



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

ADRIAN RIBEIRO FERREIRA

**Uma Proposta Metodológica para a Atribuição da  
Responsabilidade das VTCDs baseada na  
Correlação dos Fatores de Desequilíbrio**

Uberlândia  
2021

ADRIAN RIBEIRO FERREIRA

**Uma Proposta Metodológica para a Atribuição da Responsabilidade das VTCDs baseada na Correlação dos Fatores de Desequilíbrio**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

**Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira**

Uberlândia  
2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F383  
2021

Ferreira, Adrian Ribeiro, 1995-

Uma proposta metodológica para a atribuição da  
responsabilidade das VTCDs baseada na correlação dos  
fatores de desequilíbrio [recurso eletrônico] / Adrian  
Ribeiro Ferreira. - 2021.

Orientador: José Carlos de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.377>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Oliveira, José Carlos de,  
1947-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

ADRIAN RIBEIRO FERREIRA

**Uma Proposta Metodológica para a Atribuição da Responsabilidade das  
VTCDs baseada na Correlação dos Fatores de Desequilíbrio**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Uberlândia, 23 de julho de 2021

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira – UFU (Orientador)

---

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende – UFU

---

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho – UNIFEI



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 758, PPGEELT				
Data:	Vinte e três de julho de dois mil e vinte e um	Hora de início:	09:30	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11912EEL002				
Nome do Discente:	Adrian Ribeiro Ferreira				
Título do Trabalho:	Uma proposta metodológica para a atribuição da responsabilidade das VTCDs baseada na correlação dos fatores de desequilíbrio.				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade da energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Paulo Henrique Oliveira Rezende (coorientador) - FEELT/UFU; José Maria de Carvalho Filho - UNIFEI; José Carlos de Oliveira - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Carlos de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **JOSE CARLOS DE OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 23/07/2021, às 12:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/07/2021, às 12:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **José Maria de Carvalho Filho, Usuário Externo**, em 26/07/2021, às 10:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2894541** e o código CRC **60305C90**.

---

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Nivaldo e Margarida, que me inspiram todos os dias da minha vida e sempre me ensinaram o significado de amar. Dedico, também, ao meu padrinho Tarcísio, que estará sempre em meu coração e sei que estará torcendo lá de cima por mim.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre cuidando de mim e iluminando cada passo percorrido durante toda a minha vida.

Aos meus pais, Nivaldo e Margarida, e minhas irmãs, Renata e Maria Clara, por todo ensinamento, companheirismo e amor, que me foi ensinado. Tudo que eu tenho e sou é graças a vocês e é por vocês. Agradeço também a toda minha família, que me ensinaram que com luta, determinação e humildade, tudo é possível. Levo vocês todos em meu coração.

A minha companheira, amiga e namorada, Maya, por todo apoio, amor, parceria e companheirismo que você tem me proporcionado durante todos esses anos.

Agradeço, particularmente, ao meu grande orientador, o Professor José Carlos de Oliveira, por todos ensinamentos, incentivos, ajudas que o senhor proporcionou durante essa trajetória. Com certeza, sou uma pessoa muito melhor hoje. Agradeço, em especial, ao Professor Paulo Henrique, por todo apoio e suporte oferecido durante todos esses anos de pesquisa.

A todos os meus colegas do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE) e UFU, Vinícius, Bárbara, Raquel, Ábner, Humberto, Arthur, Camila, Celso, Fabrício, Giordanni, Leonardo, Luiz, Márcio, Luciano, Leandro, Guilherme por todo apoio e suporte durante essa trajetória.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Professor Ivan Nunes, Antônio Carlos, José Rubens, José Wilson, Isaque e Hélder, por todos os ensinamentos passados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e a Universidade Federal de Uberlândia por proverem todos os recursos necessários para a realização deste trabalho.

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



---

*“ Em tudo dai graças, porque esta é a vontade  
de Deus em Cristo Jesus para convosco.”*

*Tessalonicenses 5:18*

---

# RESUMO

---

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são fenômenos que, embora ocorram durante um curto intervalo de tempo, podem resultar em expressivos impactos sobre redes de transmissão/distribuição ou consumidores. Não obstante o tema se apresente contemplado na legislação nacional através dos denominados Fatores de Impacto (FI) que quantificam as ocorrências, não há, todavia, qualquer menção à questão da responsabilidade do evento. Visando oferecer meios para a identificação da origem dos fenômenos, a presente dissertação de mestrado encontra-se focada na proposição de uma estratégia visando a atribuição de responsabilidade do distúrbio aqui considerado. O método encontra-se embasado no emprego de indicadores relacionados com os fatores de desequilíbrios de tensão e corrente, e seus processos de transferência, através dos arranjos utilizados para as conexões dos enrolamentos primário e secundário dos transformadores. A proposta se apresenta como uma alternativa às proposições encontradas na literatura, as quais, até o momento, não evidenciam processos de análise consolidados para uso em campo. Para atender aos propósitos da pesquisa, o trabalho é iniciado com uma fundamentação teórica, baseada na teoria clássica de sistemas elétricos, a partir da qual são estabelecidos os princípios que regem a correlação entre os fatores de desequilíbrios determinados para, um e outro lado, dos transformadores que estabelecem as conexões entre dois agentes envolvidos no estudo, a saber, uma rede a montante e outra a jusante da unidade de interligação dos sistemas. Estabelecido o princípio metodológico, estudos de cunho matemático e computacional são conduzidos envolvendo técnicas de modelagem no domínio da frequência e do tempo. Através de análises dos resultados de desempenho obtidos, é feita uma avaliação da consistência do processo, sua factibilidade para uso em campo e perspectivas quanto ao atendimento aos propósitos estabelecidos.

