



Automatização do Processo de Identificação de Evolução de Curto-Circuito: Uma Solução Data-Driven

Tema: Qualidade de Energia

Autores: Eduardo Santana Santos (eduardo.santos@energisa.com.br), Sheila Lúcia Menezes Barbosa de Souza (sheila.menezes@energisa.com.br), Robson Lúcio de Oliveira Vieira (rlucio.vieira@energisa.com.br) e Marcos Vinícius Santana Campos (marcosvinicius.campos@energisa.com.br)

Co-Autores:

Empresa: Energisa Sergipe - Distribuidora de Energisa SA

Resumo

Este trabalho aborda como uma cultura orientada por dados (*data-driven*) na distribuição de energia elétrica pode impulsionar a qualidade do serviço. Onde, o foco está na automatização do processo de identificação de evolução de curto-circuito na Energisa Sergipe, priorizando a manutenção em pontos críticos da rede de distribuição por meio de um Motor Priorizador parametrizado com pesos de acordo com as estratégias do negócio. O texto destaca, portanto, o impacto dessas evoluções, especialmente nas transferências entre zonas de proteção. O projeto utilizou transformação digital e tecnologias como ferramentas de ETL (*Extract, Transform, Load*) para coleta, processamento e normalização de dados brutos, empregando Python e Power BI. Esse refinamento proporciona uma análise estruturada e suporte à tomada de decisões baseadas em dados.

Ademais, o trabalho explora os impactos da evolução de curto-circuito na rede de distribuição, e nos indicadores de qualidade do serviço, onde através de uma análise exploratória dos dados foi identificado um prejuízo de 0,79h de DEC em 2023 e 2024, onde, destes 59% (0,47h) foi ocasionado devido mudança entre zonas de proteção, onde o curto-circuito evoluiu de uma com menor abrangência de clientes, para um de maior. Outrossim, foi destaque o percentual de 57% pago em Compensação por Descontinuidade devido a evolução de curto-circuito com abrangência na primeira zona de proteção, entre a saída da subestação, até o primeiro equipamento de proteção da distribuição.

Por fim, é perceptível como a melhoria no processo através da utilização de ferramentas de Inteligência de Negócio (BI) e *Analytics* impactaram numa redução de 44% de DEC, 48% de FEC, e 67% em Compensação por Descontinuidade, gerados por evolução de curto-circuito, no último semestre de 2023 comparado ao mesmo período de 2024, além da sinergia entre as áreas de operação, proteção e manutenção na Energisa Sergipe. Trazendo impactos positivos sobre o projeto e a facilidade de escalabilidade em outras concessionárias do setor elétrico através da metodologia aplicada. Fornecendo, então, um melhor fornecimento de energia elétrica, através de uma qualidade do serviço adequada para suprir as necessidades daqueles que dependem dos nossos serviços para rotina e trabalho, os nossos clientes.

1. Introdução

Segundo Moses (2021, p. 16), há décadas, as organizações enfrentam problemas relacionados à baixa qualidade de dados e a dados não confiáveis, quer sejam causados por relatórios precários, informações falsas ou erros técnicos. Por sua vez, os dados são o novo petróleo, e como este, precisam passar por etapas de refinamento, através da descoberta de fontes relevantes e seguras, coletados através de ferramentas de ETL (*Extract, Transform e Load*), processados de sua forma bruta, normalizado, e estruturado para posterior armazenamento e refinamento visando análise e geração de valor para o negócio.

Ademais, o avanço da tecnologia da informação no setor de distribuição de energia elétrica, tem transformado a maneira como dados complexos são analisados permitindo impulsionar a cultura *data-driven*. Esta que permeia decisões voltada a dados, na otimização de recursos e manutenções assertivas dos nossos ativos nas distribuidoras, sendo, então, crucial para superar os desafios relacionados à operação e manutenção das redes de distribuição. Um dos desafios inerentes às redes de distribuição se trata do balanço de condutores devido aos efeitos eletromecânicos causados na rede quando por ela percorre uma corrente de curto-circuito.

Essa anomalia na rede, ao atravessar condutores paralelos em redes de distribuição, induz forças eletromagnéticas que causam movimentos significativos nos condutores. Ademais, esses fenômenos, conhecidos como balanço dos condutores ou *swing-out* (HECK, 2017), são agravados pela crescente integração de novas unidades geradoras no sistema, o que eleva os níveis de corrente de curto-circuito.

A figura 1 (CIGRÉ-105, 1996), abaixo, ilustra a dinâmica dos condutores durante e após o curto-circuito, destacando os fenômenos de balanço inicial e retração a seguir:

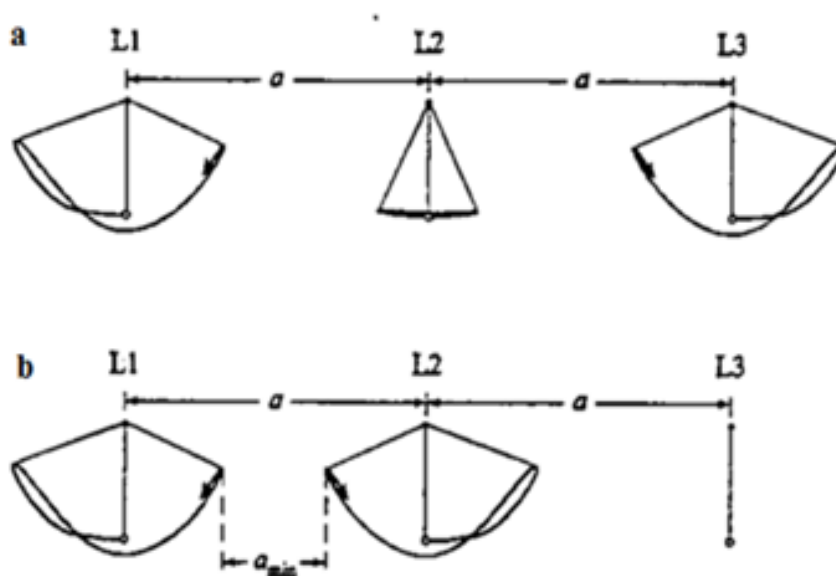


Figura 1 - Movimento de um condutor durante e após um curto-circuito, (a) trifásico e (b) bifásico

Figura 1 (a): Movimento em um curto-circuito trifásico

L1 e L3 (condutores externos): Quando ocorre um curto-circuito trifásico, os condutores externos são repelidos "para fora" devido às forças eletromagnéticas geradas pela corrente. Essas forças são de repulsão, pois as correntes nos condutores externos fluem em sentidos opostos.

- L2 (condutor central): O condutor central permanece quase estacionário, pois as forças que atuam sobre ele são equilibradas (forças bidirecionais e simétricas).

Essa configuração reduz, portanto, a movimentação de L2 em comparação aos condutores externos.

