



UMA PROPOSTA PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADE DO FENÔMENO VTCD EM INSTALAÇÕES SUPRIDAS COM TRANSFORMADORES DELTA-ESTRELA ATERRADO

Adrian Ribeiro Ferreira*¹, José Carlos de Oliveira², Paulo Henrique Oliveira Rezende³

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

²FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

³FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são fenômenos responsáveis por alterações do valor eficaz das tensões de suprimento por tempos inferiores a 3 minutos. Muito embora sua pequena duração, as mesmas exercem grande influência no funcionamento das cargas e mesmo podem interromper processos produtivos. Neste particular, as regulamentações aplicáveis ao estabelecimento dos padrões de qualidade, a nível nacional de internacional, apresentam diretrizes e limites para vários outros indicadores, todavia, quanto ao fenômeno aqui considerado, à nível de distribuição, estes foram recentemente contemplados pelo PRODIST-ANEEL. Muito embora ainda em estágios incipientes, fica evidenciado que, conjuntamente com as diretrizes normativas, a questão da identificação da responsabilidade das VTCDs, visando, sobretudo, consubstanciar as análises dos processos envolvendo reclamações por consumidores e eventuais medidas corretivas, suscitam a necessidade de mecanismos para uma clara atribuição se o fenômeno foi advindo da rede de suprimento ou do próprio consumidor. Este ponto se apresenta como cerne do presente trabalho, voltado para a apresentação de resultados de uma estratégia para os fins ora postos.

Palavras-Chave – Legislação, Qualidade da energia, responsabilidade de eventos, VTCD.

A PROPOSAL TO IDENTIFY VTCD PHENOMENA RESPONSIBILITY IN DELTA-STAR TRANSFORMERS SUPPLIED CONSUMMERS

Abstract – Short-Term Voltage Variations (VTCDs) are phenomena responsible for changes in the effective value of supply voltages for less than 3 minutes. Although their short duration, they exert great influence on the operation of loads and can even interrupt production processes. In this regard, the regulations applicable to the establishment of quality standards, at national and international level,

adrianrf.ufu@gmail.com

present guidelines and limits for several other indicators, however, regarding the phenomenon considered here, at distribution level, these were recently contemplated by PRODIST-ANEEL. Although still in its incipient stages, it is evident that, together with the normative guidelines, the issue of identifying the responsibility of the VTCDs, aiming, above all, to substantiate the analysis of processes involving consumer complaints and eventual corrective measures, raises the need for mechanisms for a clear attribution whether the phenomenon came from the supply chain or from the consumer himself. This point is presented as the core of the present work, aimed at presenting the results of a strategy for the purposes set out above.

Keywords – Standards, Power Quality, phenomena responsibility, VTCD.

I. INTRODUÇÃO

Os estudos envolvendo a área da Qualidade de Energia Elétrica se apresentam com o objetivo de analisar os fenômenos próprios à degradação dos suprimentos elétricos, visando, sobretudo, compatibilizá-los aos padrões mínimos estabelecidos pelas recomendações em vigor. Dentre os vários fatores impactantes e atinentes à matéria, um dos mais comuns refere-se às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs). As manifestações destes fenômenos se fazem presentes na forma de elevações, afundamentos e interrupções das tensões de suprimento, em que pese, para muitas situações a questão dos afundamentos. De um modo geral, estas anomalias ocorrem na forma de desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos, e, muito embora suas ocorrências se façam presentes em pequenos intervalos de tempo, as consequências podem ser drásticas. A Tabela I sintetiza a classificação dos distúrbios em pauta, em consonância com a ANEEL-PRODIST [1]. As três primeiras linhas correspondem a Variação Momentânea de Tensão, enquanto as demais, correspondem a Variação Temporária de Tensão.