**Palavras chave:** Desequilíbrios; Legislação; Qualidade da Energia; Responsabilidade de Eventos; Variações de Tensão de Curta Duração.

---

# ABSTRACT

---

Short Duration Voltage Variations (VTCDs) are phenomena that, although occurring during a short period of time, can result in significant impacts on transmission/distribution networks or consumers. Notwithstanding the fact that this subject is contemplated in national legislation through the so-called Impact Factors (IF) that quantify the occurrences, there is, however, no mention of the issue of responsibility for the event. Aiming to offer ways to identify the origin of the phenomena, this master's dissertation is focused on the proposition of a strategy aimed at attributing responsibility for the herein considered phenomenon. The method is based on the use of indicators related to the factors of voltage and current imbalances, and their transference processes, through the arrangements used for the connections of the transformers primary and secondary windings. The proposal is presented as an alternative to the propositions found in the literature, which, so far, do not show consolidated analysis processes for use in the field. To meet the purposes of the research, the work begins with a theoretical grounds, based on the classical theory of electrical systems, from which the principles governing the correlation between the imbalance factors determined for both sides of the transformers that establish the connections between two agents involved in the study, namely, an upstream and a downstream network of the systems interconnection unit. Once the methodological principle has been established, mathematical and computational studies are carried out involving modelling techniques in the frequency and time domain. Through analysis of the performance results obtained, an evaluation of the consistency of the process, its feasibility for use in the field and perspectives regarding the fulfilment of the established purposes is carried out.

**Keywords:** Voltage Imbalances; Legislation; Power Quality; Phenomenon Responsibility, Short-Term Voltage Variations, Voltage Sags.

---

# Sumário

## CAPÍTULO 1

---

### CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

1.1 Considerações Iniciais.....	18
1.2 Objetivos gerais da dissertação: .....	23
1.3 Objetivos específicos: .....	23
1.4 Estrutura da dissertação:.....	23

## CAPÍTULO 2

---

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações iniciais .....	25
2.2 Componentes Simétricas .....	25
2.3 Curtos-circuitos como fontes para as VTCDs.....	27
2.3.1 Falta Fase-terra .....	29
2.3.2 Falta Fase-Fase .....	29
2.3.3 Falta Fase-Fase-terra .....	30
2.4 Tensões e correntes de sequência nos terminais do transformador de conexão.....	31
2.4.1 Falta a montante do transformador de conexão: .....	32
2.4.2 Falta a jusante do transformador de conexão: .....	36
2.5 Considerações finais.....	39

## CAPÍTULO 3

---

### MÉTODO DE ANÁLISE PROPOSTO

3.1 Considerações iniciais .....	41
3.2 Conexões trifásicas dos transformadores empregados pelo setor elétrico nacional.....	42
3.3 Classificação das VTCDs quanto a sua natureza .....	43
3.4 Sistema elétrico teste para os estudos matemáticos de desempenho do método .....	44
3.5 Avaliação matemática da proposta metodológica para a atribuição da responsabilidade das VTCDs .....	46
3.5.1 Falta no primário do transformador: .....	46
3.5.2 Falta no secundário do transformador: .....	48
3.6 Considerações finais.....	49

---

## CAPÍTULO 4

---

### AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE ANÁLISE

4.1 Considerações iniciais .....	51
4.2 Sistema elétrico teste para os estudos computacionais de desempenho do método.....	51
4.3 Desempenho da metodologia para transformadores $\Delta - Y_n$ .....	54
4.3.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora .....	54
4.3.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora .....	57
4.4 Desempenho da metodologia para transformadores com outras conexões comerciais.....	58
4.4.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora .....	58
4.4.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora .....	59
4.5 Análise dos efeitos de pré-desequilíbrios presentes na rede de suprimento .....	61
4.5.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora .....	61
4.5.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora .....	63
4.6 Análise dos efeitos de pré-desequilíbrios presentes na unidade consumidora.....	64
4.6.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora .....	64
4.6.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora .....	66
4.7 Comparação entre os desenvolvimentos matemáticos e a simulação computacional.....	67
4.7.1 Avaliação comparativa dos desequilíbrios de tensão e corrente - transformador $\Delta - Y_n$ ....	67
4.7.2 Avaliação comparativa dos desequilíbrios de tensão e corrente - transformador $Y - \Delta$ .....	68
4.7.3 Avaliação comparativa dos desequilíbrios de tensão e corrente - transformador $Y_n - Y_n$ ..	69
4.8 Considerações finais.....	69