Figura 1 (b): Movimento em um curto-circuito bifásico

- L1 e L2 (condutores em falta): Em um curto-circuito bifásico, os dois condutores sob falta se repelem inicialmente, afastando-se "para fora".
- L3 (condutor não em falta): Este condutor não sofre as forças eletromagnéticas diretamente associadas ao curto-circuito, mantendo-se estático.
- Aproximação mínima (a_{\min}): Após o fluxo inicial da corrente, as forças gravitacionais e a perda de energia cinética fazem os condutores retornarem à posição original. Nesse movimento de "volta", a distância mínima entre os condutores (a_{\min}) é reduzida, aumentando o risco de contato entre fases.

No caso do curto bifásico, o risco de aproximação excessiva entre os condutores (que pode causar contato entre fases) é mais significativo devido a aproximação mínima. Já no trifásico, os condutores externos enfrentam maiores forças de repulsão.

Com isso, a aproximação excessiva entre condutores durante o curto-circuito pode resultar na propagação do defeito para outras partes do sistema, ampliando a área afetada e comprometendo a confiabilidade da rede elétrica. Na figura 2 é apresentado um caso em que o curto-circuito de 2.000 A bifásico inicia na zona 2 (T2), cujo religador RD ao abrir desenergiza 8.950 clientes, e após o balanço dos condutores o curto-circuito é transferido para zona 1 (T1) com um valor de 4.194 A e afetando 12.157 clientes ao gerar a abertura do religador de saída do alimentador, RL.



Figura 2 - Transferência de curto-circuito para a zona 1

A transferência do curto-circuito não apenas agrava o impacto inicial, mas também eleva indicadores críticos de qualidade, como o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e Compensação por Descontinuidade, com a violação dos indicadores de DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão), FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão) ou DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou Por Ponto de Conexão), influenciando diretamente na percepção de qualidade do fornecimento por parte dos consumidores (ANEEL, Prodist Módulo 8, 2021).

Urge, portanto, a necessidade de automatizar e fortalecer a análise dos dados das evoluções de curto-circuito emitidos pelos relés, que são coletados de forma bruta e desestruturada. O refinamento dessas infor-

mações permite identificar pontos vulneráveis na rede, otimizando recursos em manutenções preventivas e garantindo um serviço de maior qualidade aos clientes. Para enfrentar esses desafios, torna-se essencial adotar tecnologias avançadas de análise de dados, capazes de automatizar a identificação de fragilidades e direcionar a instalação de separador de fases, projetados para reduzir o risco de aproximação excessiva entre condutores durante falhas. Assim, asseguram-se maior segurança, estabilidade e sustentabilidade ao sistema elétrico.

2. Desenvolvimento

3.1 Metodologia

A transferência de curtos-circuitos entre zonas de proteção, causada pelo balanço dos condutores gerava dúvidas sobre falhas na atuação dos equipamentos de proteção, especialmente em casos em que o curto-circuito se deslocava entre essas zonas. Todavia, apesar de o sistema de proteção atuar corretamente, a evolução do curto-circuito levava à propagação do defeito. Com isto, a automatização do processo de identificação de evolução de curto-circuito, faz-se essencial para direcionar a manutenção para pontos críticos com vãos longos ou desnivelados na rede de distribuição exigindo inspeções em campo e a instalação de separadores de fase.

Ademais, antes o processo era manual e limitado (figura 3) sendo possível identificar apenas alguns pontos críticos da rede e incidências de falhas propagadas, resultando em riscos elevados para a confiabilidade do sistema e no aumento de indicadores da qualidade do serviço.

Para superar, então, essas limitações, foi implementado um processo automatizado de identificação de evolução de curto-circuito, através de um novo fluxo operacional, com a construção de um *pipeline* para refinamento dos dados sistêmicos, e a criação de um Motor Priorizador para indicar os pontos mais críticos para instalação em campo de separadores de fase.

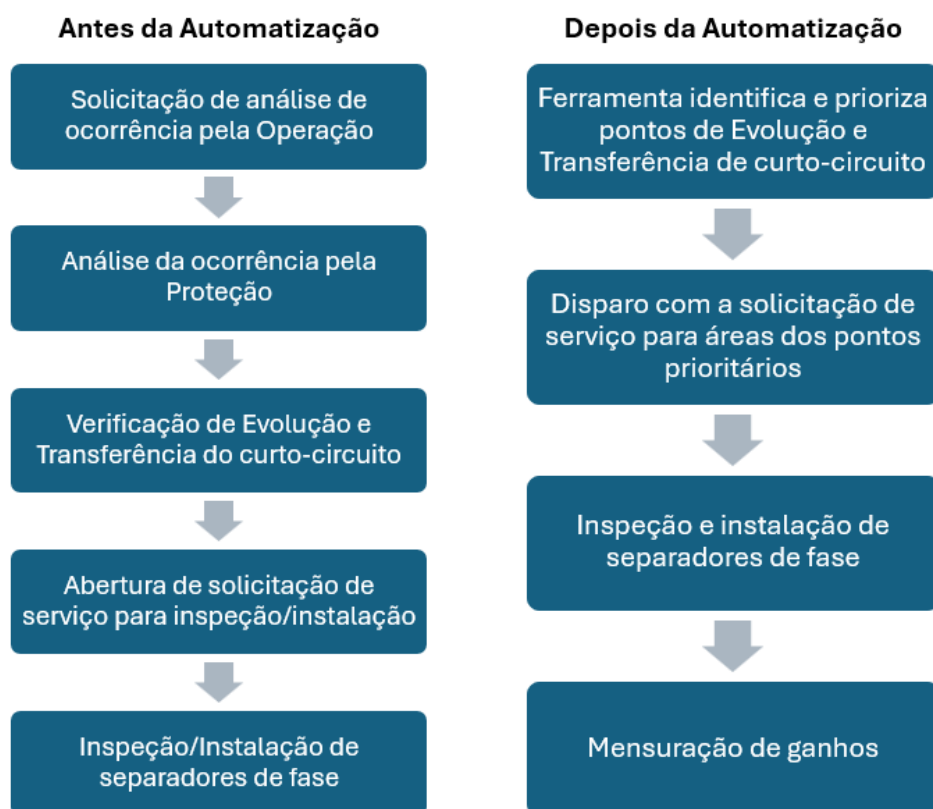


Figura 3 - Fluxo antes e depois da automatização do processo

3.1.1 Ajustes preliminares

Para automatizar o processo, a primeira etapa do trabalho envolveu a revisão e confecção dos ajustes de localização de falta nos equipamentos de proteção localizados na saída dos alimentadores (tabela 1). Esses ajustes foram implementados em campo, garantindo maior precisão nos dados gerados.

