

Avaliação da Aplicação de Dispositivos de Manobra com Abertura Monopolar em Redes de Distribuição Trifásicas

Tema: Redes de Distribuição

Autores: Heliton de Oliveira Vilibor; Ricardo Fonseca Buzo

Co-Autores: Giordanni da Silva Troncha; Arthur Henrique Bergamin

Empresa: CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz

Resumo

Este artigo analisa os efeitos da abertura monopolar de dispositivos de manobra e proteção de redes de distribuição de média tensão sobre transformadores de distribuição trifásicos com conexão delta-estrela. Especificamente, é avaliada de forma detalhada como a ausência de uma fase no lado de média tensão afeta as tensões do lado de baixa tensão, com possíveis impactos para as cargas conectadas. O estudo é fundamentado em análises teóricas, simulações computacionais e medições de campo, oferecendo uma visão abrangente e didática dos fenômenos envolvidos. Os resultados obtidos visam contribuir para o entendimento técnico e para a formulação de práticas operacionais que minimizem os impactos dessa condição em redes de distribuição [1]-[5].

1. Introdução

No Brasil, a adequação dos níveis de tensão para atendimento a cargas elétricas trifásicas é feita por meio de transformadores de distribuição trifásicos com conexões delta e estrela aterrado nos enrolamentos de Média Tensão (MT) e de Baixa Tensão (BT), respectivamente. Por outro lado, a nível global, a aplicação de três transformadores monofásicos pode ser encontrada [1]-[5], devido aos benefícios para a operacionalização do sistema elétrico.

Para as distribuidoras de energia elétrica, ao empregar-se três transformadores monofásicos, tem-se como principais ganhos a simplicidade e agilidade durante a substituição ou reparo de um único transformador sem afetar o sistema como um todo. Isso melhora a confiabilidade do sistema, pois falhas em um transformador ou em trechos de rede à jusante podem ser isoladas sem comprometer as outras fases sem defeito. Para isso, associadas à aplicação de transformadores monofásicos, tem-se a aplicação de dispositivos de proteção e manobra com aberturas individuais por fase, tais como os Religadores Trifásicos Monopolares - RTM (Triple-Single Reclosers) [6].

No Brasil, mesmo que o transformador trifásico possua maior representatividade, devido à sua capacidade de atender a demandas de maior potência, transformadores bifásico e monofásico com retorno pela terra (MRT) também são utilizados, principalmente em regiões rurais, onde alimentadores de distribuição apresentam elevada extensão de redes monofásicas e trifásicas [7].

Em redes trifásicas, a aplicação do RTM pode contribuir com os benefícios técnicos associados a indicadores de continuidade do sistema elétrico ao evitar a interrupção de todas as fases do circuito em

casos de faltas monofásicas, porém irá afetar determinadas cargas elétricas supridas por transformadores trifásicos conectados em delta-estrela [8]. Logo, existe um conflito intrínseco entre, melhorar a continuidade do fornecimento e manter a qualidade da energia elétrica fornecida.

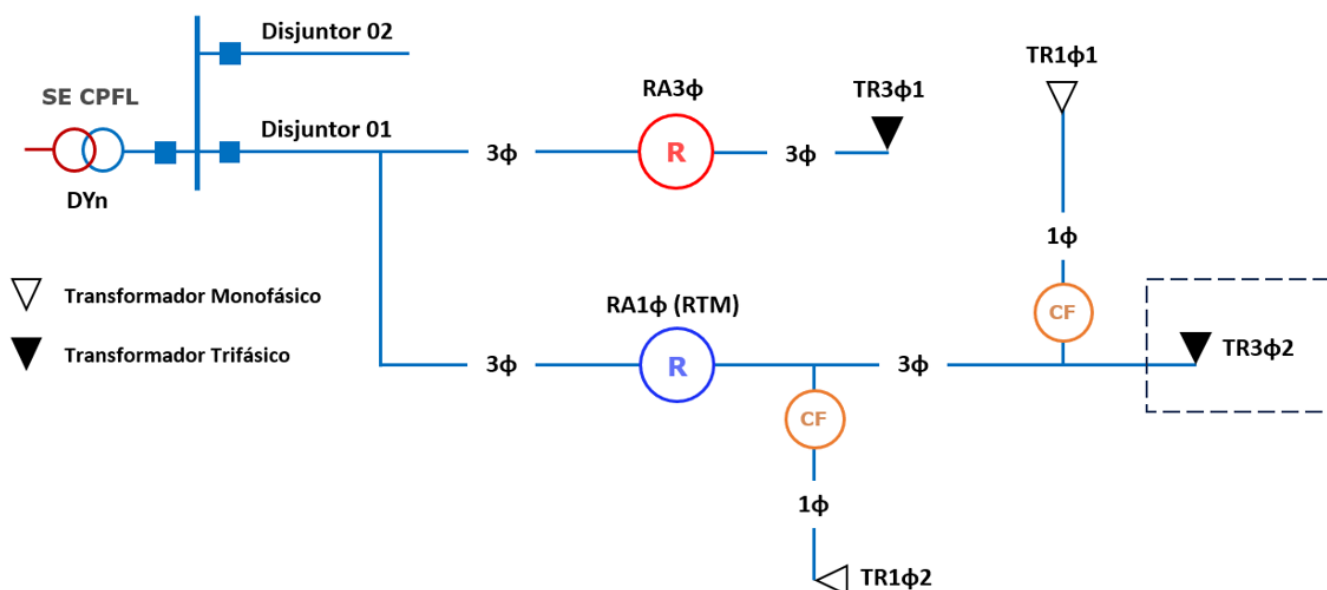
Frente à discrepância entre a melhoria da continuidade do fornecimento da energia elétrica e o impacto na qualidade do produto, este artigo tem como objetivo analisar os efeitos no lado de BT de um transformador trifásico com conexão delta-estrela aterrado, causados pela abertura monopolar de uma fase no lado de MT. A avaliação será realizada por meio de análise fasorial e matemática, simulações utilizando o ATP (Alternative Transients Program) e medições reais em campo para validar os resultados obtidos e facilitar o entendimento da propagação dos impactos da MT para a BT. Por fim, é avaliada a factibilidade da aplicação de RTM em alimentadores de distribuição de MT que suprem transformadores trifásicos, de modo que o padrão de qualidade do produto estabelecido no módulo 8 do Prodist (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) seja atendido [9].