---

## CAPÍTULO 5

---

### CONCLUSÕES

Conclusões .....	71
------------------	----

---

### SEÇÕES COMPLEMENTARES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
APÊNDICE .....	77

---

# Lista de Figuras

Figura 1.1 Porcentual de ocorrência de distúrbios associados com a Qualidade da Energia Elétrica. ....	19
Figura 1.2 Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração. ....	19
Figura 1.3 Exemplos de custos relacionados às VTCDs.....	21
Figura 2.1 Componentes de sequência (a) positiva, (b) negativa e (c) zero, e (d) na estrutura original das tensões trifásicas desequilibradas. ....	26
Figura 2.2 Representação para uma falta fase-terra .....	29
Figura 2.3 Representação para uma falta fase-fase. ....	29
Figura 2.4 Representação para uma falta fase-fase-terra. ....	30
Figura 2.5 Sistema base utilizado para os desenvolvimentos matemáticos. ....	31
Figura 2.6 Circuito elétrico equivalente para a sequência positiva – falta a montante do transformador. ....	32
Figura 2.7 Circuito elétrico equivalente para a sequência negativa – falta a montante do transformador. ....	32
<i>Figura 2.8 Circuito elétrico equivalente para a sequência zero – falta a montante do transformador</i> .....	33
<i>Figura 2.9 Equivalente de sequência zero do transformador em função</i> .....	33
Figura 2.10 Circuito elétrico para a sequência positiva (falta no lado do cliente).....	37
Figura 2.11 Circuito elétrico para a sequência negativa (falta no lado do cliente).....	37
Figura 2.12 Circuito elétrico para a sequência negativa, representação com o .....	37
Figura 3.1 Tipos de VTCDs conforme Math Bollen.....	43
Figura 3.2 Sistema elétrico 1.....	44
Figura 3.3 Diagrama unifilar representativo do sistema elétrico. ....	45
Figura 3.4 Sistema elétrico 1 na plataforma Matlab-Simulink. ....	45
Figura 4.1 Sistema elétrico 2 na plataforma Matlab-Simulink. ....	53
Figura 4.2 Oscilogramas de Tensão (a) e Corrente (b) no lado do primário do transformador – VTCD produzida do lado do supridor – transformador $\Delta - Y_n$ . ....	54
Figura 4.3 Oscilogramas de Tensão (a) e Corrente (b) no lado do secundário do transformador – VTCD produzida do lado do supridor – transformador $\Delta - Y_n$ . ....	55
Figura 4.4 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do supridor – transformador $\Delta - Y_n$ . ....	56
Figura 4.5 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – transformador $\Delta - Y_n$ . ....	57

---

Figura 4.6 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do supridor – Diferentes conexões de transformadores. ....	59
Figura 4.7 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – Diferentes conexões de transformadores.....	60
Figura 4.8. Fatores de desequilíbrios de Tensão e Corrente de sequência negativa e zero – pré-desequilíbrio imposto ao supridor – transformador $\Delta - Yn$ . ....	61
Figura 4.9. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do supridor – Pré-desequilíbrio na rede.....	62
Figura 4.10. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – Pré-desequilíbrio na rede.....	63
Figura 4.11. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) para um pré-desequilíbrio nas cargas da unidade consumidora.....	64
Figura 4.12. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do supridor – Pré-desequilíbrio nas cargas da unidade consumidora.....	65
Figura 4.13. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – Pré-desequilíbrio nas cargas da unidade consumidora. ....	66
Figura 4.14. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero para a ligação $\Delta - Yn$ : Comparação entre valores encontrados através do software MATLAB-Simulink e Equações Matemáticas.....	68
Figura 4.15. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero para a ligação $Y - \Delta$ : Comparação entre valores encontrados através do software MATLAB-Simulink e Equações Matemáticas.....	68
Figura 4.16. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero para a ligação $Yn - Yn$ : Comparação entre valores encontrados através do software MATLAB-Simulink e Equações Matemáticas.....	69