Tabela 1 - Amostra das 155 solicitações de mudança de ajuste de localização de falta

Código da Solicitação	Ano	Descrição	DataOcorrência
ESE-ASPO-AT 00043/2022	2022	@Marcos, boa tarde. Solicitamos por gentileza, alteração dos parâmetros de localização de falta do Z1F6 de CRP para:	21/10/2022 16:25:44
ESE-ASPO-AT 00017/2023	2023	$Z1(mag) = 8.28$ Por gentileza, alterar ajustes de localização de falta listados a seguir (ATL-W6): $Z1MAG = 3.27$ $Z1ANG = 35.33$ $Z0MAG = 8.95$ $Z0ANG = 53.57$ $LL = 6.12$	25/01/2023 17:41:34
ESE-ASPO-AT 00043/2023	2023	Por gentileza, alterar ajustes de localização de falta listados a seguir (CTN-N4): $Z1MAG = 1.98$ $Z1ANG = 57.92$ $Z0MAG = 5.79$ $Z0ANG = 64.95$ $LL = 4.06$	01/02/2023 13:15:50
ESE-ASPO-AT 00122/2023	2023	Por gentileza, alterar ajustes de localização de falta listados a seguir (RCH-F6): $Z1MAG = 7.42$ $Z1ANG = 24.75$ $Z0MAG = 18.20$ $Z0ANG = 47.38$ $LL = 15.85$	23/02/2023 12:43:22
ESE-ASPO-AT 00042/2023	2023	Por gentileza, alterar ajustes de localização de falta listados a seguir (CTN-N3): $Z1MAG = 0.61$ $Z1ANG = 56.81$ $Z0MAG = 1.37$ $Z0ANG = 63.50$ $LL = 1.33$	01/02/2023 13:14:33
ESE-ASPO-AT 00123/2023	2023	Por gentileza, alterar ajustes de localização de falta listados a seguir (SLG-F1): $Z1MAG = 2.90$ $Z1ANG = 26.79$ $Z0MAG = 8.43$ $Z0ANG = 48.97$ $LL = 9.08$	23/02/2023 12:45:12

Onde destacamos os principais: identificação do equipamento religador, subestação de referência, data e hora do evento, o tipo de curto-circuito (bifásico ou trifásico), distância estimada do evento e o valor da corrente de curto-circuito. Onde, curtos-circuitos monofásicos foram desconsiderados devido à alta impedância de contato, que inviabilizava a análise de evolução.

3.1.2 Extração de Dados

Foi criado, então, um agendamento para extrações diárias dos registros do relé de saída de cada alimentador da concessão, através do software 5010 do fabricante Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), numa máquina da rede operativa. Com isso, exportamos os dados para a rede corporativa, através de uma *cloud*, armazenamento em nuvem interna, com usuário e senha, esta que expira periodicamente, respeitando os protocolos de segurança da informação. Todavia, como os dados são salvos como documento de texto (.txt), de forma desestruturada, sem colunas e linhas ou separado por vírgulas, se torna dispendioso para análises qualitativas e ingestão deles em um modelo de análise de dados e BI (*Business Intelligence*), necessitando, então, tratá-lo para maior legibilidade.

3.1.3 Limpeza e Transformação dos Dados

Por sua vez, a limpeza de dados é uma etapa crucial no processo de preparação dos dados. Ela é essencial para garantir a qualidade e a integridade dos dados extraídos dos relés, identificando e corrigindo problemas antes de avançar para as próximas etapas do projeto. Onde, se faz necessário executar várias etapas: estruturar os dados em formato tabular, em que cada coluna pode ser de um tipo diferente (texto, numérico, data ou outro tipo); designar o alimentador corresponde a cada registro; converter o tipo de dado para cada coluna corretamente; remover duplicadas e salvar os dados em formato de planilha, onde utilizamos o “.xlsx” do Excel.

Todavia, executá-las manualmente é inviável, principalmente pelo desafio que os dados extraídos são oriundos de um modelo de relé antigo, no qual, o tipo de data é salva no formato americano (mm/dd/aaaa), sem possibilidade de alteração, para o formato brasileiro (dd/mm/aaaa) direto da fonte. Para solucionar, então, utilizamos *scripts* em Python (figura 4) este que é uma linguagem de programação de alto nível, o qual é mais fácil de ser codificada pelo usuário, porém, mais lenta de ser processada pelo computador. Contudo, como o pré-processamento dos registros dos relés são realizados diariamente com uma massa de dados pequena, a lentidão não é relevante.

Ademais, o Python possui diversas bibliotecas que impulsionam a execução dos scripts e trazem maior facilidade para o usuário, dessa forma, trazemos um destaque especial para o Pandas, esta biblioteca que segundo seu criador Wes McKinney, afirma em seu livro “Python para Análise de Dados”, que fornece estruturas de dados e funções de alto nível projetadas para tornar intuitivo e flexível o trabalho com dados estruturados ou tabulares, e que desde seu surgimento em 2010, ajudou a transformar o Python em um ambiente de análise de dados poderoso e produtivo, o qual para este projeto utilizamos de um objeto primordial do Pandas, o *DataFrame*, uma estrutura de dados tabular baseada em colunas com rótulos tanto de linhas quanto de colunas.

De forma adicional ao Pandas, utilizamos técnicas de Programação Orientada a Objeto (POO) para encapsulamento, ou seja, reaproveitamento de código, uma vez que várias etapas são repetidas para cada linha dos registros de cada relé, como a conversão da coluna data para o formato brasileiro, otimizando então o código e deixando-o mais legível e leve. E por fim, utilizamos o Python para compilar todos os registros, remover duplicadas e salvá-lo no diretório final para ser analisado posteriormente e criado as primeiras visualizações. Como amostra do código segue abaixo partes primordiais.


```

ETL_RELE_SEL_5010.py X
C:\Users> ess63 > OneDrive - Energisa > Python > ETL_RELE_SEL_5010.py > ...
51 def corrigirData(data = ""):
52     return dataCorrigida
53
54 def verificar_datas_no_formato_americano(dataExtracao, dataCriacao):
55     """Verifica se as datas estão no formato DD/MM/YYYY e se o mês é divergente."""
56     try:
57         # Extrai o mês das datas (posição 3 e 4)
58         mes_extracao = dataExtracao[3:5]
59         mes_criacao = dataCriacao[3:5]
60
61         # Compara os meses das duas datas
62         if mes_extracao != mes_criacao:
63             return True # Se os meses forem divergentes, retorna True
64         else:
65             return False # Se os meses coincidirem, retorna False
66     except IndexError as e:
67         return False # Se houver um erro na extração das datas, retorna False
68
69 def corrigir_data(data_str, formato_americano):
70     """Corrige a data para o formato brasileiro (DD/MM/YYYY) caso seja americana."""
71     try:
72         if formato_americano:
73             try:
74                 # Tenta converter de MM/DD/YYYY para DD/MM/YYYY
75                 data = datetime.strptime(data_str, "%m/%d/%Y")
76             except ValueError:
77                 # Se falhar, tenta converter de MM/DD/YY para DD/MM/YYYY
78                 data = datetime.strptime(data_str, "%m/%d/%y")
79             else:
80                 try:
81                     # Tenta validar como DD/MM/YYYY
82                     data = datetime.strptime(data_str, "%d/%m/%Y")
83                 except ValueError:
84                     # Se falhar, tenta validar como DD/MM/YY
85                     data = datetime.strptime(data_str, "%d/%m/%y")
86                 return data.strftime("%d/%m/%Y")
87     except ValueError:
88         print(f"Erro ao corrigir a data: {data_str}")
89         return ""
90
91