Na Seção 2, serão apresentados equacionamentos e análises fasoriais das tensões para os lados de BT e MT, bem como simulações e dados de medições em campo para a consolidação da compreensão do fenômeno em análise. Na seção 3, serão apresentadas análises de impacto em consumidores de baixa tensão submetidos às condições investigadas na Seção 2. Na seção 4, serão apresentadas discussões e recomendações oriundas das análises das seções anteriores, seguidas da conclusão do trabalho.

2. Desenvolvimento

Nesta seção, tem-se análises para a compreensão dos efeitos da abertura monopolar em circuitos trifásicos de MT, com representação matemática do problema, simulações e medições em campo. Para isso, na Figura 1, é ilustrado um alimentador de distribuição composto por um religador tripolar (RA3 ϕ), um religador monopolar (RA1 ϕ), dois transformadores trifásicos (TR3 ϕ), dois transformadores monofásicos (TR1 ϕ), duas chaves fusíveis (CF) e um disjuntor. Para as análises, é considerada a ocorrência de uma falta no local indicado na Figura 1 (à montante do TR1 ϕ), assumindo a atuação da RA1 ϕ (RTM). As análises das tensões primárias e secundárias serão analisadas sobre o transformador TR3 ϕ , durante a interrupção da fase A.

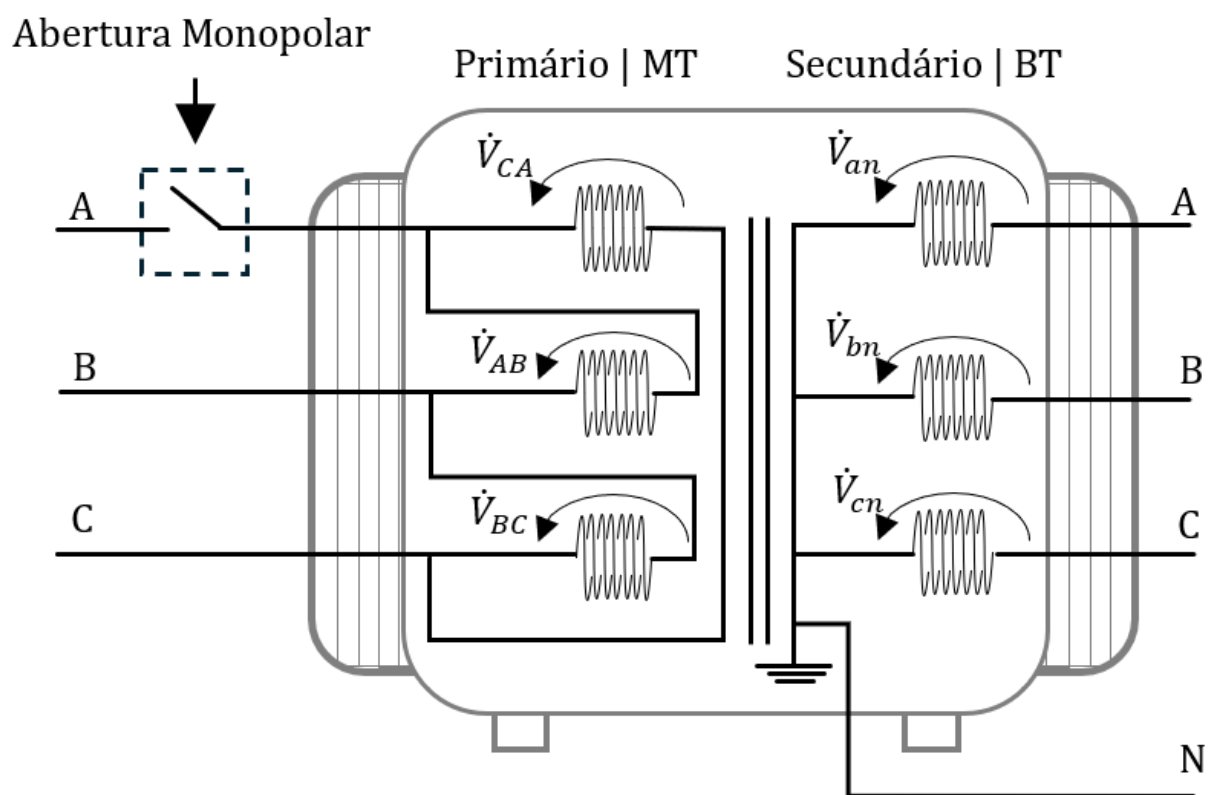
Figura 1 – Alimentador de distribuição utilizado para a exemplificação da abertura monopolar de um RTM.