---

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Custos/prejuízos associados com a incidência de VTCDs (União Europeia e Estados Unidos).....	20
Tabela 2.1 Correntes de sequência zero do lado primário do transformador em função do tipo de conexão de seus enrolamentos .....	34
Tabela 2.2 Expressões das tensões de sequência zero em função do tipo de conexão do transformador .....	34
Tabela 2.3 Defasamentos angulares associados pelos tipos de conexão do primário e.....	34
Tabela 2.4 Expressões para as correntes de sequência zero – lado.....	35
Tabela 2.5 Expressões para as tensões de sequência zero – lado do secundário – .....	35
Tabela 2.6 Correntes de sequência zero do lado secundário do transformador .....	38
Tabela 2.7 Tensões de sequência zero do lado secundário do transformador.....	38
Tabela 2.8 Correntes de sequência zero do lado primário do transformador.....	38
Tabela 2.9 Tensões de sequência zero do lado primário do transformador .....	38
Tabela 3.1 Tipos de conexões de transformadores mais utilizados pelas concessionárias distribuidoras no Brasil .....	42
Tabela 3.2 Parâmetros do sistema elétrico 1.....	45
Tabela 4.1 Parâmetros do sistema elétrico 2.....	52



---

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>CIGRÉ</i>	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
FD	Fator de Desequilíbrio
FD <sub>2</sub>	Fator de Desequilíbrio de Sequência Negativa
FD <sub>0</sub>	Fator de Desequilíbrio de Sequência Zero
FD <sub>v</sub>	Fator de Desequilíbrio de Tensão
FD <sub>1</sub>	Fator de Desequilíbrio de Corrente
<i>FD2v</i>	Fator de Desequilíbrio de Tensão de Sequência Negativa
<i>FD0v</i>	Fator de Desequilíbrio de Tensão de Sequência Zero
<i>FD2i</i>	Fator de Desequilíbrio de Corrente de Sequência Negativa
<i>FD0i</i>	Fator de Desequilíbrio de Corrente de Sequência Zero
FI	Fator de Impacto
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
VTCDs	Variações de Tensão de Curta Duração

# CAPÍTULO 1

---

## CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

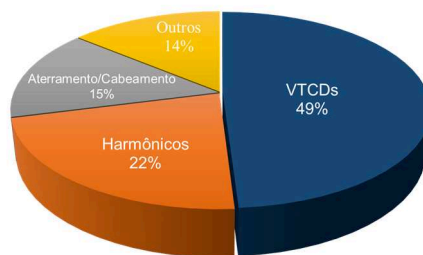
Em virtude dos diversos avanços ocorridos no setor da engenharia elétrica, quer no que se refere as instalações e componentes dos sistemas supridores ou consumidores, os padrões da qualidade da energia elétrica crescem em exigências. Neste sentido, os indicadores de serviço e do produto associados com os fornecimentos de energia elétrica se apresentam com grandezas que objetivam, dentre outros aspectos, a garantia operacional, a segurança e a confiabilidade do funcionamento apropriado das redes elétricas e seus componentes, assim como também das unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais [1]

Somado às questões de ordem técnica e econômica, há ainda a se considerar aspectos relacionados com as relações comerciais entre as partes e atreladas com os deveres e direitos previstos na legislação nacional através dos códigos de defesa do consumidor, visto a relação comercial e os amparos oferecidos pela legislação do país [2]. Estes pontos motivaram o estabelecimento de normas nacionais nos termos estabelecidos pelas agências regulatórias: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Operador Nacional do Sistema (ONS) [3], [4]. A primeira, diretamente afeita ao cenário da distribuição e a segunda direcionada ao processo regulatório da geração e transmissão da energia elétrica.

Tendo em vista o campo de atuação da ANEEL, a questão da determinação das diretrizes associadas com a qualidade dos suprimentos elétricos aos consumidores encontra-se claramente exposta no documento normativo denominado por Procedimentos da Distribuição (PRODIST), em seu Módulo 8 [3]. Este contempla os indicadores visando a garantia dos padrões de suprimento, estabelecendo definições, formulações, limites, etc. para distintos fenômenos, reconhecidamente impactantes sobre a qualidade da energia, a saber: distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão, variações de frequência, variações de tensão de longa e curta duração, dentre outros fatores. Não obstante o reconhecimento da importância de todos os fenômenos ora postos, um dos eventos anômalos mais reclamados refere-se às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs),

como indicado na Figura 1.1, a qual expressa, quantitativamente, os tipos de distúrbios identificados nos Estados Unidos e focado em questões da correlação entre supridores e consumidores.

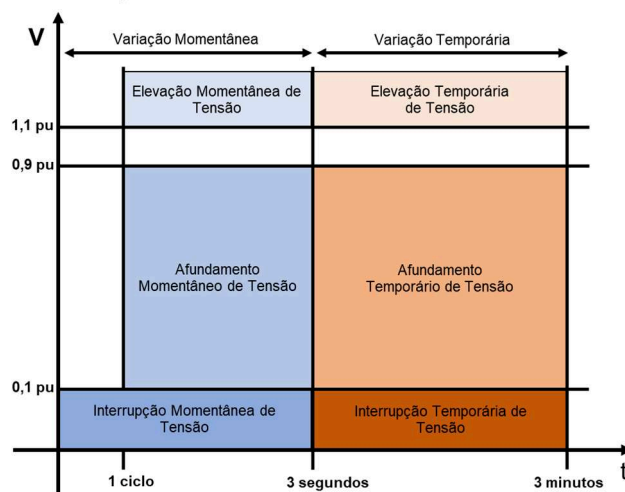
**Figura 1.1 Porcentual de ocorrência de distúrbios associados com a Qualidade da Energia Elétrica.**



Fonte: Adaptado de [5].