```

Figura 4 – Amostragem do código do Python com as funções de correção da data no formato americano (mm/dd/yyyy) para o brasileiro (dd/mm/yyyy)

3.1.4 Processamento e Enriquecimento dos Dados

Após limpar os dados e tê-los de forma estruturada, se faz necessário processá-los para a construção de um conjunto de dados robusto, e enriquecê-lo para que seja possível identificar quais são os pontos de maior fragilidade na nossa rede de distribuição, através dos dados fornecidos pelos Python. Para isso, no mercado existem diversas ferramentas de BI e análise de dados, porém, utilizamos em nosso projeto o Power BI, o qual impulsionou a Microsoft, sua dona, se tornar pelo décimo sétimo ano consecutivo a ferramenta líder no Quadrante Mágico do Gartner (empresa renomada de consultoria) de 2024 para Plataformas de Análise e *Business Intelligence* (BI), vide figura 5, se consolidando como a empresa que dita as regras nesse segmento, por ter a tecnologia mais avançada e melhor visão de mercado.



Figura 5 - Quadrante Mágico para Plataformas de Analytics e Business Intelligence

Ademais, após termos os dados limpos e estruturados, integramos eles ao Power BI como a tabela fato principal, para que finalizássemos algumas alterações no Power Query como conversão do tipo de dado de cada coluna, adição de algumas colunas adicionais para maior legibilidade, e em fim desenvolver métricas para automatizar o processo de identificação de evolução de curto-circuito, relacionando com outros conjuntos de dados, tabelas dimensões, no formato *snowflake*, vide figura 6, modelo este caracterizado pela normalização das tabelas dimensionais, estas que são subdivididos em tabelas menores, eliminando redundâncias e garantindo maior consistência dos dados. O *snowflake* é ideal para cenários onde a consistência dos dados e a eficiência no uso do espaço são mais importantes do que o desempenho de consultas rápidas, sendo o caso do nosso projeto onde o maior processamento das informações está inserido na tabela fato dos dados do relé, tornando eficiente as consultas.

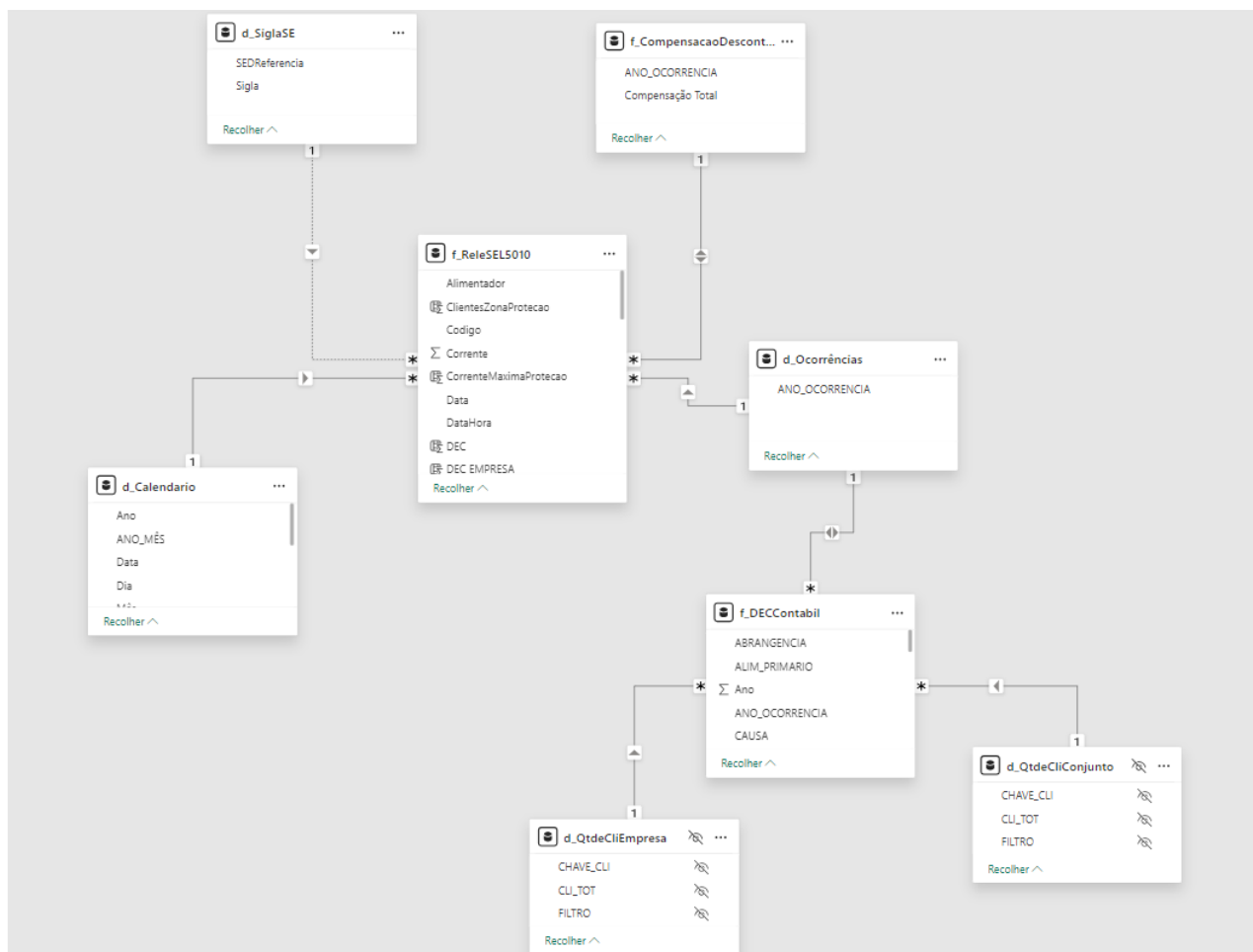


Figura 6 - Modelo dimensional snowflake do projeto

Para construção da métrica mais importante do projeto, a qual indica se o evento registrado pelo relé foi uma evolução de curto-circuito, uma vez as colunas já convertidas para o tipo de dado correto da tabela fato dos eventos do relé, vide tabela 2 abaixo, abordamos abaixo os critérios, com a representação do código no DAX do Power BI, respectivamente.