Tabela I : Caracterização das VTCDs

Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Interrupção Momentânea de Tensão - IMT	Inferior ou igual a 3 (três) segundos	Inferior a 0,1 pu
Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT	Igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	Igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação Momentânea de Tensão - EMT	Igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	Superior a 1,1 pu
Interrupção Temporária de Tensão - ITT	Superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	Inferior a 0,1 pu
Afundamento Temporário de Tensão – ATT	Superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	Igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação Temporária de Tensão - ETT	Superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	Superior a 1,1 pu

Como mencionado, quando da ocorrência destes desvios das tensões dos suprimentos, o efeito se apresenta com expressivos impactos sobre as unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais. Isto se faz de grande relevância para todos os consumidores, todavia, os prejuízos operacionais e financeiros atrelados com instalações industriais e outras se apresentam em proporções bastante elevadas. A título de ilustração, as tabelas II e III ilustram custos típicos relacionados com a manifestação de VTCDs em diferentes tipos de indústrias, quando da parada de processos devido as VTCDs [2].

Tabela II : Perdas por VTCDs (União Europeia)

Indústria	Perdas Típicas por Evento (€)
Mercado Financeiro	6.000.000 (por hora)
Telecomunicações	30.000 (por minuto)
Produção de Semicondutores	3.800.000
Centro de Informática	750.000
Aço	350.000
Vidro	250.000

Tabela III : Perdas por VTCDs (Estados Unidos)

Indústria	Perdas Típicas por Evento (US\$)
Produção de Semicondutores	2.500.000
Processamento de cartão de crédito	250.000
Fabricação de Equipamentos	100.000
Automobilística	75.000
Fabricação de Papel	30.000
Indústria Química (plástico, vidro, etc)	5.000

Uma vez reconhecida a relevância do fenômeno ora considerado, a ANEEL, através do conhecido Procedimento da Distribuição – PRODIST, aponta para a questão da quantificação das VTCDs visando, certamente, o estabelecimento futuro de limites para tais fenômenos. Muito embora os desafios deste propósito, a estratégia indicada pela

referida agência aponta para a quantificação do fenômeno na forma de um indicador denominado por Fator de Impacto (FI). Esta grandeza se destina, como referido, a traduzir as ocorrências em termos de um número que venha a representar os quantitativos em termos de níveis, durações e relevâncias das variações de tensão registradas. Caso as monitorações conduzam a um valor superior ao limite estabelecido, é natural constatar que medidas punitivas na forma de ressarcimentos financeiros possam vir a ser requeridas pelos consumidores afetados, e ainda, que medidas corretivas devam ser conduzidas visando a compatibilização aos padrões estabelecidos.

Dentro da temática ora posta, a exemplo de qualquer outro indicador de qualidade da energia, surge uma questão de grande importância, a qual se encontra diretamente afeita à identificação da responsabilidade dos efeitos manifestados na forma das VTCDs. Isto se apresenta revestido de grande importância pois, naturalmente, a ocorrência de um distúrbio associado com as variações de tensão pode ser advinda da rede de suprimento ou da própria unidade consumidora. Em assim sendo [1], [3].

Estudos recentes voltados para o estabelecimento de mecanismos para atender aos requisitos acima postos podem ser identificados na literatura. Uma delas baseia-se na tensão residual presente no barramento e também na duração do evento [4]. Outro procedimento, vale-se do comportamento da potência do sistema, somando-se com o uso da “Short-Time Fourier Transform” e uma variação da mesma [5]. Outra estratégia é fundamentada em critérios de análise envolvendo informações relacionada com a potência, a corrente e as distorções harmônicas no sistema analisado [6]. Não obstante tais trabalhos investigativos, o fato é que, na atualidade não há uma proposta concreta que se apresente com características próprias à aplicação em campo, que ofereça segurança, confiabilidade e praticidade.

À luz dos fatos acima ponderados, o presente trabalho encontra-se direcionado a apresentar os fundamentos para o estabelecimento de uma metodologia visando atender aos requisitos postos. Tendo em vista que os trabalhos investigativos ainda se encontram numa etapa inicial, e também, reconhecendo que um número expressivo de consumidores é suprido através de transformadores com conexão delta-estrela aterrada, as bases e estudos conduzidos neste trabalho encontram-se, para o momento, centradas nesta configuração de suprimento.

