

PROCEDIMENTO PARA MELHORIA DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NA DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DA IDENTIFICAÇÃO E CORREÇÃO DE VTCD

Gabriela de Rezende Lima¹; Rafael Correa Braga²; Rodrigo da Silva Cardoso³; Marcio Zamboti Fortes⁴; Henrique de Oliveira Henriques⁵; Giovani Zapparoli⁶

Resumo

A qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores finais é um dos desafios vivenciados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica. A rede de distribuição tem característica de ser interligada, portanto um distúrbio em um ponto qualquer dos seus alimentadores pode afetar a qualidade da energia elétrica em diversos outros pontos da rede. Desta forma, a busca por melhoria da confiabilidade do sistema de suprimento e da continuidade da energia elétrica entregue ao consumidor é incessante e está associada aos investimentos executados, seja no planejamento de novos projetos de desenvolvimento de rede, seja em atividades de manutenção. Considerando a importância da continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica, este artigo apresenta uma proposta de procedimentos de análise e correção de eventos de variação de tensão de curta duração provocados por defeitos na rede de distribuição de energia elétrica. O estudo analisa oscilografias das correntes elétricas medidas durante os eventos e simula em software a localização dos possíveis pontos de defeito, tendo como objetivo colaborar para que as ações de manutenção nos alimentadores de média tensão sejam mais assertivas e eficientes, o que contribui para a redução de custos e para a melhoria dos indicadores de qualidade do produto.

Palavras-chave: curto-circuito, qualidade de energia elétrica, distribuição de eletricidade.

Abstract

The power quality of electric energy supplied to end consumers is one of the challenges experienced by electric power distribution concessionaires (utilities). The distribution network has characteristic of being interconnected, so a disturbance/fault at one point any of its feeders can affect the power quality at various other points in the grid. Thus, the need for reliability improvement of the electric supply system and the continuity of electric power delivered to the consumer is unceasing and is associated with the investments executed, whether in the planning of new network development projects, whether in maintenance activities. Considering the importance of the continuity of the electricity supply service, this article presents a proposal for procedures to analyses and correction of short-term voltage variation events caused by failures in the electric distribution network system. The study analyzes oscillography of electrical currents measured during events and simulates by software to support possible defect points, aiming to collaborate for maintenance actions in medium voltage feeders are more effective and contributes to cost reduction and improvement of performance index.

Keywords: short circuit, power quality, electric power distribution.

¹ Engenheira Eletricista–UFF; e-mail: gabrielarezende@id.uff.br.

² Engenheiro Eletricista–UFF; e-mail: rafcb@hotmail.com.

³ Engenheiro Eletricista–UFF; pesquisador da Universidade Federal Fluminense-UFF; e-mail: rcardoso@id.uff.br.

⁴ Doutor em Engenharia Elétrica–USP; professor Associado da Universidade Federal Fluminense-UFF; e-mail: mzamboti@id.uff.br.

⁵ Doutor em Engenharia Elétrica–UFRJ; professor Titular da Universidade Federal Fluminense-UFF; e-mail: riquelh2o@globocom.

⁶ Engenheiro Eletricista–EFEI; coordenador de Planejamento de Redes Enel Brasil; e-mail: giovani.zapparoli@enel.com.

1 Introdução

Os sistemas de distribuição (SD) de energia elétrica são responsáveis por fornecer aos consumidores finais a energia recebida dos sistemas de transmissão e geração, e é justamente nesse sistema que a taxa de ocorrência de interrupções no fornecimento é mais elevada, isso devido às próprias características inerentes a uma rede de distribuição.

Em SDs, as variações de tensão de curta duração (VTCD), caracterizadas por afundamentos e/ou elevações de tensão durante um determinado período, podem afetar vários consumidores, causando grandes prejuízos em indústrias e comércios, visto que existem diversos equipamentos sensíveis a estes fenômenos. Tais prejuízos estão associados à perda de produção, cessão de serviços e avaria de produtos e equipamentos. Em SD, VTCD e suas causas podem ter diversas origens, como chaveamento de cargas pesadas, manobras em alimentadores e defeitos na rede.

Uma das principais causas de VTCD em SD está associada ao curto-circuito, que tem como consequência variações bruscas de tensão e desligamentos provocados pelos sistemas de proteção. Os defeitos em redes de distribuição aéreas estão comumente associados a falhas em componentes da rede, como condutores, isoladores, chaves seccionadoras, conectores e transformadores. Estão também relacionados às condições ambientais, como galhos de árvores em contato com a rede, descargas atmosféricas e ventos.

Esse cenário alerta para a análise das condições técnicas dos componentes da rede envolvidos nos eventos. É notório que os eventos transitórios ocasionados por curtos-circuitos na rede de distribuição resultam em esforços eletromecânicos e elevações térmicas que fadigam os diversos componentes da rede que estão próximos ao local do defeito, acelerando a degradação desses elementos. Mesmo nas condições de rápido isolamento do defeito pelos dispositivos de proteção da rede, esses efeitos eletromecânicos contribuem para a degradação de conectores, alças, jumpers, isoladores, condutores e diversos outros elementos da rede, principalmente quando a ocorrência do evento é sucessiva e/ou recorrente. Em condições de excessiva degradação, a rede se torna mais vulnerável e susceptível a interrupções, mesmo por fatores externos que primariamente não tenderiam a causar grandes consequências, concluindo-se que é imperativo o diagnóstico breve de eventos transitórios a fim de mitigar sucessivas ocorrências e a aceleração da degradação da rede.