Tabela 2 – Dicionário dos dados

Coluna	Tipo de Dado	Descrição
ID DJ	Texto	Código do alimentador e a subestação de referência.
Codigo	Texto	Código do alimentador.
SEDReferencia	Texto	Subestação
ModeloRele	Texto	Modelo do relé
Data	Date	Data do evento
Hora	Long Time	Hora do evento
Evento	Texto	Tipo do evento (monofásico, bifásico ou trifásico)
Distancia	Decimal	Distância do evento da subestação
Corrente	Inteiro	Valor da corrente de curto-circuito em A (ampères).
DataHora	Date Time	Data e hora do evento

1) Características do Primeiro Evento:

- Identifica-se o primeiro evento registrado para uma mesma data e dispositivo;
- São analisados três parâmetros principais: a hora do evento, o tipo do evento (monofásico, bifásico ou trifásico) e a corrente associada;

```

1 EvolucaoCurto =
2 //Identificação das características do primeiro evento.
3 VAR HoraPrimeiroEvento =
4 CALCULATE(
5     FIRSTNONBLANK('f_ReleSEL5010'[Hora],1),
6     FILTER(
7         'f_ReleSEL5010',
8         EARLIER('f_ReleSEL5010'[Data]) == [Data] &&
9         EARLIER('f_ReleSEL5010'[ID DJ]) == [ID DJ] &&
10        SEARCH("G", [Evento], 1, 0) == 0
11    )
12 )
13
14 VAR PrimeiroEvento =
15 CALCULATE(
16     FIRSTNONBLANK('f_ReleSEL5010'[Evento],1),
17     FILTER(
18         'f_ReleSEL5010',
19         EARLIER('f_ReleSEL5010'[Data]) == [Data] &&
20         EARLIER('f_ReleSEL5010'[ID DJ]) == [ID DJ] &&
21         'f_ReleSEL5010'[Hora] == HoraPrimeiroEvento
22     )
23 )
24
25 VAR CorrentePrimeiroEvento =
26 CALCULATE(
27     FIRSTNONBLANK('f_ReleSEL5010'[Corrente],1),
28     FILTER(
29         'f_ReleSEL5010',
30         EARLIER('f_ReleSEL5010'[Data]) == [Data] &&
31         EARLIER('f_ReleSEL5010'[ID DJ]) == [ID DJ] &&
32         'f_ReleSEL5010'[Hora] == HoraPrimeiroEvento
33     )
34 )

```

Figura 7 – DAX da Identificação das características do primeiro evento

- Determina-se se o evento envolveu curto para terra, operação de *trip* ou erro devido problema de comunicação do equipamento.

```

36 //Análise do tipo do primeiro evento.
37 VAR CurtoPraTerraPE =
38 SEARCH("G", PrimeiroEvento, 1, 0) > 0
39
40 VAR TripouPE =
41 SEARCH("T", PrimeiroEvento, 1, 0) > 0
42
43 VAR PrimeiroEventoMono =
44 (LEN(PrimeiroEvento) < 3 && CurtoPraTerraPE) || (LEN(PrimeiroEvento) = 3 && CurtoPraTerraPE && TripouPE)
45
46 VAR PrimeiroEventoErro =
47 SEARCH("ER", PrimeiroEvento, 1, 0) > 0

```

Figura 8 – DAX da avaliação de curto para terra, trip, evento mono ou erro

2) Classificação do Tipo do Primeiro Evento:

- O tipo do evento é classificado com base na combinação de suas características;
- Eventos monofásicos, bifásicos e trifásicos são diferenciados por padrões específicos no registro;
- Erros são identificados e excluídos da evolução.

```

49 VAR TipoPrimeiroEvento =
50 SWITCH(PrimeiroEventoMono == FALSE(),
51     (LEN(PrimeiroEvento) == 2 && PrimeiroEventoErro == FALSE()), 2, //curto bifásico;
52     (LEN(PrimeiroEvento) = 3 && TripouPE), 2, //curto bifásico com trip;
53     (LEN(PrimeiroEvento) == 3 && CurtoPraTerraPE), 2.5, //curto bifásico para terra;
54     (LEN(PrimeiroEvento) == 4 && CurtoPraTerraPE && TripouPE), 2.5, //curto bifásico para terra com trip;
55     (LEN(PrimeiroEvento) == 3 && CurtoPraTerraPE == FALSE() && TripouPE == FALSE()), 3, //curto trifásico;
56     (LEN(PrimeiroEvento) = 4 && CurtoPraTerraPE), 3, //curto trifásico para terra;
57     (LEN(PrimeiroEvento) = 4 && TripouPE), 3, //curto trifásico com trip;
58     (LEN(PrimeiroEvento) == 5 && CurtoPraTerraPE && TripouPE), 3 //curto trifásico para terra com trip;
59 )

```

Figura 9 – DAX da classificação do tipo do primeiro evento

3) Análise do Evento Posterior:

- Eventos subsequentes ao primeiro são analisados para determinar se ocorreram alterações no tipo ou intensidade do curto;
- São verificados novamente os parâmetros: tipo do evento, presença de curto para terra, operação de *trip* e ocorrência de erros.

```

74 VAR TipoEvento =
75 SWITCH(EventoMonoPosterior == FALSE(),
76     (LEN([Evento]) == 2 && Erro == FALSE()), 2, //curto bifásico;
77     (LEN([Evento]) = 3 && Tripou), 2, //curto bifásico com trip;
78     (LEN([Evento]) == 3 && CurtoPraTerra), 2, //curto bifásico para terra;
79     (LEN([Evento]) == 4 && CurtoPraTerra && Tripou), 2, //curto bifásico para terra com trip;
80     (LEN([Evento]) == 3 && CurtoPraTerra == FALSE() && Tripou == FALSE()), 3, //curto trifásico;
81     (LEN([Evento]) = 4 && CurtoPraTerra), 3, //curto trifásico para terra;
82     (LEN([Evento]) = 4 && Tripou), 3, //curto trifásico com trip;
83     (LEN([Evento]) == 5 && CurtoPraTerra && Tripou), 3 //curto trifásico para terra com trip;
84 )

```

Figura 10 – DAX da classificação do tipo dos eventos posteriores

4) Comparação entre os Eventos:

- A corrente elétrica é comparada entre o primeiro evento e os eventos subsequentes;
- Foi estabelecida a premissa de que um aumento de 300 A entre correntes de curto-circuito bifásico e trifásico indica uma evolução do defeito. Considerando que a corrente de curto-circuito bifásico corresponde a aproximadamente 86,6% da corrente trifásica, utiliza-se esse fator como referência para evitar que um curto trifásico seja erroneamente interpretado como uma evolução de um curto bifásico, quando, na verdade, trata-se do mesmo evento.

```

89 //Identificação da evolução de curto-circuito.
90 VAR CorrenteMaior =
91 SWITCH(TRUE(),
92     Validacao == TRUE() && (TipoPrimeiroEvento == 2 && TipoEvento == 3) && [Hora] <> HoraPrimeiroEvento && ((([Corrente] - CorrentePrimeiroEvento/0.86) > 300), TRUE(),
93     Validacao == TRUE() && (TipoPrimeiroEvento == 2 && TipoEvento == 3) && [Hora] <> HoraPrimeiroEvento && ((([Corrente] - CorrentePrimeiroEvento/0.86) < 300), FALSE(),
94     Validacao == TRUE() && (TipoPrimeiroEvento == 3 && TipoEvento == 2) && [Hora] <> HoraPrimeiroEvento && ((([Corrente] - CorrentePrimeiroEvento*0.86) > 300), TRUE(),
95     Validacao == TRUE() && (TipoPrimeiroEvento == 3 && TipoEvento == 2) && [Hora] <> HoraPrimeiroEvento && ((([Corrente] - CorrentePrimeiroEvento*0.86) < 300), FALSE(),
96     Validacao == TRUE() && [Hora] <> HoraPrimeiroEvento && ((([Corrente] - CorrentePrimeiroEvento) > 300), TRUE()
97 )

```

Figura 11 – DAX da identificação da evolução de curto-circuito

5) Resultado:

- A evolução é considerada detectada se houver um aumento de 300 A na corrente elétrica e alterações no tipo do curto;

- Eventos classificados como erros não são considerados na análise.

```
99 RETURN
100 IF(
101     NOT(ISBLANK(PrimeiroEvento)) &&
102     PrimeiroEventoMono == FALSE() &&
103     EventoMonoPosterior == FALSE() &&
104     PrimeiroEventoErro == FALSE() &&
105     CorrenteMaior == TRUE(), 1, 0)
```

Figura 12 – DAX do resultado da evolução de curto-circuito

3.1.5 Análise Exploratória de Dados

Após processamento dos dados e criação da métrica principal acima e considerando uma amostragem de dados de 2023 e 2024, a análise exploratória revelou que dos 33 mil registros de curto-circuito processados, 3%, cerca de 1.267 eventos, tiveram evolução de curto-circuito, e representam 50% (0,50h) do DEC, e 56% (0,53h) no FEC gerados no T1, e 17% (0,28h) do DEC e 17% (0,21h) do FEC no T2 para esse período.

Outrossim, ao aprofundarmos nos dados, identificamos que do total do DEC realizado devido evolução de curto-circuito: 0,79h (somando o T1 e T2), cerca de 43% (0,34h) deste correspondiam à mudança de zonas de proteção, saindo do T2 para o T1, e 16% (0,13h) do T2 de menor abrangência de clientes, para um T2 de maior abrangência de clientes. Ou seja, as evoluções do T2 para o T1 são muito mais críticas e representam maior parte do DEC ocasionado por evolução de curto-circuito.

Quando tratamos de desembolso financeiro, em 2024, temos que a compensação paga aos clientes, devido descontinuidade dos indicadores de qualidade do serviço como o DIC, FIC ou DMIC, por causa das evoluções de curto-circuito, representam 57%, cerca de R\$43.250, de toda compensação paga no T1.

Percebemos, então, que a evolução de curto-circuito é crítica ao ponto de prejudicar a qualidade do serviço no fornecimento dos nossos clientes, violando indicadores técnicos, e gerando um desembolso financeiro para a distribuidora, estes que poderiam ser evitados ou mitigados com a instalação de separadores de fase.

3.1.6 Visualização dos Dados

Segundo Nancy Duarte (2021, p. 23), decisões estratégicas são tomadas pela sintetização de informações de diversas fontes para determinar o futuro de uma organização. Algumas decisões estratégicas podem mudar todo o curso de uma empresa, de um setor ou do mundo. Com isso, se faz necessário dentro das empresas impulsionar uma cultura *data-driven*, para a tomada de decisões mais aderentes às estratégias do negócio.

Dessa maneira, utilizamos a abordagem de um painel informativo denominado Identificador de Evolução de Curto-Circuito (IECC), vide figura 13, compartilhado semanalmente com as equipes responsáveis em tracionar as ações geradoras do projeto. Onde, conseguimos dividir em dois tipos de visualização:

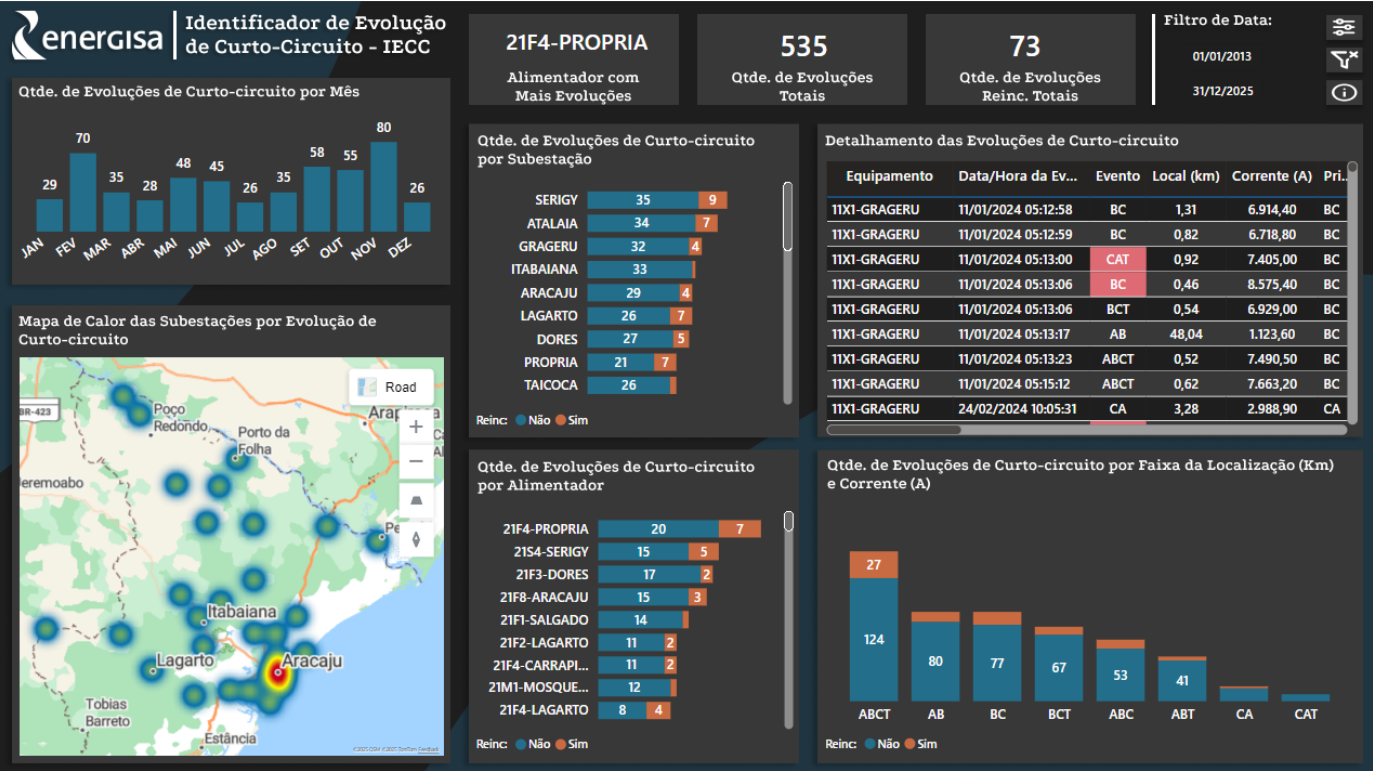


Figura 13 – Identificador de Evolução de Curto-Circuito – IECC, filtrado em 2024

1) **Operacional:** Desempenhos diários, trimestrais das evoluções de curto-circuito.

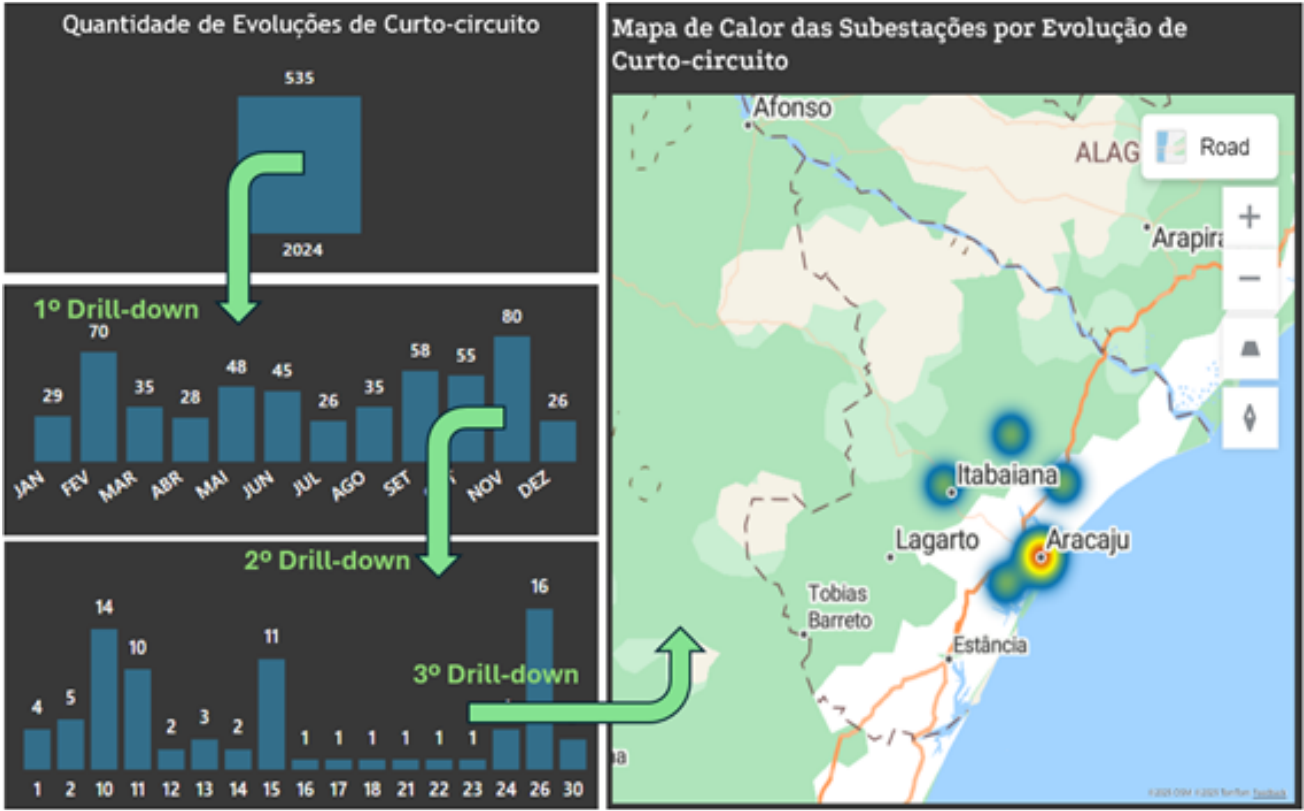


Figura 14 – Drill-down no gráfico de quantidade de evoluções de curto circuito

2) **Estratégico:** Principais circuitos e zonas de evolução de curto-circuito para priorização da manutenção.

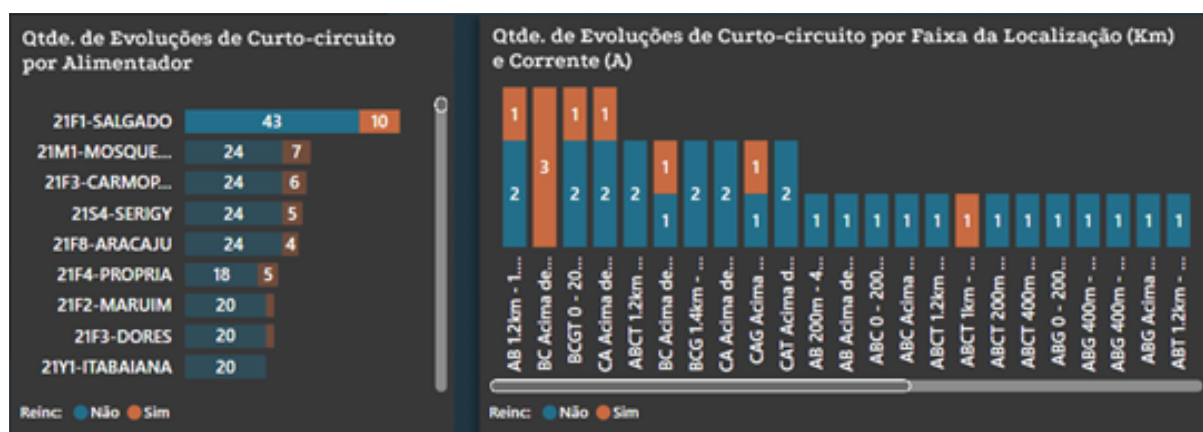


Figura 15 – Gráficos de quantidade de evoluções de curto-circuito por alimentador e por faixa de localização (Km) e Corrente (A)

3.1.7 Ações Geradas

A etapa final consistiu na automatização da comunicação com as equipes operacionais e da manutenção. Relatórios gerados pelo IECC foram enviados semanalmente por e-mail para as áreas de manutenção, proteção e pós-operação, acompanhados da abertura de solicitações de serviço para inspeção e instalação de separadores de fase nas regiões críticas.