Visando atender as metas estabelecidas, o trabalho se apresenta constituído por seções voltadas para uma síntese dos fundamentos aplicáveis à circuitos trifásicos, a proposta da metodologia, a caracterização de um arranjo para os estudos de casos e, por fim, a apresentação e discussão do desempenho da estratégia metodológica feita.

II. COMPONENTES SIMÉTRICAS

Classicamente, é sabido que um sistema trifásico não equilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados. Isto é, a adição de três sistemas equilibrados permite a representação de qualquer sistema de vetores trifásicos não equilibrados [7] [8]. O processo, de forma simplificada, é considerado a seguir [9].

A. Componentes de Sequência Positiva

Este se apresenta na forma de 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120°, e tendo a mesma sequência que os fasores da rede trifásica original.

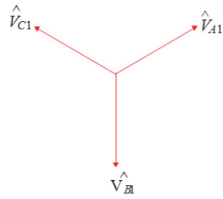


Figura 1 : Fasores da sequência positiva

B. Componentes de Sequência Negativa

Este arranjo se apresenta formado por 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120°, porém, com sequência da fases oposta a dos fasores originais.

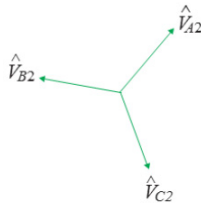


Figura 2 : Fasores da sequência negativa

C. Componentes de Sequência Zero

Por fim, o último conjunto de componentes equivale a 3 fasores iguais em módulo, com defasagem de 0° entre si.

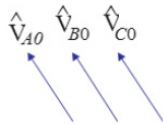


Figura 3 : Fasores da sequência zero

Didaticamente, a Figura 4 ilustra a forma tradicional através da qual as componentes de fase são adicionadas visando, como indicado, a reconstituição do sistema trifásico original, que se apresenta com um certo grau de desequilíbrio. A figura se apresenta, para maior clareza, constituída por um sistema com elevado nível de desequilíbrio.

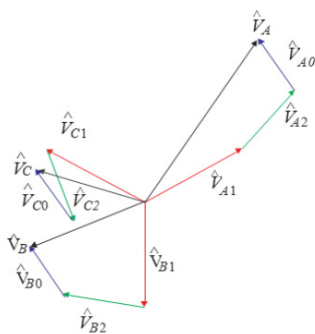


Figura 4 : Sistema Trifásico Desequilibrado original e suas componentes de sequência: positiva, negativa e nula

Somado a síntese para uma revisão dos conceitos acima posta, a questão ora tratada pode também ser considerada sob

o ponto de vista matemático. Assim, a partir das componentes de sequência, torna-se viável a obtenção dos fasores representativos das tensões originais, como a seguir:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{V}_{a_0} \\ \hat{V}_{a_1} \\ \hat{V}_{a_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Caso seja de interesse, é também possível o procedimento inverso, isto é, a partir dos fasores de fase A, B e C, determinar as grandezas de sequência positiva, negativa e zero. Assim procedendo chega-se às grandezas requeridas para a caracterização do nível de desequilíbrio de sequência negativa, convencionalmente denominado por Fator de Desequilíbrio de Tensão [1] – $FD\%$, o qual é calculado como segue:

$$FD\% = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Uma vez reconhecido que a grande maioria dos fenômenos associados com as VTCDs se apresentam de forma desequilibrada, este se apresenta como o fundamento para a metodologia destinada a atribuição da origem dos fenômenos tratados. De fato, tendo em vista que tais manifestações anômalas às redes se apresentam constituídas pelas componentes de sequência positiva, negativa e zero, tais grandezas se apresentam como alvo para o estabelecimento das premissas destinadas a atribuição da origem dos eventos. As bases para tal encontram-se alicerçadas nos cálculos das grandezas representativas das componentes de sequência aqui tratadas e, a partir dos valores obtidos e inspeção do comportamento de transferência do primário para o secundário do transformador, ou via inversa, estabelecer os critérios para identificação em pauta. Para tanto, uma vez estabelecida a topologia de um sistema elétrico típico, com identidade industrial, procede-se a uma sequência de eventos, atrelados com a ocorrência de curtos-circuitos, fenômenos estes responsáveis por um grande número de VTCDs. Naturalmente, outras situações poderiam ser adotadas para os estudos de desempenho, todavia, para o momento, esta foi a opção feita.

III. ESTUDO DE CASO

Com o intuito de se observar o comportamento do conteúdo das componentes simétricas durante a ocorrência de uma falta, os trabalhos investigativos foram conduzidos através de um arranjo de um sistema elétrico simples, composto por um suprimento advindo da concessionária, de um transformador com a conexão anteriormente estabelecida, cargas estáticas e dinâmicas e, por fim, um transformador interno à instalação do consumidor. O arranjo foi implementado na plataforma MATLAB/Simulink, empregando-se os parâmetros representativos dos componentes, como indicado na Tabela IV.

O motor equivalente foi adotado como uma máquina de indução de 9 MVA.

Tabela IV : Características do Sistema Estudado

Fonte:	Tensão: 138 kV; Nível de Curto: 500 MVA; X/R: 8;
Transformador 1:	Relação de Transformação: 138kV/13,8kV; - Potência: 20 MVA; - X%: 7%; - R%: 1%;
Transformador 2:	Relação de Transformação: 13,8kV/0,4kV; Potência: 10 MVA; X%: 6%; R%: 1%;
Cargas 1:	Potência: 4 MVA; Fator de Potência: 0,9 ind; Tipo de Ligação: Delta;
Cargas 2:	Potência: 4 MVA; Fator de Potência: 0,9 ind; Tipo de Ligação: Estrela aterrado;
Cargas 3:	Potência: 3 MVA; Fator de Potência: 0,9 ind; Tipo de Ligação: Delta;

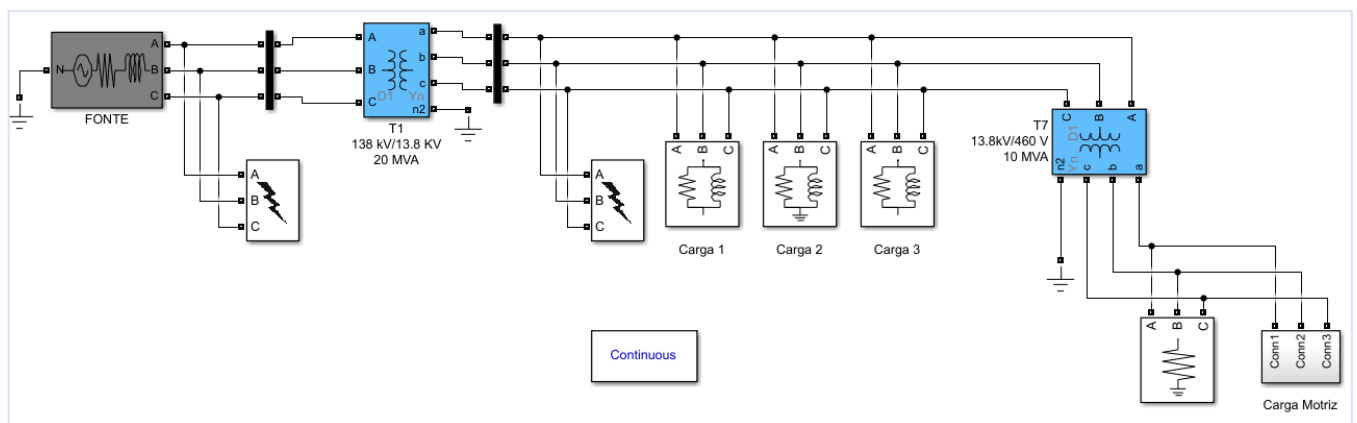


Figura 5 : Sistema Elétrico Estudado

IV. RESULTADOS

A Tabela V elucida os resultados encontrados para as simulações realizadas. Os valores representados estão em p.u, e, os valores de referência do primário e secundário do transformador são, respectivamente, 70939 V e 6134 V. Esses valores correspondem à tensão pré-falta em cada um dos lados dos transformadores.