Nesse contexto, este artigo apresentará a metodologia de análise de eventos de curta duração para alimentadores de média tensão, a fim de diagnosticar as possíveis causas raízes que ocasionaram os defeitos e detectar os locais de ocorrência, contribuindo para que as ações

de manutenção sejam mais assertivas e capazes de eliminar defeitos transitórios antes que estes degradem a rede ao ponto de ocasionarem defeitos permanentes, tendo em vista a concorrência do mercado de energia e as implicações regulatórias associadas à qualidade da energia. Destacase que existem outras metodologias para apoio à identificação de ocorrências de eventos em sistemas de distribuição, como destacado em Garcia (2006), Campoccia et al. (2010) e Henriques e outros (2014).

2 Qualidade de Energia Elétrica e VTCD

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) pode ser definida pela continuidade e disponibilidade da energia em condições normais de tensão e frequência. Nessas condições, a tensão apresenta forma de onda senoidal pura, magnitudes das tensões e frequência em limites aceitáveis e simetria entre as fases. Desta forma, entende-se como evento de qualidade de energia qualquer falha ou desvio das condições desejadas de funcionamento do sistema elétrico em regime permanente (ANEEL, 2018).

A qualidade do fornecimento de energia elétrica é uma preocupação central no planejamento e operação do setor elétrico (ACENDE, 2014). No Brasil, com a finalidade de fiscalizar e monitorar o SD em uma concessionária, a agência reguladora ANEEL desenvolveu os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), subdivididos em dez módulos que norteiam e padronizam as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição (ANEEL, 2018).

O Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à QEE, como a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado, bem como a qualidade do tratamento de reclamações. Quanto à qualidade do produto, esse módulo define alguns fenômenos, sendo as VTCDs definidas como desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos (ANEEL, 2018). O documento também classifica os tipos de VTCDs quanto à magnitude de tensão do evento (interrupção, afundamento ou elevação) e duração do fenômeno (momentânea ou temporária), conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de VTCD

| Classificação | Denominação | Duração | Amplitude |
|-------------------------------|---|------------------------------------|--|
| Variação Momentânea de Tensão | Interrupção Momentânea Afundamento | Até 3s De 1 ciclo a 3s | Menor que 0,1pu Entre 0,1pu e 0,9pu |
| | Momentâneo Elevação Momentânea | De 1 ciclo a 3s | A partir de 1,1pu |
| Variação Temporária de Tensão | Interrupção Temporária Afundamento Temporário | Entre 3s e 3min Entre 3s e 3min | Menor que 0,1pu Entre 0,1pu e 0,9pu |
| | Elevação Temporária | Entre 3s e 3min | A partir de 1,1pu |

Fonte: Os autores, 2021.

O Módulo 8 também define a metodologia de medição e caracterização dos eventos de VTCD, assim como o cálculo para a identificação do Fator de Impacto, responsável por determinar a severidade da ocorrência desses eventos na rede. Este fator é atualmente limitado a 1,0 pu pela ANEEL, e a eventual ultrapassagem desse limite caracteriza uma qualidade do produto insatisfatória e que deve ser ajustada pela concessionária de distribuição.

Para a determinação do Fator de Impacto em um ponto de monitoramento, primeiramente é feita a caracterização dos eventos de VTCD apurados naquele ponto por um período de 30 dias consecutivos, e o PRODIST determina que essa caracterização seja realizada através da agregação dos parâmetros amplitude e duração de cada evento detectado. Logo, eventos simultâneos são primeiramente agregados compondo um mesmo evento (agregação de fases) e, em seguida, os eventos consecutivos, em um período de três minutos no mesmo ponto, também são agregados para compor um único evento (agregação temporal). Os afundamentos e as elevações de tensão devem ser tratados separadamente (ANEEL, 2018). Após a caracterização dos eventos de VTCD medidos, deve-se contabilizá-los e agrupá-los conforme as regiões de sensibilidade indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estratificação em Regiões de Sensibilidade para Contabilização de Eventos de VTCD

| Amplitude (pu) | Duração | | | |
|----------------|---------|--------|--------|-------------------------------------|
| | 100 ms | 300 ms | 600 ms | 1s - 3s - 1min |
| | ms | ms | ms | ms - 300 - 600 - 1s 3s 1min 3min |
| > 1,15 | H | | I | |
| 1,10-1,15 | A | | | |
| 0,85-0,90 | | | | |
| 0,80-0,85 | D | | G | |
| 0,70-0,80 | | | F | |
| 0,60-0,70 | | | | |
| 0,50-0,60 | B | E | | |
| 0,40-0,50 | C | | | |
| 0,30-0,40 | | | | |
| 0,20-0,30 | | | | |
| 0,10-0,20 | | | | |
| < 0,10 | | | | |

Fonte: Os autores, 2021.