2.1. Representação Matemática

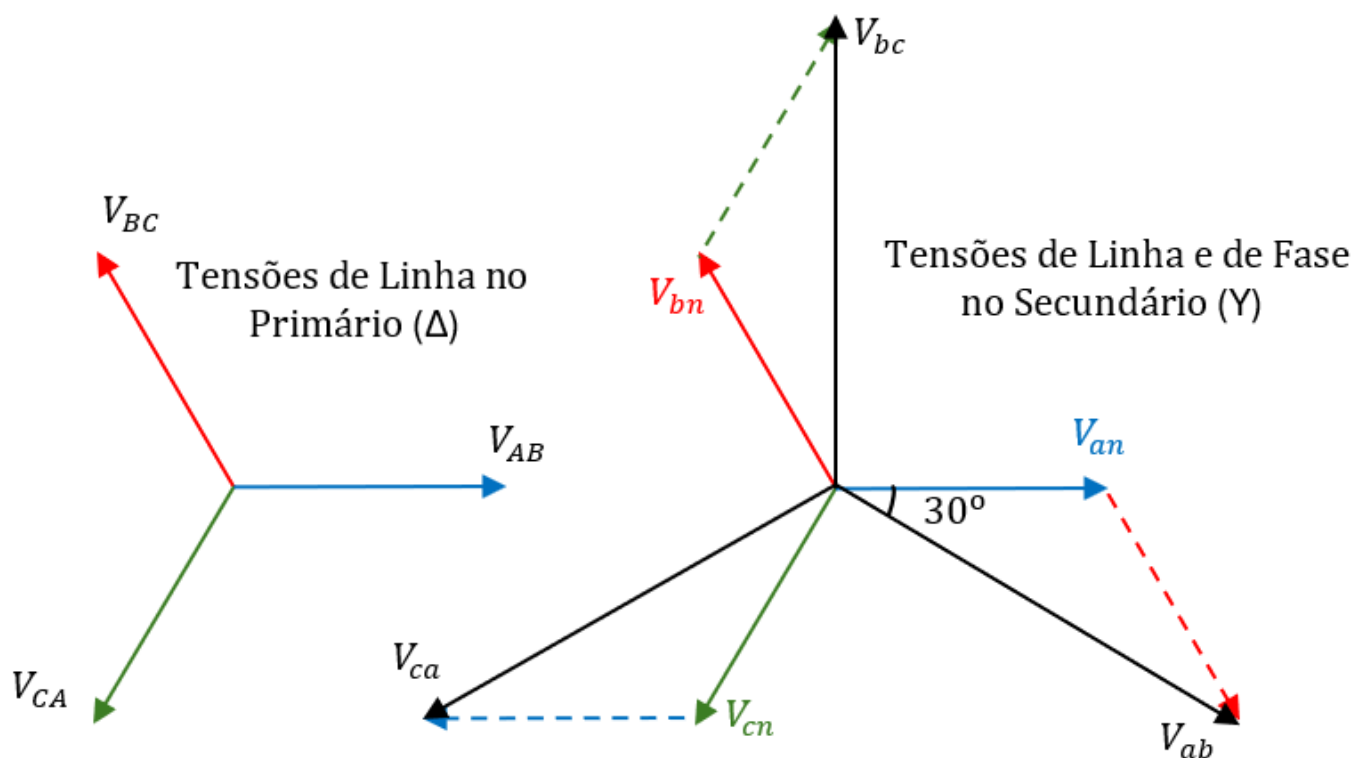
Para a melhor compreensão das análises de tensões primárias e secundárias, o transformador em análise TR3x2 é ilustrado separadamente na Figura 2, com abertura da fase A de alimentação.

Figura 2 – Transformador Trifásico Delta-Estrela submetido a abertura da fase A de alimentação.