De um modo geral as grandezas obtidas através da aplicação dos princípios da decomposição em componentes simétricas e respectivos valores para os fatores de desequilíbrio apontam para as seguintes constatações:

- As situações envolvendo os curtos circuitos desequilibrados do lado primário do transformador T1 evidenciam que o grau de desequilíbrio das tensões durante a ocorrência da falta (e do VTCD) se apresentaram em níveis muito próximos àqueles desequilíbrios do lado secundário do mesmo transformador;

Quanto aos estudos de casos foram aplicadas, durante um intervalo de tempo de 50 ms, as seguintes faltas:

- Faltas no primário do transformador T1- conexão delta;
- Faltas no secundário do transformador T1- conexão estrela aterrada.

Visando obter informações sobre o grau de influência dos níveis de desequilíbrios manifestados nas tensões, as faltas acima referidas foram ainda subdivididas em tipo fase-terra, fase-fase e trifásicas, sendo que para cada uma delas foram definidos distintos valores para as impedâncias de falta.

A seguir é feita uma síntese das situações consideradas no trabalho e que foram simuladas através do arranjo elétrico definido e modelado na plataforma computacional explicitada anteriormente.

- **Caso 1 – Curto Fase-Terra (F-T)** - Resistências de 10 Ω , 5 Ω e 0 Ω ;
- **Caso 2 – Curto Fase-Fase-Terra (FF-T)** - Resistências de 10 Ω , 5 Ω e 0 Ω ;
- **Caso 3 - Curto Fase-Fase (F-F)** – Resistências nula;
- **Caso 4 – Curto Trifásico-Terra (FFF-T)** – Resistências de 10 Ω , 5 Ω e 0 Ω ;

- Caso as faltas desequilibradas ocorram do lado secundário, durante a manifestação do VTCD, os níveis de desequilíbrios entre os dois lados do transformador T1 se mostram bastante distintas. Isto indica um caminho para o processo da identificação da responsabilidade do fenômeno para transformadores com a conexão aqui estabelecida e fenômenos desequilibrados;
- As observações acima apresentadas se mostram verdadeiras, como já dito, para faltas fase-terra e também fase-fase.
- Para as faltas equilibradas, como seria esperado, não foi possível observar as propriedades acima, indicando, pois, que, caso o fenômeno VTCD seja de natureza trifásica e equilibrada, o processo de identificação e comparação das componentes de sequência negativa não são aplicáveis para a identificação da responsabilidade aqui contemplada.

Tabela V : Resultados para as componentes simétricas – Falta fase-terra, fase-fase e trifásicas – com distintas impedâncias de faltas