Importante salientar que as agregações temporal e de fase deverão ser realizadas apenas para eventos de mesma natureza, ou seja, os eventos de subtensão não poderão ser agregados com eventos de sobretensão. Assim sendo, para curtos-circuitos fase-terra em localidades distantes do neutro aterrado da subestação, as fases sãs poderão apresentar sobretensões que resultariam em dois Fatores de Impacto a serem contabilizados para o mesmo evento de VTCD.

Por fim, os eventos são totalizados na tabela 3 e o Fator de Impacto (FI) é calculado utilizando o Fator de Ponderação (Fp) de cada região de sensibilidade, a quantidade de eventos (Q) detectados em cada uma dessas regiões e o Fator de Impacto Base (FIB), conforme equação (1)

Tabela 3 – Fatores de Ponderação

| Região de Sensibilidade | Fator de Ponderação (Fp) | Quantidade de Eventos (Q) |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
| A | 0,00 | |
| B | 0,04 | |
| C | 0,07 | |

| | |
|---|------|
| D | 0,15 |
| E | 0,25 |
| F | 0,36 |
| G | 0,07 |
| H | 0,02 |
| I | 0,04 |

Fonte: Os autores, 2021.

$$FI = \frac{\sum_{n=A} F_{pn} \times Q_n}{FIB} \quad (1)$$

sendo,

n = índice de cada região de sensibilidade, variando de A até I.

FIB = fator dependente da tensão nominal do ponto de monitoramento, sendo 2,13 para $1,0kV < V_n < 69kV$ ou 1,42 para $69kV \leq V_n < 230kV$.

O Modulo 8 do PRODIST também abrange a qualidade da prestação de serviço de distribuição de energia elétrica, para a qual a ANEEL define os indicadores de continuidade de serviço DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e edita limites para esses indicadores, que devem ser cumpridos pelas distribuidoras. Essas, por sua vez, apuram e enviam periodicamente para a ANEEL os resultados desses indicadores, para que esta verifique a continuidade do serviço prestado.

Todavia, no âmbito da qualidade do serviço, a agência reguladora, até a presente data, não contabiliza a contribuição dos eventos de qualidade de energia elétrica com duração menor do que 3 minutos para os indicadores de DEC e FEC (SILVA, 2016). Ainda que no atual cenário as VTCDs não sejam diretamente contabilizadas nos indicadores DEC e FEC, elas contribuem significativamente para a deterioração de componentes da rede elétrica, sendo comum a ocorrência de uma interrupção permanente de fornecimento em condutores comprometidos devido às frequentes interrupções momentâneas e temporárias na região. Desta forma, as VTCDs não corrigidas impactam, mesmo que indiretamente, na piora dos indicadores de qualidade do serviço.

Em termos econômicos, a qualidade do serviço medida pelos indicadores DEC e FEC está diretamente ligada à remuneração das concessionárias de energia elétrica no reposicionamento tarifário por meio do Mecanismo de Incentivos (MI) estabelecido pela ANEEL. Além disso, a constante não conformidade desses indicadores em relação aos limites impostos pela ANEEL pode levar a concessionária à perda da concessão.

3 Curtos-Circuitos

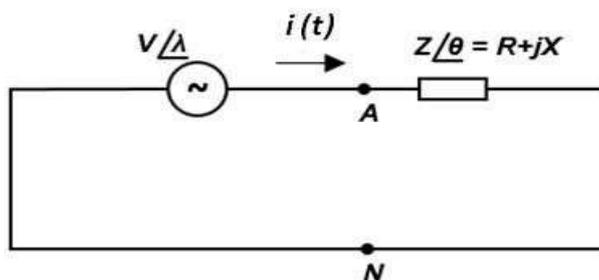
Os afundamentos de tensão, uma das principais causas das ocorrências das VTCDs, estão associados principalmente a curtos-circuitos em componentes da rede elétrica, chaveamento de grandes blocos de cargas e manobras de alimentadores. Os curtos-circuitos são conexões intencionais ou acidentais, em baixa impedância entre dois ou mais pontos que normalmente estão em diferentes potenciais elétricos (SANTOS et al., 2015).

No planejamento do sistema de distribuição de energia elétrica, uma das informações mais importantes é saber o nível da corrente de curto-circuito, com o objetivo de dimensionar e parametrizar os equipamentos de proteção da rede, como elo fusível, disjuntor, relé, religador e seccionador.

A duração da VTCD depende do tempo natural de extinção de faltas (quando ocorrem em períodos muito curtos, não sensibilizando a proteção) e do tempo de atuação dos equipamentos envolvidos no esquema de proteção, juntamente com a abertura do equipamento de seccionamento da rede. As faltas podem ser trifásicas equilibradas ou desequilibradas, compreendendo o curto-circuito fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra.

