros de operação das distribuidoras. Destaca-se a efetividade da aplicação dos algoritmos de inteligência artificial, da utilização do OpenDSS como motor de cálculo para fluxo de potência curto-circuito e os dashboards desenvolvidos em Power BI. Tal desempenho permitiu a aplicação do simulador de manobras para toda a área de concessão, totalizando cerca de 70 subestações da EDP SP e cerca de 95 subestações da EDP ES. Por fim, a aplicação em ambiente de produção durante o ano de 2024 resultou em cerca de 24,3 mil Localizações de faltas automáticas (somando permanentes e temporárias) e 770 simulações de manobra considerando toda a área de concessão do grupo EDP.

## 4. Referências bibliográficas

- MORAIS, R. F. Metodologia para planejamento da distribuição de energia elétrica através da aplicação de técnicas de análise de dados e inteligência de negócios. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 100. 2020.
- PEREIRA, D. S.; ALMEIDA, C. F. M.; ROSA, L. H. L.; KAGAN, N.; DOMINICE, A. "An Experience Of Locating High-Impedance Faults Through Smart Meters' Alarms In Power Distribution Networks," *CIREN 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Online Conference, 2021, pp. 1727-1731.
- 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
- MOSBAH, M.; ARIF, S.; MOHAMMEDI R. D.; HELLAL, A. Optimum Dynamic Distribution Network Reconfiguration using Minimum Spanning Tree Algorithm. The 5th International Conference on Electrical Engineering, Boumerdes, 2017.
- CHAVALI, S.; PAHWA, A.; DAS, S. A genetic algorithm approach for optimal distribution feeder restoration during cold load pickup. In Proc. of the 2002 Congress on Evolutionary Computation (CEC2002), 2002. pp. 1816-1819.
- WATANABE, I.; NODU, M. A. "Genetic Algorithm for Optimizing Switching Sequence of Service Restoration in Distribution Systems". Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 04TH8753), Portland, 2004.
- 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
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2024). Compensações pela violação dos indicadores individuais de continuidade (DIC, FIC, DMIC e DICRI). Disponível em: < <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/indicadoresDistribuicao/compensacoesViolacaoIndicadoresIndividuaisContinuidade>>. Acesso em: novembro/2024.