Tipo de Falta	Resistência	Grandezas Observadas	Falta no Primário		Falta no Secundário	
			Primário	Secundário	Primário	Secundário
Fase A-T	10Ω	V1	0,716	0,715	0,998	0,993
		V2	0,299	0,301	0,008	0,03
		V0	0,335	0	0	0,026
		V2/V1	0,418	0,421	0,008	0,03
	5Ω	V1	0,692	0,692	0,994	0,982
		V2	0,312	0,313	0,017	0,059
		V0	0,35	0	0	0,051
		V2/V1	0,451	0,453	0,017	0,06
	0Ω	V1	0,68	0,68	0,902	0,655
		V2	0,321	0,321	0,099	0,345
		V0	0,36	0	0	0,31
		V2/V1	0,471	0,472	0,109	0,527
Fases AB-T	10Ω	V1	0,444	0,444	0,995	0,985
		V2	0,319	0,32	0,008	0,028
		V0	0,324	0	0	0,026
		V2/V1	0,719	0,722	0,008	0,028
	5Ω	V1	0,381	0,38	0,989	0,966
		V2	0,335	0,337	0,016	0,057
		V0	0,338	0	0	0,052
		V2/V1	0,881	0,887	0,016	0,059
	0Ω	V1	0,346	0,347	0,807	0,323
		V2	0,346	0,347	0,092	0,323
		V0	0,346	0	0	0,323
		V2/V1	1	0,999	0,114	1
Fases ABC-T	10Ω	V1	0,271	0,271	0,993	0,979
		V2	0,001	0,002	0,001	0,002
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	0,004	0,006	0,001	0,002
	5Ω	V1	0,143	0,143	0,983	0,953
		V2	0,002	0,004	0	0,001
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	0,011	0,026	0	0,002
	0Ω	V1	0	0	0,715	0
		V2	0	0,001	0	0
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	2,711	6,016	0	5,301
Fases A-B	0,001Ω	V1	0,501	0,502	0,859	0,503
		V2	0,501	0,502	0,143	0,502
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	1	1,001	0,167	1

V. CONCLUSÕES

Como explicitado ao longo do artigo, seu objetivo central, que se revestiu da busca de uma metodologia para a identificação da origem dos fenômenos VTCDs, apresentou indicativos bastante promissores para uma resposta à questão da atribuição da responsabilidade dos eventos ora considerados.

De fato, muito embora os estudos tenham se restringido a instalações que utilizam um suprimento elétrico através de transformadores abaixadores com conexão delta-estrela aterrada, a metodologia baseada na correlação entre os níveis de desequilíbrios presentes no lado primário e secundário destes, indicaram comportamentos que podem nortear estratégias de análise consistentes.

Fica, todavia, a ressalva que os resultados encorajadores se apresentam, como já referidos, limitados aos transformadores com a conexão esclarecida (os quais representam a grande maioria das instalações reais), e ainda, a fenômenos relacionados com variações de tensão de modo desequilibrado.

O reconhecimento acima feito não implica, todavia, que avanços atrelados com os mesmos princípios postos não possam ser aplicados para outras situações. De fato, outros fatores de influência, a exemplo dos indicativos associados com os níveis dos Fatores de Sequência Zero, dentre outras características, podem, efetivamente, abrir horizontes para a solução dos desafios aqui apresentados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica,” 2018.
- [2] A. A. R. F. Salim, K. M. Nor, D. M. Said, “Voltage Sags Cost Estimation for Malaysian Industries,” *IEEE International Conference Power & Energy (PECON)*, Malaysia, p. 6, 2014.
- [3] ONS, “Submódulo 25.6 Indicadores de qualidade de energia elétrica – frequência e tensão,” 2010.
- [4] C. Noce, M. De Santis, and P. V. P. Varilone, “Comparison of Methods Using only Voltage Measurements for Detecting the Origin of Voltage Sags in the Modern Distribution Networks,” *IEEE*, Italy, p. 6, 2018.
- [5] A. A. I. Hussain Shareef, Azah Mohamed, “Identification of voltage sag source location using S and TT transformed disturbance power,” *Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, p. 15, 2013.
- [6] S.-J. Ahn, D.-J. Won, Y. Chung, and S. Moon, “A New Approach to Determine the Direction and Cause

of Voltage Sag,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, p. 8, 2008.

- [7] J. W. Resende, *Apostila: Análise de Sistemas de Energia Elétrica*. Uberlândia - Brasil.
- [8] W. D. Stevenson, *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, 2nd ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [9] R. O. da Silva, “Análise de faltas simétricas e assimétricas na rede primária de distribuição da Universidade Federal da Paraíba,” Universidade Federal da Paraíba, 2017.