O valor da corrente de curto depende da impedância da rede elétrica, do local de ocorrência e da tensão pré-falta. A figura 1 mostra um circuito simplificado no instante da falta, em que $Z \angle \theta$ é a impedância equivalente ($Z \angle \theta = R + jX$) de toda a rede vista do ponto de falta e λ é o ângulo da tensão V pré-falta para qual o curto é iniciado.

Figura 1 – Circuito equivalente pré-falta.



Fonte: Os autores, 2021.

A formulação é:

$$R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = V \sin(\omega t + \lambda) \quad (2)$$

E a solução da equação diferencial (2) é:

$$i(t) = \frac{V}{Z} \sin(\omega t + \lambda - \theta) - \frac{V}{Z} \sin(\lambda - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (3) \text{ onde:}$$

ω = velocidade angular, sendo $\omega = 2\pi f$ para a frequência f .

θ = ângulo da impedância, que corresponde à diferença de fase entre a tensão e a corrente do circuito.

A primeira parcela da equação (3) corresponde a uma componente alternada da corrente e a segunda corresponde a uma componente contínua com decaimento correspondente aos parâmetros R e L da rede. Portanto, diferentes pontos da rede terão diferentes valores de curto-circuito, sendo Z a impedância equivalente vista do ponto de falta e R e L parâmetros do circuito.

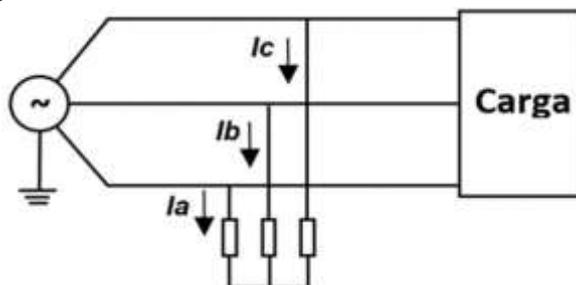
Um curto-circuito pode ser classificado como: trifásico (3ϕ), fase-terra (ϕ -terra), fase-fase (ϕ - ϕ) e fase-fase-terra (ϕ - ϕ -terra).

O curto-circuito trifásico é considerado simétrico e os curtos fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra são considerados assimétricos, pois há solicitações desequilibradas de correntes nas fases. Em (MADEGAN, 2019) são descritas as características básicas de cada evento de curto, conforme seguem.

3.1 Curto-circuito trifásico (3ϕ)

Curto-circuito menos frequente e as fases são igualmente solicitadas. Neste caso, as condições do contorno são $I_a + I_b + I_c = 0$ e $V_a = V_b = V_c = 0$ (figura 2).

Figura 2 – Diagrama representativo do curto-circuito trifásico.

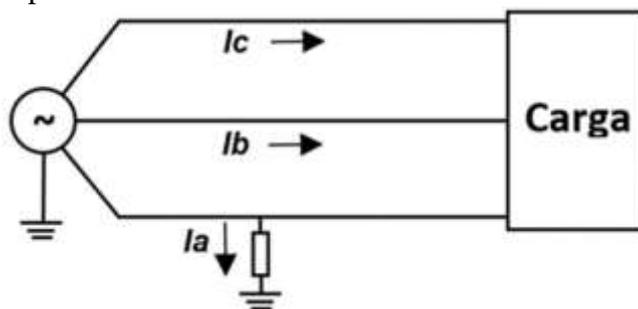


Fonte: Os autores, 2021.

3.2 Curto-circuito fase-terra (ϕ -terra)

No curto-circuito fase-terra, uma fase vai à terra e as outras duas ficam “sãs”. É considerado o curto mais comum em instalações elétricas. As condições de contorno em uma falta na fase A são: $V_a = 0$ e $I_b = I_c = 0$. Como consequência, ocorre sobretensão nas outras fases. A figura 3 ilustra uma representação deste sistema.

Figura 3 – Diagrama representativo do curto-circuito fase-terra.

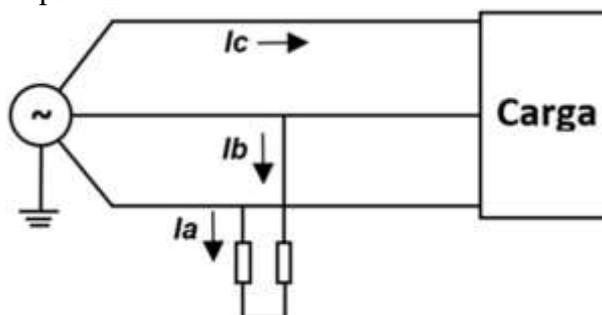


Fonte: Os autores, 2021.

3.3 Curto-circuito fase-fase (ϕ - ϕ)

Neste tipo de curto as condições são: $V_b = V_c$, $I_c = 0$ e $I_a + I_b = 0$. Como consequência, a tensão na fase sem falta terá o mesmo módulo e ângulo da tensão fase-terra e para as fases em falta a tensão terá metade do módulo da tensão-fase terra. A figura 4 ilustra uma representação deste sistema para um curto fase-fase entre as fases A e B.