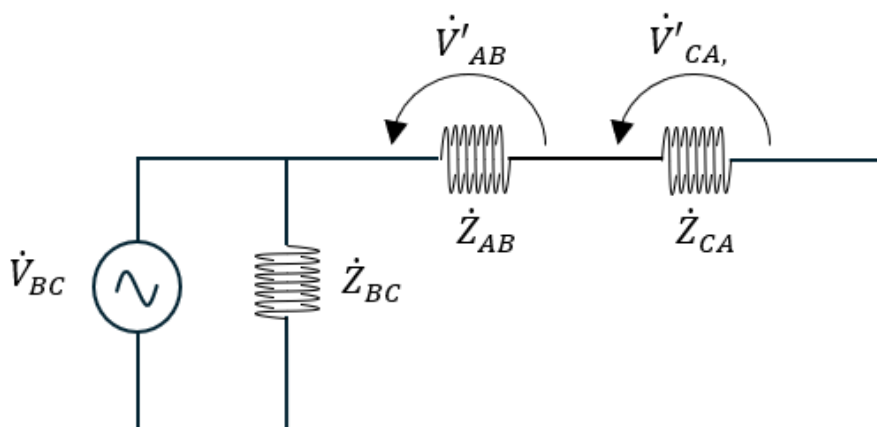
Em condição normal de operação do sistema elétrico, ou seja, sem a ocorrência de uma falta, as tensões de linha do primário (V_{xy}) do transformador trifásico Delta-Estrela induzem tensões de fase no secundário (V_{xn}), uma vez que as bobinas dos enrolamentos primário e secundário são sobrepostas. Desta forma, as tensões de linha da MT estão em fase com as tensões de fase da BT e deslocadas em 30 graus das tensões de linha da BT, conforme ilustrado pelos fasores da Figura 3.

Figura 3 – Análise fasorial das tensões primária e secundária de um transformador trifásico Delta-Estrela em condição normal de operação do sistema elétrico.



Assumindo a condição de fase A do lado de MT aberta, é possível equacionar as tensões de linha do enrolamento primário após a abertura da fase A (V'_{xy}). Para fins didáticos, a conexão delta do enrolamento primário é apresentada na Figura 4 na forma de circuito elétrico, tendo-se como referência a tensão de linha não afetada pela interrupção da fase A, ou seja, a tensão de linha $V'_{BC} = 1$ pu.

Figura 4 – Conexão Delta das bobinas do enrolamento primário.



A partir do circuito da Figura 4, é possível extrair a expressão dada em (1), de modo a obter os valores das tensões de linha V'_{AB} e V'_{CA} , ressaltando-se que na ausência da fase A, o enrolamento na conexão delta tem como fonte de alimentação apenas a tensão V_{BC} .

$$\dot{V}_{BC} = \dot{V}'_{AB} + \dot{V}'_{CA} \quad (1)$$

Onde,

V_{BC} é a tensão de linha do lado primário entre as fases B e C antes e após a abertura da fase A.

V'_{AB} é a tensão de linha do lado primário entre as fases A e B após a abertura da fase A.

V'_{CA} é a tensão de linha do lado primário entre as fases C e A após a abertura da fase A.

Assumindo que as impedâncias das três bobinas do enrolamento primário são idênticas, é possível afirmar a expressão dada em (2).

$$V'_{AB} = V'_{CA} = \frac{V_{BC}}{2} \quad (2)$$

A partir da (2), conclui-se que ao executar a abertura monopolar de um sistema de tensões de linha trifásicas (fase A), o qual alimenta um transformador trifásico conectado em delta no primário, as bobinas do enrolamento primário irão estar submetidas as seguintes magnitudes de tensões de linha: $V'_{AB} = 0,5 pu$, $V'_{CA} = 0,5 pu$ e $V'_{BC} = 1 pu$.

Como ilustrado nas Figuras 2 e 3, ao considerar o enrolamento do secundário do transformador na configuração Estrela Idealmente Aterrado, as magnitudes das tensões de fase sobre os terminais das bobinas do enrolamento secundário serão: $V'_{an} = 0,5 pu$, $V'_{bn} = 1 pu$ e $V'_{cn} = 0,5 pu$, onde V'_{an} , V'_{bn} e V'_{cn} são as magnitudes das tensões de fase resultantes no secundário do transformador.

2.2. Simulação no Software ATP

Para validar o conceito matemático exposto, neste subitem é apresentado o resultado da simulação da abertura monopolar de um alimentador de distribuição trifásico real alimentando um transformador trifásico Delta-Estrela Aterrado Solidamente. As simulações são realizadas no Software ATP e permitem a visualização das formas de onda das tensões de fase resultantes no secundário do transformador.

Para este estudo, considerou-se a abertura de uma das fases do disjuntor de um circuito primário com cargas trifásicas e monofásicas (112,5 kVA (3F) + 75 kVA (3F) + 3 x 10 kVA (1F)), a fim de avaliar a resposta de tensão após o ponto de interrupção, conforme indicado na Figura 5. Os valores de tensão de fase resultantes da simulação estão apresentados na Figura 6.

Figura 5 – Alimentador de distribuição utilizado na simulação no Software ATP.