Segundo o PRODIST - Módulo 8, as VTCDs são definidas como: “desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos”, e são categorizadas de acordo com a Figura 1.2, conforme suas amplitudes e duração.

**Figura 1.2 Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.**



Fonte: Adaptado de [6].

Visando exemplificar eventuais consequências das VTCDs, apresenta-se, a seguir, algumas situações práticas que elucidam a correlação de processos fabris diante da ocorrência destes fenômenos.

Em [7] e [8] são apresentados os efeitos das VTCDs em uma indústria do ramo alimentício da área de trigo e derivados, cujas consequências, dentre outras, são: o tempo médio para o reestabelecimento do sistema elétrico (não do produtivo) gira em torno de 15 min após cada interrupção do processo produtivo; ocorrem rejeições do produto logo após o estabelecimento, pois o mesmo não se torna homogêneo; as linhas de transporte requerem um tempo médio de 2 horas para a liberação da linha de produção; podem ocorrer queimas dos módulos de entrada e saídas de CLPs, e também, em sensores dos processos da indústria e erros de leitura das variáveis do processo pelo CLP. A referência aqui utilizada relata que, em um período de doze meses, foram contabilizados 170

desligamentos provocados por VTCDs, acumulando assim um prejuízo de cerca de 1 milhão de reais, somente com a parada de produção, sem acrescentar custos das horas paradas para manutenção nos equipamentos e processos, bem como, queima de componentes em função dos desligamentos.

Num outro segmento industrial cita-se a automobilística, hoje está inserida no conceito da indústria 4.0, com grande emprego de automação e inteligência artificial [9], [10]. Uma das fábricas de maior volume de produção no Brasil menciona que produz mais do que 1 veículo por minuto [11]. Para a indústria considerada, no ano de 2019, foram totalizadas 36h de parada para todas suas unidades fabris no Brasil. Estes números, por si só, esclarecem a relevância da continuidade operacional das empresas e seus efeitos na forma de prejuízos econômicos [12].

No setor de telecomunicações [13], devido ao grande consumo e processamento de dados, uma boa qualidade de energia é primordial, simples erros de informações e, interrupções de serviços devido ao mau funcionamento de aparelhos, relacionados a afundamentos de tensão, podem gerar prejuízos significativos a uma grande quantidade de clientes, provocando danos em cadeia e prejudicando o andamento dos serviços.

No campo têxtil [14] reconhece-se que sua estrutura de produção inúmeros equipamentos, dentre os quais estão as extrusoras, inversores de frequência, bobinadoras e malhas de controle. Estas se apresentam como as cargas mais críticas do processo. Para este complexo, a ocorrência de uma VTCD com duração entre 6 e 10 ciclos ocasiona interrupção da produção, cuja retomada exige horas de trabalhos. A referência [15] relata que as perdas de produção em 10 meses de funcionamento chegaram a US\$ 280.000,00.

Na área da produção de celulose, o trabalho [16] cita o caso de uma empresa nacional que relata o emprego de drivers de velocidade, com grande sensibilidade quanto a operação e integridade física de seus componentes, que experimentou paradas e queima de componentes quando ocorriam eventos relacionados a qualidade da energia elétrica.

Sintetizando informações relacionadas com prejuízos financeiros atrelados com a incidência de VTCDs, a Tabela 1.1 exemplifica, por tipo de unidade consumidora industrial e comercial, valores ilustrativos das consequências da incidência dos fenômenos aqui referidos [17].

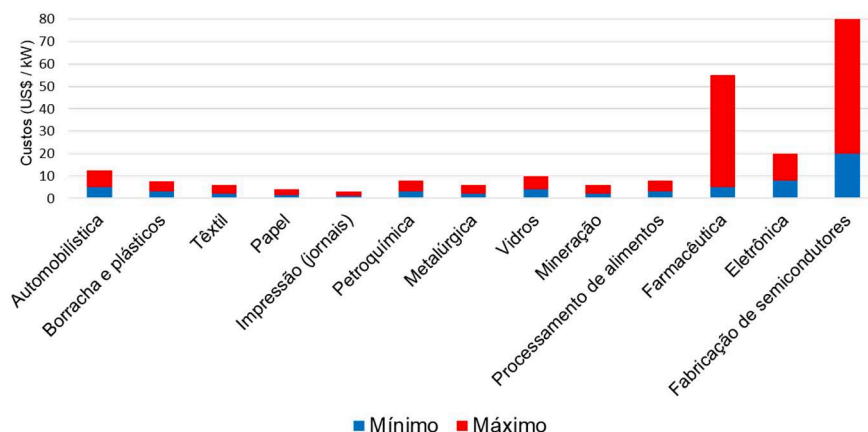
**Tabela 1.1 Custos/prejuízos associados com a incidência de VTCDs (União Europeia e Estados Unidos)**