Figura 4 – Diagrama representativo do curto-circuito fase-fase.

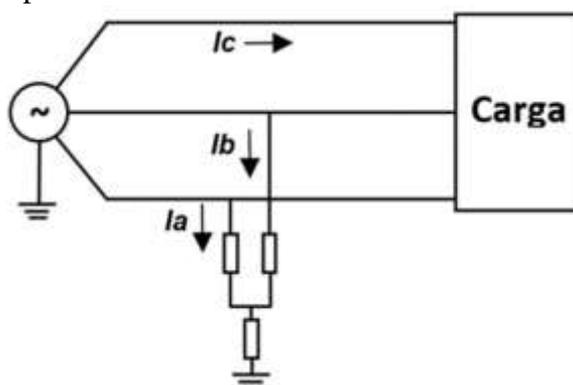


Fonte: Os autores, 2021.

3.4 Curto-circuito fase-fase-terra (ϕ - ϕ -terra)

As condições de contorno para uma falta para a terra nas fases A e B são: $V_a = V_b = 0$, $I_c = 0$. A figura 5 ilustra uma representação deste sistema.

Figura 5 – Diagrama representativo do curto-circuito fase-fase-terra.



Fonte: Os autores, 2021.

4 Metodologia

O objetivo deste artigo é abordar uma metodologia baseada na análise qualitativa dos eventos de curta duração na rede de média tensão, conforme estudo de caso realizado. A metodologia proposta poderá ser aplicada pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica para auxiliar o planejamento de suas atividades, sejam elas de manutenção ou de investimentos em melhorias na rede, a partir do mapeamento dos locais de incidência de VTCD e identificação de suas causas.

4.1 Obtenção de Oscilografias

A detecção dos eventos corresponde à etapa inicial do estudo, na qual é necessária a análise dos registros de eventos armazenados pelos dispositivos de proteção da rede de distribuição e a análise das oscilografias desses eventos.

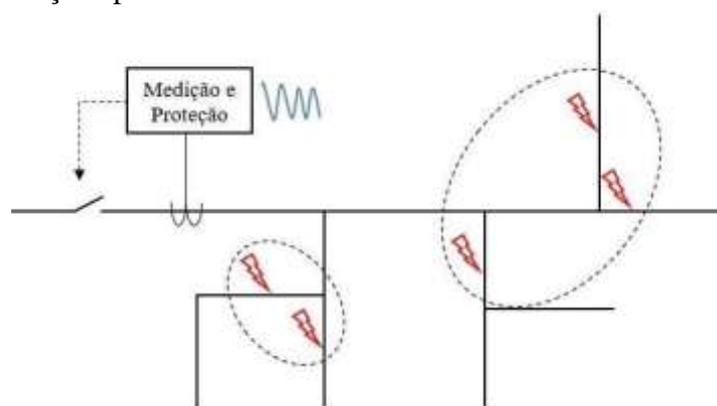
Toda vez que ocorre um evento de atuação da proteção ou até mesmo um transitório eletromagnético, é registrada uma oscilografia das correntes de fase e tensões de fase. Nessa etapa são selecionadas as oscilografias correspondentes aos eventos a serem estudados – nesse trabalho, as VTCDs. A partir da oscilografia é possível entender o comportamento do curto-circuito e obter os dados de amplitude da corrente de curto por fase, assim como da tensão, e o tempo de duração da falta.

Esses dados serão utilizados para a caracterização das VTCDs, conforme descrito no item 1, e para as simulações de localização das faltas no alimentador analisado.

4.2 Simulação e Localização dos Defeitos

A partir dos dados obtidos na etapa anterior, é possível saber qual o tipo de falta (Fase-Terra, Bifásico, Trifásico, etc.) e a sua magnitude. Usando um software para modelagem e estudos de redes de distribuição e análise de curtos-circuitos (para este trabalho foi utilizado o pacote CYMDIST do software CYME), localizam-se os possíveis locais da ocorrência, uma vez que se sabe o valor da corrente de defeito. A figura 6 ilustra uma das análises possíveis.

Figura 6 – Localizações prováveis dos defeitos analisados



Fonte: Os autores, 2021.

Com o resultado obtido a partir dos estudos de classificação e magnitude do curto-circuito e localização do ponto de falta, as ações de inspeção podem ser definidas e as estratégias para correção do defeito traçadas.

4.3 Causa Raiz do Defeito

Através da análise das oscilografias e diagnóstico do tipo de falta, é possível sugerir as prováveis causas raízes do evento, o que permitirá à equipe de manutenção atuar de forma mais rápida e assertiva na correção do defeito, evitando a recorrência do evento. Esse tipo de ação contribui para a melhoria dos indicadores de qualidade, pois produz um diagnóstico mais preciso das reais causas que desencadearam o defeito. Um diagnóstico equivocado pode gerar esforços ineficientes e maiores custos operacionais.

A tabela 4 apresenta algumas causas comuns associadas aos tipos de curto-circuito observados na rede de distribuição.