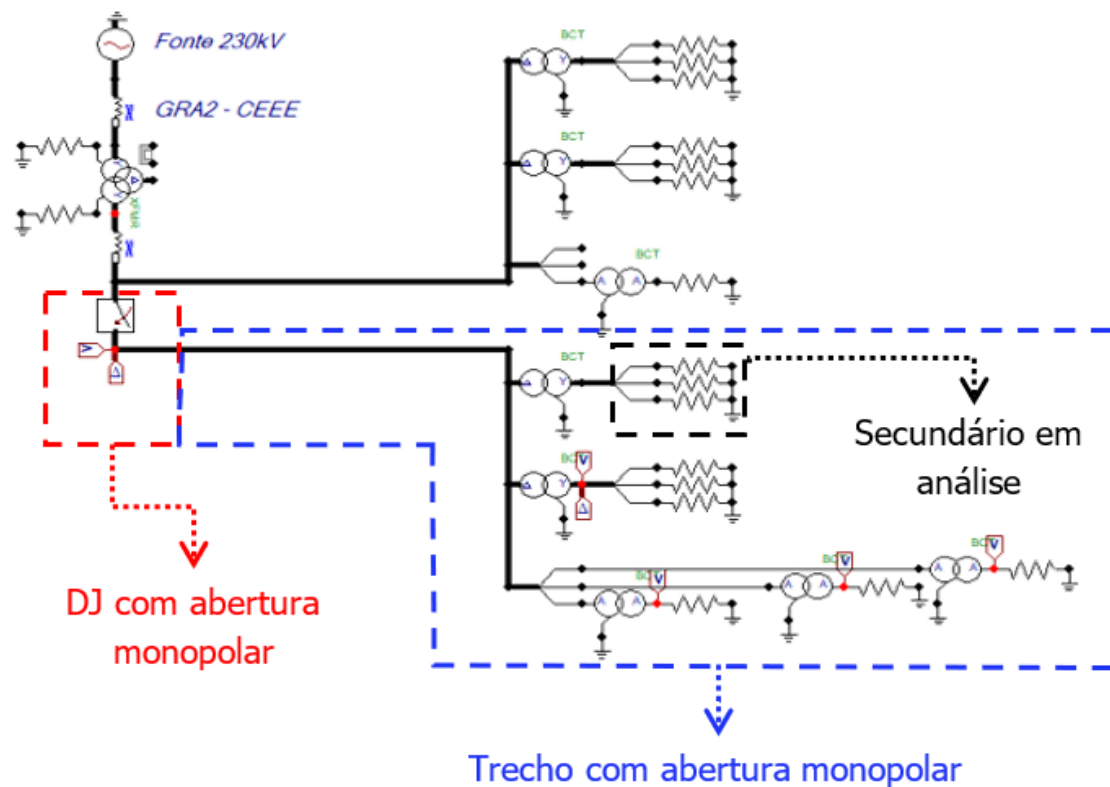
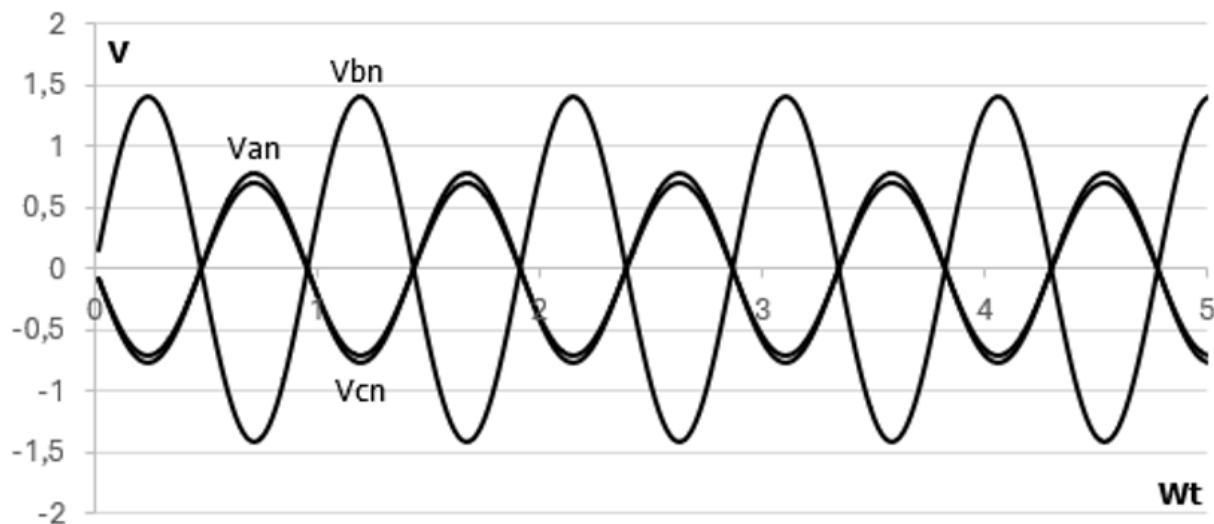


Figura 6 – Tensões de fase resultantes da simulação no secundário de transformador (Y) quando submetido a abertura monopolar do lado primário (").