<b>Tipo de Indústria</b>	<b>Perdas Típicas por Evento (€ ou US\$)</b>	<b>País/Região</b>
Mercado Financeiro	6.000.000 (por hora)	UE
Telecomunicações	30.000 (por minuto)	UE
Produção de Semicondutores	3.800.000	UE
Centro de Informática	750.000	UE
Aço	350.000	UE
Vidro	250.000	UE
Fabricação de Equipamentos	100.000	EUA
Automobilística	75.000	EUA
Fabricação de Papel	30.000	EUA
Indústria Química (plástico, vidro, etc)	5.000	EUA

Fonte: Adaptado de [17].

Complementarmente, evidencia exemplos de prejuízos financeiros causados em decorrência das VTCDs, conforme indicado na Figura 1.3.

*Figura 1.3 Exemplos de custos relacionados às VTCDs.*



Fonte: Adaptado de [18].

Diante do exposto fica evidenciado que, efetivamente, há grandes consequências negativas provocadas pelos eventos, sejam eles relacionados com tempos requeridos para a restauração de processos, danos em componentes e instalações e, por fim, questões de ordem econômicas. Assim sendo, medidas mitigatórias e atribuições de responsabilidades sobre o ocorrido se fazem, muitas vezes, necessárias.

Focando, pois, a questão da origem do fato ocorrido surge a temática da identificação da responsabilidade dos distúrbios e, de forma pontual, das VTCDs. A resposta a esta pergunta se apresenta como objetivo central da presente dissertação.

A temática do compartilhamento e/ou identificação das responsabilidades sobre os eventos vinculados ao cenário da Qualidade da Energia vem sido bastante debatida e investigada nos últimos anos. Os avanços obtidos no contexto das distorções harmônicas, por exemplo, se mostram promissores através de metodologias apresentadas em diversos trabalhos [19], [20] e [21]. Também, questões próprias aos desequilíbrios das tensões encontram-se contempladas em várias pesquisas [22]. Não obstante tais considerações, em se tratando das VTCDs, é importante frisar que o termo compartilhamento já não se torna apropriado pois, para tais eventos, a atribuição da responsabilidade se apresenta de modo mais aplicável. Neste último aspecto, pode-se identificar alguns trabalhos publicados que, resumidamente, são considerados a seguir:

- Em [23] tem-se uma proposta baseada em medições conduzidas em diversos barramentos da rede, sendo em cada um monitorada a tensão residual, ou seja, a tensão remanescente associada com a VTCD, o instante de tempo em que o evento ocorre e a sua duração. Após a coleta dos dados, os mesmos são analisados, e cada variável coletada é correlacionada com as demais grandezas, nos diferentes barramentos. Isto é feito com o intuito de se definir se a falta ocorreu a montante ou a jusante do ponto físico analisado. É importante ressaltar que o método

necessita de uma rede bem estruturada e auxiliada com diversos medidores com o intuito de garantir a segurança do método analisado;

- A referência [24] apresenta uma metodologia baseada nas impedâncias pré e pós falta. Para tanto é feita uma análise da parte real e da imaginária destas grandezas, e ainda, dos ângulos das correntes antes e durante a falta. Após a junção das informações é feito um pós-processamento visando a identificação da origem da variação de tensão de curta duração. O método se esbarra em dificuldades inerentes à obtenção das grandezas requeridas e sua eficácia foi constatada como baixa;
- O trabalho apresentado [25] é fundamentado em medições dos desvios dos valores de correntes em diferentes barramentos do sistema, para as condições: pré e durante a falta. Novamente, é necessário o monitoramento em diferentes barramentos do sistema, e também, um considerável esforço na análise dos dados;
- Já [26] aborda a questão através de um processo alicerçado em medições de correntes, potências ativas e distorções harmônicas. As variáveis são medidas antes, durante e, em alguns casos, após os eventos. Observando o comportamento das grandezas determina-se a origem do evento causador da falta e, por conseguinte, da VTCD. A necessidade de diferentes medições, em variados instantes de tempo, acarreta dificuldades para as aplicações práticas do método proposto;
- Numa outra via, tem-se [27], que propõe um processo de análise utilizando a Transformada Rápida de Fourier e uma complementação da mesma. As tensões e correntes são monitoradas e tratadas, conduzindo a identificação da origem do evento. O método necessita de considerável nível de processamento computacional para sua utilização;
- Por fim, em [28] o processo da identificação da responsabilidade das VTCDs é feito através de informações relacionadas ao comportamento do fluxo de potência antes e durante o afundamento de tensão, analisando valores obtidos nos quadrantes real e imaginário, antes e durante o evento. O método também requer o conhecimento das impedâncias das componentes de sequências para a sua aplicação.