Tabela 4 – Provável causa raiz do defeito em função da oscilografia analisada.

| Tipo do Curto-Circuito | Provável Causa Raíz |
|------------------------|--|
| Fase-Terra | Contato com Árvores, Isolador ou Para-Raios Danificado. |
| Fase-Fase | Objetos sobre a Rede, Vãos Extensos, Cabos mal tensionados, Ausência de Espaçadores. |
| Trifásico | Objetos sobre a Rede, Vãos Extensos, Cabos mal tensionados, Ausência de Espaçadores. |

Fonte: Os autores, 2021.

5 Estudo de Caso

Para realizar o estudo de caso que compõe esse trabalho, foram colhidos dados de ocorrências relativas à qualidade da energia de uma concessionária de distribuição de energia

elétrica do Brasil. Foram realizadas análises em um alimentador de 13,8 kV a partir das oscilografias de eventos ocorridos entre os meses de Abril e Maio do ano de 2019. A partir delas foi possível aferir os dados apresentados na tabela 5.

A figura 7 ilustra a oscilografia da ocorrência descrita no evento 5 da tabela 5, um curto-circuito bifásico AB, sendo $I_a = -I_b = 1,506$ kA. A imagem ilustra como os dados referentes à falta são fornecidos diretamente da oscilografia.

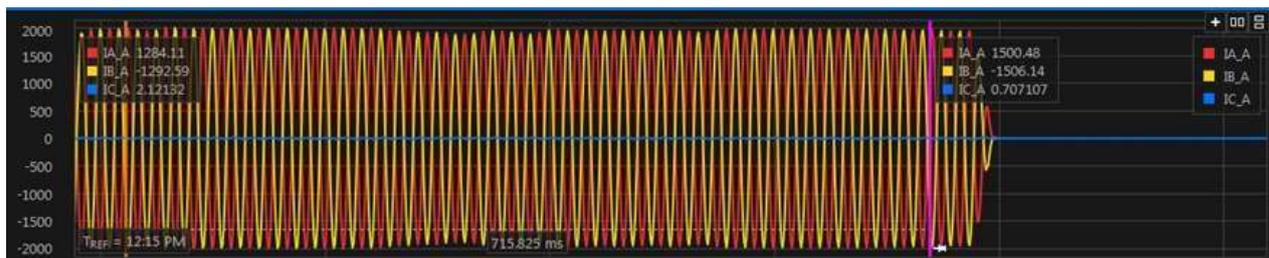
Tabela 5 – Ocorrências no alimentador analisado – período Abril e Maio de 2019

| Evento | Dados do Evento | | | | Dados do Curto-Circuito | | |
|--------|------------------------|------------------------|-------------------|------------------|-------------------------|----------|-------------------|
| | Horário de Início | Horário de Término | Clientes Afetados | Clientes x Tempo | Corrente [kA] | Tipo | Causa |
| 1 | 05/04/2019 04:53:02 | 05/04/2019 04:54:22 | * | * | 3,144 | AB | - |
| 2 | 05/04/2019 13:44:03 | 05/04/2019 13:44:29 | * | * | 2,956 | AB | - |
| 3 | 09/04/2019 16:47:55 | 09/04/2019 16:48:05 | * | * | 3,055 | AB | - |
| 4 | 22/04/2019 04:59:02 | 22/04/2019 05:01:01 | * | * | 3,122 | AN | - |
| 5 | 29/04/2019 12:14:02 | 29/04/2019 12:15:57 | * | * | 1,506 | AB | - |
| 6 | 01/05/2019 20:45:12 | 01/05/2019 20:46:54 | * | * | 2,775 | BCN | - |
| 7 | 03/05/2019 22:43:13 | 03/05/2019 22:45:10 | * | * | 5,988 | AB | - |
| 8 | 03/05/2019 23:59:14 | 03/05/2019 23:59:22 | * | * | 5,384 | AN | - |
| 9 | 05/05/2019 08:55:22 | 05/05/2019 08:55:29 | * | * | 2,997 | AB | - |
| 10 | 08/05/2019 04:53:02 | 08/05/2019 04:54:22 | * | * | 3,188 | AB | - |
| 11 | 08/05/2019 06:21:51 | 08/05/2019 16:25:02 | 71.297 | 9014 | 3,325 | AB à ABC | Contato conductor |

Fonte: Os autores, 2021

* Eventos inferiores a 3 minutos: sem incidência nos indicadores Clientes x Tempo e Clientes Afetados.