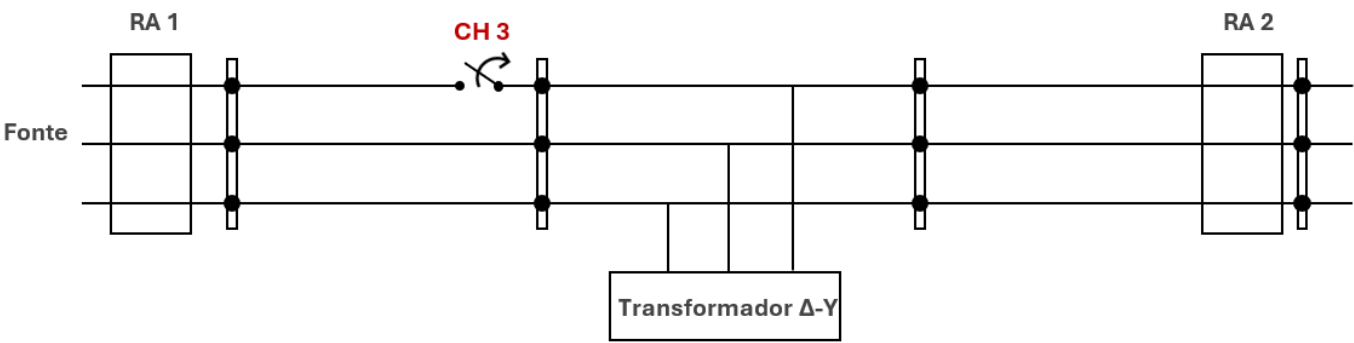
As tensões obtidas por meio da Figura 6, indicam exatamente os mesmos valores previstos pela análise matemática proposta. Ou seja, uma das tensões permanece com magnitude de 1 pu enquanto as demais tem o seu valor reduzido pela metade.

2.3. Aplicação em Campo e Campanha de Medição

A fim de aprofundar ainda mais as investigações referentes ao comportamento das tensões durante a abertura monopolar em um sistema com transformadores trifásicos, neste subitem são apresentados



valores reais de um estudo de caso realizado em campo, onde foi executada a abertura monopolar em um alimentador trifásico de 13,8kV, alimentando transformadores trifásicos 220/127V conectados em Delta-Estrela Aterrado, conforme Figura 7.

Figura 7 – Ilustração de trecho de Alimentador de distribuição trifásico 13,8kV submetido a abertura monopolar em campo.



Para identificar o comportamento das tensões no lado de MT (primário dos transformadores) foram utilizadas medições de religador (R2) instalado à jusante do ponto da abertura monopolar (CH 3). Estas medições foram extraídas via ADMS (Sistema de Gestão de Distribuição da Schneider Electric Brasil), conforme Figura 8.

Figura 8 – Tensões de linha medidas no lado delta do transformador durante a abertura monopolar.

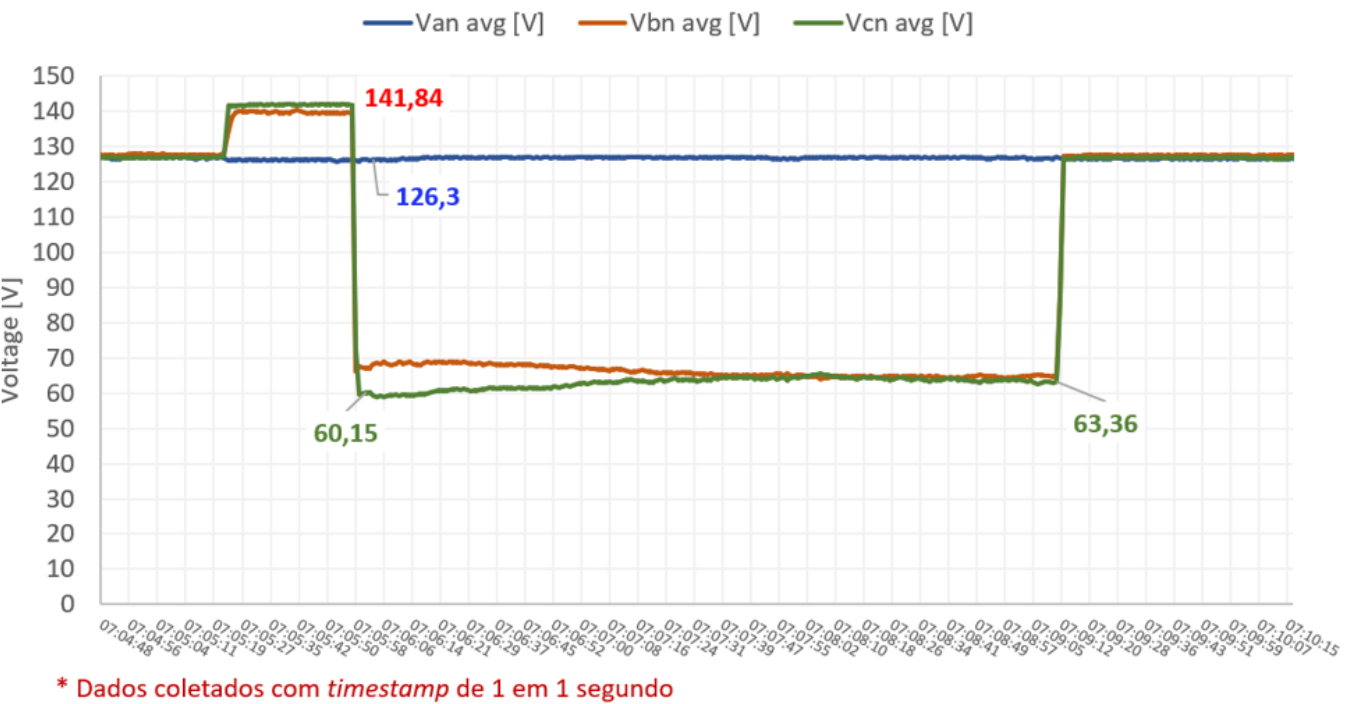
Calculation Signals			
Entradas:			
Nome	Valor	Sinalizadores	Qualidade
118955_KV_Az	7,383 kV		Boa
118955_KV_Br	6,491 kV		Boa
118955_KV_Vm	13,749 kV		Boa
118955_PERDAF	ALARME	 	Boa