Sintetizando, destaca-se que, em termos aplicativos em campo, até o momento, não há registros conclusivos sobre a eficácia das propostas, não obstante o reconhecimento das bases sólidas que as sustentem. Diante desta realidade, esta pesquisa encontra-se direcionada à proposição de uma estratégia alternativa, a qual será conceitualmente explorada e computacionalmente avaliada quando às suas perspectivas práticas.

## **1.2 Objetivos gerais da dissertação:**

Este trabalho de pesquisa, em consonância com os requisitos necessários para a conclusão do programa de mestrado em engenharia elétrica, encontra-se revestido do objetivo da proposição e validação computacional de uma metodologia alternativa para a identificação da origem dos fenômenos designados por Variações de Tensão de Curta Duração. A ideia central está fundamentada na obtenção de indicadores associados com os desequilíbrios nas redes elétricas, visando o estabelecimento de um processo, simples e eficaz, para a determinação da responsabilidade dos fenômenos aqui tratados. Somado aos fundamentos metodológicos, estudos computacionais visando a validação da proposta são conduzidos de forma a evidenciar sua factibilidade e perspectivas práticas.

## **1.3 Objetivos específicos:**

Com vistas ao atendimento às metas supra postas, as atividades contempladas nesta dissertação se apresentam constituídas por etapas específicas, com os seguintes focos:

- Apresentação da fundamentação teórica conceitual e matemática do processo de análise;
- Realização de estudos através de simulações computacionais voltadas para a avaliação da consistência e robustez do processo de análise;
- Análise do desempenho da eficácia do método para distintas configurações dos transformadores de conexão;
- Discussões associadas com a factibilidade da proposta para emprego em campo.

## **1.4 Estrutura da dissertação:**

Em consonância com os objetivos supra estabelecidos, além deste capítulo introdutório ao tema, a organização da presente dissertação de mestrado se apresenta com a seguinte estrutura organizacional:

### **Capítulo 2: Fundamentação Teórica**

Neste capítulo serão apresentadas as informações teóricas necessárias para a fundamentação metodológica, sintetizando os princípios que norteiam o processo de análise através dos recursos oferecidos pelas clássicas componentes simétricas, desequilíbrios de tensão, faltas trifásicas desequilibradas, dentre outras informações decorrentes destas. Somado aos aspectos conceituais, nesta etapa é realizado o desenvolvimento matemático próprio aos fatores de desequilíbrio e suas transferências através dos enrolamentos primários e secundários dos transformadores de conexão, conforme requerido pela proposição metodológica feita nesta dissertação.

### **Capítulo 3: Método de Análise Proposto**

Esta unidade do trabalho contempla as estratégias para os estudos a serem conduzidos visando o estabelecimento das bases para a aplicação da metodologia desenvolvida. Ainda, através de um sistema teste, são dirigidos trabalhos iniciais para a avaliação matemática da consistência do processo de análise proposto.

### **Capítulo 4: Avaliação Computacional do Processo de Análise**

Uma vez constatada a eficácia do processo de análise sob o ponto de vista conceitual, os trabalhos, neste capítulo, encontram-se voltados para investigações computacionais atreladas com estudos de casos, sob distintas situações impostas para os tipos e origens das VTCDs, assim como também são consideradas as diversidades dos arranjos para as conexões dos transformadores de acoplamento entre os agentes envolvidos.

### **Capítulo 5: Conclusões**

Após os resultados e análises desenvolvidas no decorrer dos capítulos anteriores, é feito o fechamento do trabalho, destacando os pontos mais relevantes constatados, bem como, sugestões para trabalhos futuros.



# CAPÍTULO 2

---

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Considerações iniciais

Visando atingir os propósitos postos para os desenvolvimentos dos trabalhos, este capítulo encontra-se direcionado para o estabelecimento dos princípios norteadores da estratégia para a identificação da responsabilidade das variações de tensão de curta-duração.

Para tanto, são empregadas as técnicas de modelagem de sistemas elétricos através de ferramentas no domínio da frequência utilizando as conhecidas decomposições trifásicas desequilibradas em termos de suas respectivas componentes de sequência positiva, negativa e zero.

Assim procedendo, são considerados os mecanismos próprios ao processo da propagação, ou transferência, das componentes de sequência das tensões e correntes através dos transformadores de conexão que interligam os agentes envolvidos na análise da identificação da responsabilidade do evento ocorrido.