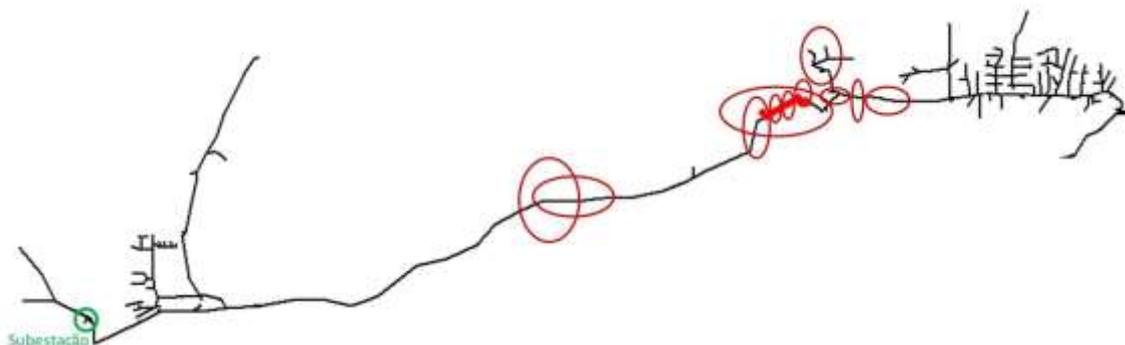
Figura 7 – Oscilografia obtida do dispositivo de proteção



Fonte: Os autores, 2021.

A partir da tabela 5, é possível mapear os curtos-circuitos no alimentador estudado através da realização de simulações em um software de estudos elétricos. Para a etapa de mapeamento nesse estudo de caso, foi utilizado o pacote CYMDIST do software CYME, destinado a realizar estudos em sistemas de distribuição, mas poderiam ser utilizados outros, como o ATP estudado em Lessa e outros (2018). Nele foi carregada a modelagem do alimentador analisado e inseridas as informações de corrente de curto-circuito. Como resposta, foram obtidos os prováveis locais de ocorrência da falta no alimentador (figura 8).

Figura 8 - Mapeamento das ocorrências dos meses de Abril/2019 e Maio/2019



Fonte: Os autores, 2021.

A figura 8 apresenta o mapeamento das ocorrências dos meses de Abril e Maio listadas na tabela 5. Nessa imagem, os círculos vermelhos representam os curtos-circuitos que causaram as VTCDs, que não contribuem para os indicadores DEC e FEC por serem inferiores a 3 minutos de duração, e o traço destacado em vermelho no alimentador representa o curto-circuito ocorrido no dia 08/05/2019 às 06:21 (evento 11 da tabela 5), que se iniciou como um curto bifásico AB e evoluiu para um curto-circuito trifásico ABC, ocasionando a interrupção do fornecimento de energia para 9.014 unidades consumidoras e a contabilização nos indicadores DEC e FEC.

É possível notar que os curtos-circuitos mapeados (figura 8) apresentam proximidade entre si. Além disso, verifica-se também que essas VTCDs ocorreram próximas ao local da falta que ocasionou o evento descrito na linha 11 da tabela 5. É possível notar também, a partir da

tabela 5, que os eventos foram, em sua maioria, nas fases AB, bem como o evento 11, que iniciou por um curto-circuito bifásico AB.

Salienta-se que a ocorrência de numerosas VTCDs em condutores da rede primária de distribuição de energia, normalmente decorrentes de curtos-circuitos, contribui para o avanço da degradação material, visto que os curtos-circuitos provocam efeitos mecânicos e térmicos que reduzem a rigidez do condutor e dos diversos acessórios da rede. Havendo rompimento de condutores da rede de distribuição em decorrência dessa degradação material, o impacto negativo poderá ser relevante nos indicadores de continuidade de energia elétrica, tanto no tempo de recomposição do sistema, quanto na quantidade de consumidores afetados. Por isso, há a necessidade de se diagnosticar a natureza de recorrentes VTCDs em uma mesma região elétrica e buscar a sua mitigação.

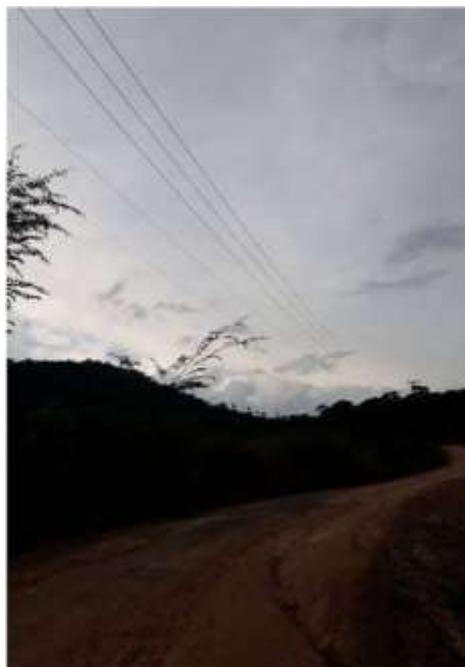
Além disso, muitas vezes a atribuição de uma causa de desligamento está associada, de maneira errônea, a fatos locais aparentes, que na realidade podem ser a consequência ou causa secundária do desligamento, mas não a causa principal. A correta identificação da falta permite classificar um conjunto de causas, até mesmo não detectáveis na inspeção local, que estão originando a degradação da rede e, por consequência, a elevação dos indicadores de continuidade.