Por meio da Figura 8, é possível identificar que as tensões se comportam conforme indicado na representação matemática do subitem 2.1, tendo uma das tensões com valor próximo a 1 pu e os demais com suas magnitudes reduzidos a aproximadamente 0,5 pu. Os valores efetivamente medidos em campo indicam 1pu, 0,53 e 0,47. Isto se dá uma vez que o sistema real não é idealmente equilibrado, ou seja, antes da abertura monopolar as tensões das três fases apresentavam determinado desequilíbrio.

Para avaliar o comportamento das tensões no secundário de um transformador de distribuição, foi instalado um medidor de qualidade da energia elétrica classe S, com *timestamp* ajustado para medir dados a cada segundo.

Nos resultados, apresentados na Figura 9, houve queda de tensão em duas fases de aproximadamente 1 pu para 0,5 pu, conforme esperado. Especificamente, durante a abertura monopolar, uma das tensões teve a sua magnitude mantida em torno de 126,3 V, enquanto as demais fases apresentaram valores de aproximadamente 63,36 V após um período de ligeira variação.

Figura 9 – Resultados das medições de tensões de fase em secundário de transformador trifásico ("Y).



Realizando a comparação entre os dados simulados e medidos em campo, é possível validar as condições simuladas no ATP e desenvolvimento matemático, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre simulação e medição no trecho em que foi realizada a abertura monopolar.

Sistema	Simulação ATP Draw (pu)	Medição Real (pu)	Erro (%)
MT	0,56	0,54	3,57
BT	0,52	0,50	3,84

2.4. Análises de Impacto da Abertura Monopolar

2.4.1. Impactos em Unidades Consumidoras

Com base nos resultados obtidos na seção 2, muitas Unidades Consumidoras (UCs) poderão ser supri-
das com tensão de 0,5 pu, o que, conforme item 183 do Módulo 8 do PRODIST ANEEL, configura como
interrupção do fornecimento para os sistemas de medição tratados no item 16.2 do Módulo 5 do PRODIST
ANEEL. Além disso, o Fator de Desequilíbrio (FD) para clientes trifásicos viola os limites regulados do Mó-
dulo 8 do PRODIST ANEEL. Equipamentos supridos com tensão nominal de 0,5 pu e com o desequilíbrio
previsto, poderão ser significativamente impactados.

Os impactos podem variar em função do padrão de cada UC, ou seja, irá depender se o padrão é monofási-
co (1Ø) bifásico (2Ø) ou trifásico (3Ø). Na Tabela 2, tem-se as possibilidades de condições de interrupção ou
operacionalização de equipamentos, considerando a interrupção da fase A. Conforme apresentado, assu-

minho todas as possibilidades e combinações de tensões, é possível identificar que poucas UCs, e apenas para um circuito, não experimentariam interrupção no fornecimento da energia elétrica. Adicionalmente, as distribuidoras de energia elétricas não possuem controle preciso quanto as fases (A, B ou C) de cada UC.

Tabela 2 – Combinações de tensões e condições de interrupção ou operacionalização possíveis durante a abertura monopolar da fase A.

Padrão da UC	Combinações Possíveis	Condição
1 ϕ	AN	Interrupção
1 ϕ	BN	Normal
1 ϕ	CN	Interrupção
2 ϕ	BC	Interrupção
	BN	Normal
	CN	Interrupção
2 ϕ	AB	Interrupção
	AN	Interrupção
	BN	Normal
2 ϕ	CA	Interrupção
	AN	Interrupção
	CN	Interrupção
3 ϕ	ABCN	Interrupção

2.4.2. Impactos em Sistemas de Proteção

Na análise das componentes simétricas, no curto-circuito Fase-Terra, as correntes de sequência positiva, negativa e zero são iguais, deste modo, a corrente de falta é igual a **310**. Para os casos de aplicação da função ANSI 51GS, comumente utilizado nos equipamentos de proteção das distribuidoras de energia elétrica, haverá atuação dos equipamentos com abertura trifásica à montante do ponto de abertura monofásica. Caso desabilitado as proteções 51GS, para faltas com queda de condutores do lado carga, os transformadores realimentam a falta, gerando riscos de acidentes elétricos.