3.2 Resultados

A análise de dados desempenha um papel central na metodologia do IECC. Por meio da criação de métricas e relacionamento com outras bases da qualidade do serviço, foi possível dar contexto aos dados, identificar maior quantidade de falhas que anteriormente passavam despercebidas, e priorizá-las para correção. Essa abordagem permitiu intervenções antecipadas, reduzindo significativamente os riscos de propagação de falhas.

Como resultado, a rede passou a contar com um monitoramento abrangente, mitigando riscos e melhorando a confiabilidade do sistema. Onde, reduzimos 44% (0,14h) de DEC, 48% (0,13h) de FEC, e 67% (R\$18.850) em Compensação por Descontinuidade quando comparamos o último semestre de 2023 com o mesmo período de 2024, gerados por evolução de curto-circuito.

3.2.1 Motor Priorizador

Além disso, construímos um Motor Priorizador, vide figura 16, para a melhor direcionamento dos recursos na instalação de separadores de fase nos pontos mais críticos de evolução de curto-circuito, priorizados com base em um sistema de pesos que considera fatores estratégicos para a qualidade do serviço. Os critérios incluem: Conjunto Crítico (4 pontos), que representa áreas de maior impacto no sistema; Recidência (3 pontos), indicando locais com falhas recorrentes; DEC (2 pontos) e FEC (1 ponto), que refletem indicadores de duração e frequência das interrupções; e Compensação por Descontinuidade (2 pontos), ligada a custos adicionais decorrentes das falhas. Essa abordagem visa não apenas corrigir problemas existentes, mas também direcionar recursos de forma prioritária, reduzindo o risco de novas ocorrências e garantindo maior estabilidade ao sistema elétrico.

Motor...	Equipamento	Data/Hora da Ev...	Evento	Local (km)	Corrente (A)	Reinc.
57.035,24	11X4-GRAGERU	23/05/2023 15:18:55	ABCT	1,63	5.770,60	Não
34.342,38	21Z8-URUBU	26/05/2024 06:18:49	ABCT	2,72	4.047,00	Sim
34.339,38	21Z8-URUBU	26/05/2024 06:18:49	BCG	2,97	4.456,00	Não
27.035,71	21F1-ARACAJU	24/04/2024 02:05:30	ABCT	1,64	6.687,60	Não
16.307,21	21Z2-URUBU	31/08/2023 11:21:58	ABC	1,77	5.206,90	Não
16.307,21	21Z2-URUBU	31/08/2023 11:21:58	ABCT	2,16	4.714,40	Não
10.118,88	21W6-ATALAIA	09/07/2023 23:07:51	BCGT	0,57	6.243,00	Não
10.003,69	21W1-ATALAIA	12/02/2023 10:03:30	ABT	1,08	4.831,00	Não

Figura 16 – Motor Priorizador indicando pontos mais críticos de evolução de curto-circuito

3.3 Discussão

3.3.1 Case Real de Aplicação

Um caso concreto de aplicação do projeto, foi no alimentador ATL-W2 da subestação Atalaia, em Aracaju, a capital sergipana, com altos índices de evolução de curto, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia dos clientes. Antes da implementação do IECC, a subestação enfrentava altos índices de evolução de curto-circuito, especialmente em regiões com vãos longos e desnivelados.

A figura 17 mostra separadores que foram instalados na saída do Alimentador ATL-W2, alimentador que historicamente apresenta evolução de curto-circuito, no total em 2024 instalamos 339 separadores em Atalaia W2, isso gerou uma redução de 50% nas evoluções de curto-circuito deste alimentador.



Figura 17 – Instalação de Separador de fase na Saída do Alimentador 21W2 de Atalaia

3. Conclusão

Tendo o cliente como centro, a qualidade do serviço foi impulsionada através da automatização do processo de identificação de evolução de curto-circuito, onde o IECC mapeou 1.267 locais vulneráveis na rede de distribuição. Em resposta, 4.263 separadores de fase foram instalados em diversos vãos críticos em 2024, reduzindo a abrangência das interrupções e melhorando significativamente os indicadores de qualidade do serviço, como DEC e FEC e Compensação por Descontinuidade. A implementação de separadores de fase de forma orientada contribuiu para minimizar a propagação de falhas, enquanto o mapeamento automatizado de locais vulneráveis ampliou a precisão e a agilidade das ações corretivas.

Esses avanços destacam o impacto direto da melhoria do processo na confiabilidade e eficiência do sistema elétrico, gerando benefícios técnicos e operacionais expressivos. Assim como, a integração entre equipes operacionais, proteção e manutenção, criando um fluxo contínuo de comunicação e ação. Essa sinergia aumentou a eficácia das intervenções e possibilitou uma gestão mais proativa e coordenada das redes de distribuição. Onde, a cultura *data-driven* foi determinante para otimizar recursos humanos, evidenciando como soluções tecnológicas podem melhorar não apenas os processos operacionais, mas também a gestão estratégica no setor.

A relevância do projeto vai além do cenário atual da Energisa Sergipe, uma vez que sua replicabilidade demonstra o potencial para ser aplicado em outras distribuidoras, atendendo às crescentes demandas por soluções escaláveis e sustentáveis. Sua metodologia baseada em dados e automação o posiciona como uma contribuição relevante e original ao setor, ampliando as possibilidades de inovação em redes de distribuição, e o principal, na melhoria contínua do fornecimento de energia aos nossos clientes.

4. Referências bibliográficas

ANEEL, Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist) - Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, 2021, p. 35. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 10 de dez. 2024.

Moses, Barr. *Fundamentos da qualidade de dados: guia prático para criar pipelines de dados confiáveis*. O'Reilly, 2021. p. 16.

HECK, Isabel Schreiner. *Cálculo de esforços em barramentos flexíveis causados por correntes de curto-circuito*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CIGRÉ-105 1996. The mechanical effects of short-circuit currents in open-air substations (Rigid and flexible bus-bars). Paris: CIGRÉ, technical brochure N°105. 2 volumes (180 paginas).

ESCOLA DNC. A importância da limpeza de dados para projetos de data science. Escola DNC, 2025. Disponível em: <https://www.escoladnc.com.br/blog/a-importancia-da-limpeza-de-dados-para-projetos-de-data-science/>. Acesso em: 2 jan. 2025.

Duarte, Nancy. *Data Story Explique Dados e Inspire Ações por Meio de Histórias*. Alta Books, 2021. p. 23.