Baseando-se nesses fatos, a análise apresentada na figura 8 e a correlação entre os eventos descritos na tabela 5 mostram que, a partir do estudo preliminar das ocorrências menores do que 3 minutos, é possível detectar eventos recorrentes entre as fases A e B que precisam ser mitigados, o que sugere a realização de uma inspeção em campo direcionada a identificar a provável causa raiz do contato entre essas fases, o que pode estar relacionada a cabos mal tensionados, vãos extensos, ausência de espaçadores ou objetos sobre a rede, como sugerido na tabela 4.

A causa do evento 11 da tabela 5 foi relatada pela equipe de inspeção em campo como contato entre fases. Após esse evento, a equipe registrou o extenso vão no ponto da ocorrência e obteve confirmação de residentes do local de que naquele ponto ocorria contato entre fases, o que ratifica a ocorrência das VTCDs listadas na tabela 5 e seu respectivo mapeamento na figura 8.

O problema foi corrigido, como mostram as figuras 9 e 10.

Figura 9 - Antes da correção – vão extenso de 100 metros no local indicado pela análise oscilográfica.



Fonte: Os autores, 2021.

Figura 10 - Após correção – redução do vão para 50 metros.



Fonte: Os autores, 2021.

O resultado do estudo apresentado confirma que o estudo das VTCDs na rede de distribuição permite que ações estratégicas de atividades de manutenção e investimentos em melhoria da rede sejam guiadas com mais assertividade, a partir da localização dos pontos de ocorrência desses eventos e identificação dos tipos de curto-circuito – o que sugere a identificação da provável causa raiz.

6 Conclusões

Neste artigo foram analisadas as VTCDs em um alimentador de distribuição de energia elétrica em média tensão, tendo a finalidade de diagnosticar os locais do evento, a sua recorrência e as prováveis causas raízes da falha.

Através do estudo de caso apresentado, verifica-se que a ocorrência do curto-circuito bifásico entre os condutores do alimentador de média tensão, que resultou em um desarme e consequente impacto nos indicadores de DEC e FEC da concessionária de distribuição, foi precedida de sucessivos eventos de VTCD na mesma localização, sugerindo correlação entre os eventos. Com a identificação de que o defeito foi ocasionado por cabos mal tensionados, é possível inferir que essa sucessiva ocorrência de VTCDs pode ter contribuído para o curto-circuito permanente, pois os esforços eletromecânicos e elevações térmicas decorrentes dos curtos circuitos tendem a degradar os componentes de rede próximos aos seus locais de incidência, como alças e espaçadores.

A metodologia utilizada consiste em análises de oscilografia dos eventos registrados pelos equipamentos de proteção e da localização dos defeitos através do estudo de curto-circuito em um software adequado. O resultado é um diagnóstico assertivo da recorrência e dos locais de faltas transitórias, pouco avaliadas no dia a dia das concessionárias de distribuição.

A metodologia proposta, se aplicada coordenadamente à análise periódica dos alimentadores que apresentam maiores quantidades de interrupções, sejam elas transitórias ou permanentes, desde que coerentes, poderá contribuir para um diagnóstico assertivo dos locais da rede que demandam ações mais urgentes de manutenção, proporcionando eficiência nas rotinas de manutenção e redução de custos operacionais da concessionária, além de melhoria nos indicadores de qualidade do produto e do serviço.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10, 2018.

CAMPOCCIA, A. et al.. An efficient diagnostic technique for distribution systems based on under fault voltages and currents. **Electric Power Systems Research**, v.80, n.10, p.1205-1214, 2010. doi: 10.1016/j.epsr.2010.04.007.

CYMDIST (Pacote de Análises de Sistemas de Distribuição do Software CYME). Versão 8.1. Eaton Corporation, 2017.

GARCIA, D.A.A. **Metodologia de Diagnóstico Automática de Falhas de Curto-Circuito em Alimentadores Primários de Sistemas de Distribuição Reticulados tipo Spot**. São Paulo, 2006. 205 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Energia e Automação Elétricas.

HENRIQUES, H.O. et al.. Development of Transient Fault Management Methodology. **IEEE Latin America Transactions**, v.12, n.4, p.618-625, 2014. doi: 10.1109/TLA.2014.6868863.

INSTITUTO ACENDE BRASIL - ACENDE. **Qualidade no Fornecimento de Energia Elétrica: Confiabilidade, Conformidade e Prestreza**. White Paper 14, São Paulo, 36 p, 2014.

LESSA, T.S. et al. Simulation of a Real Distribution Network with permanent and Transient softwares. In 2018 **Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)**, Niterói, 2018. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395645.

MADEGAN, C. **Fascículo Capítulo XII Curto-circuito para a seletividade**, Accessed on: Jul. 05, 2019. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/capitulo-xii-tipos-de-faltasmais-comuns>. Acesso em: 15 out 2019

SANTOS, G.G. et al. Aplicativo Computacional para Cálculo de Curto-Circuito e Estudos de Afundamentos de Tensão. In **XIII CEEL**, Uberlândia, 2015.

SILVA, F.G.T. Compensações Financeiras por Descumprimento dos Indicadores de Continuidade Individuais: Impactos Econômicos e Sociais Estudo de Caso da CELG Distribuição. **Revista IPOG**, 2016.