2.5. Discussões e Recomendações

Com base nas análises apresentadas, é relevante abordar e ressaltar alguns pontos, como seguem:

- *Uma das principais justificativas para a implementação de Religadores Trifásicos com possibilidade de abertura monopolar é a contribuição para a redução dos indicadores de continuidade DEC e FEC. Entretanto, para sistemas com transformadores trifásicos, assumindo as diretrizes do módulo 8 do Prodlist, é possível identificar com a Tabela 2 que a grande maioria das UCs continuarão a experimentar a condição de interrupção no fornecimento da energia elétrica. Dentre as 13 possibilidades de combinações entre fases e fases e neutro, apenas 3 permanecerá em condição normal de operação.*
- *A fabricação de religadores trifásico com a capacidade de atuação monopolar possui um custo mais elevado, pois requerem 3 atuadores e 3 placas de disparo, uma para cada uma das fases.*
- *A abertura de somente uma fase afeta o acionamento do SEF (Sensitive Earth Fault, ANSI 51GS), visto a aparição de correntes de sequência negativa e zero na abertura monopolar.*

3. Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise abrangente sobre os efeitos da abertura monopolar em dispositivos de manobra e proteção em redes de distribuição trifásicas, com foco nos impactos em transformadores de distribuição trifásicos com conexão delta-estrela, contribuindo para o avanço do entendimento técnico sobre a temática, fornecendo subsídios para o aprimoramento de práticas operacionais e regulamentações no setor elétrico. Por meio de modelagens matemáticas, simulações no software ATP e medições de campo, foi possível validar e aprofundar o entendimento dos fenômenos envolvidos. Os resultados indicaram que, durante a abertura monopolar de uma fase no lado de média tensão, as tensões no lado de baixa tensão são significativamente afetadas. Observou-se uma redução de tensões para aproximadamente 0,5 pu em duas das três fases, enquanto a terceira fase manteve-se próxima de 1 pu. Esse comportamento foi confirmado tanto pelas simulações quanto pelas medições realizadas em campo, com diferenças mínimas entre os valores simulados e medidos, validando a precisão do modelo matemático apresentado, facilitando significativamente o entendimento do fenômeno. Ao analisar os impactos para as unidades consumidoras, constatou-se que, para a maioria das combinações de tensões, as condições de fornecimento violam os limites regulados pelo Módulo 8 do PRODIST, categorizando como interrupção do fornecimento da energia elétrica. Tais resultados destacam que, não existe um conflito claro entre a melhoria nos indicadores de continuidade (DEC e FEC) e na manutenção da qualidade do fornecimento de energia elétrica, pois poucas UCs não serão interrompidas.

4. Referências bibliográficas

- [1] Kirtley, J. L., "Power Distribution Engineering: Analysis, Design, and Practice," Wiley, 2002.
- [2] Short, T. A., "Electric Power Distribution Handbook," 2nd ed., CRC Press, 2014.
- [3] Wadhwa, C. L., "Electric Power Systems," 2nd ed., New Age International, 2003.
- [4] Khandpur, R. S., "Basic Electrical Engineering," 2nd ed., Tata McGraw-Hill, 2009.
- [5] IEEE Standard 141-1993, "IEEE Green Book: Standard for Electric Power Distribution," IEEE, 1993.
- [6] Haijun Liu, Hari Singh and D. Walder, "New Triple-Single reclosers improve distribution reliability," 2001 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 45th Annual Conference (Cat. No.01CH37214), Little Rock, AR, USA, 2001, pp. D2/1-D2/6, doi: 10.1109/REPCON.2001.949525.

- [7] CPFL Energia. GED-120: Guia de Especificação de Dispositivos de Proteção para Redes de Distribuição. Disponível em: <https://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-120.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- [8] P. E. Sutherland and T. A. Short, "Effect of Single-Phase Reclosing on Industrial Loads," *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, 2006*, pp. 2636-2644, doi: 10.1109/IAS.2006.256912.
- [9] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8: Proteção e Manobras*. Brasília, DF: ANEEL, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- [10] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 5: Qualidade do Fornecimento*. Brasília, DF: ANEEL, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- [11] C. C. Barioni de Oliveira, H. P. Schmidt, N. Kagan e E. J. Robba "Introdução a Sistemas Elétricos de Potência: Componentes Simétricas", 2ª Edição, Ed. Blucher, pp.1-484, 2000.
- [12] IEEE. *Standard 1547 – IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power system interfaces*. Nova York, 2018.
- [13] N. Kagan, C. C. Barioni de Oliveira e E. J. Robba, "Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", 2ª Edição, Ed. Blucher, pp.1-328, 2010.