### 2.2 Componentes Simétricas

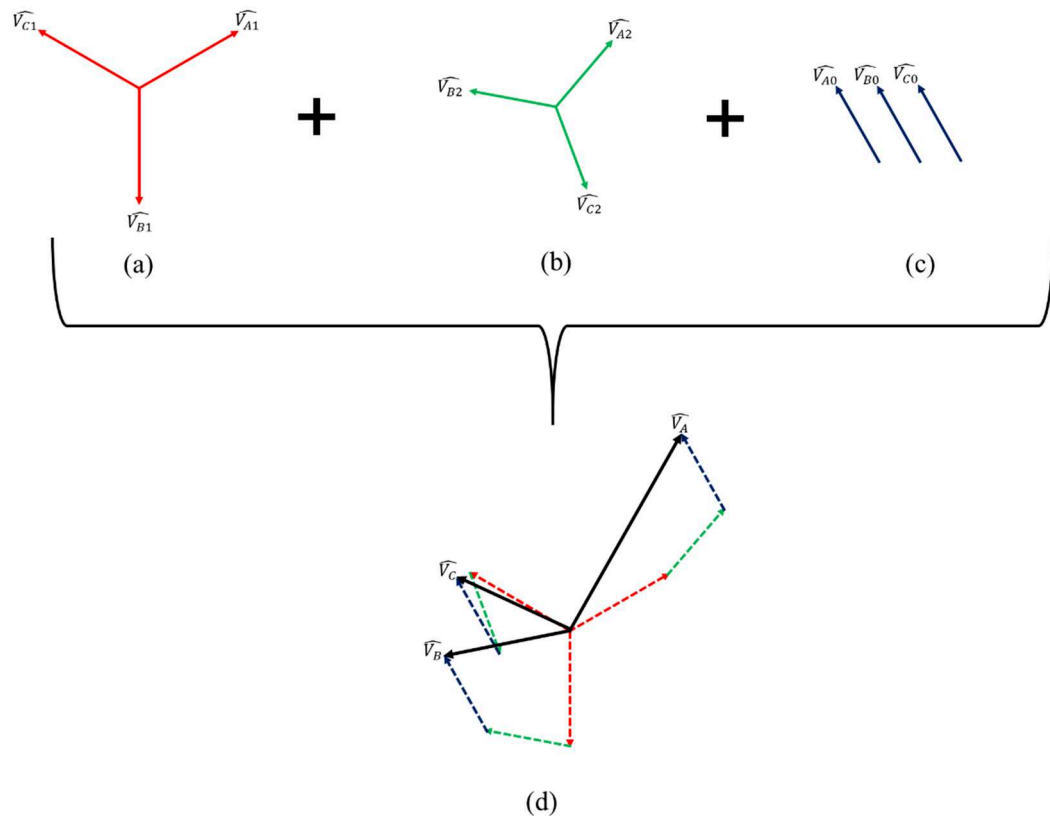
Dentre os recursos clássicos empregados para as análises de desempenho dos sistemas elétricos no domínio da frequência, um dos mais difundidos quanto do tratamento de complexos trifásicos, corresponde a conhecida estratégia da decomposição das tensões e correntes trifásicas desequilibradas nas denominadas componentes de sequência [29], [30], como a seguir:

- **Componentes de sequência positiva:** formada por 3 fasores iguais em módulo, defasados de  $120^\circ$ , e tendo a mesma sequência que as tensões e correntes da rede trifásica original (Figura 2.1a).
- **Componentes de sequência negativa:** também constituído por 3 fasores iguais em módulo, defasados de  $120^\circ$ , todavia, com sequência das fases opostas a das tensões e correntes trifásicas originais (Figura 2.1b).
- **Componentes de sequência zero:** representada por um conjunto de 3 fasores iguais em módulo, com defasagem de  $0^\circ$  entre si (Figura 2.1c).

A Figura 2.1d é indicativa do processo de decomposição nos denominados sistemas A, B, C nos sistemas conhecidos por positivo, negativo e zero. Embora seja amplamente conhecido, não é

demais destacar que, por exemplo, a tensão da fase A do sistema trifásico desequilibrado original pode ser reconstituída através da composição fasorial das correspondentes tensões de sequência positiva, negativa e zero da mesma fase. Isto pode ser facilmente constatado por observação visual dos diagramas fasoriais a seguir.

**Figura 2.1** Componentes de sequência (a) positiva, (b) negativa e (c) zero, e (d) na estrutura original das tensões trifásicas desequilibradas.



Fonte: O autor.

Também, em consonância com a teoria clássica, a correlação entre as grandezas de fase e aquelas advindas da decomposição pode ser expressa nos termos indicados pela expressão (2.1), na qual tem-se, além das tensões (ou correntes), o operador  $a = 1|_{120^\circ}$ .

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a_0} \\ \dot{V}_{a_1} \\ \dot{V}_{a_2} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

A partir do processo de decomposição anteriormente sintetizado, uma vez conhecidas as componentes de sequência das tensões (ou correntes) pode-se estabelecer quantitativamente os conhecidos fatores de desequilíbrio para as estas grandezas. Assim, surge os fatores de desequilíbrio de tensão (FD<sub>V</sub>) e o de corrente (FD<sub>I</sub>). Estas variáveis representam, pois, os níveis de desequilíbrio de sequência negativa, sendo expressos através das relações entre suas respectivas grandezas de sequência negativa e de sequência positiva. De forma similar tem-se os fatores de desequilíbrio de sequência zero, quando do emprego das tensões e correntes desta sequência correlacionadas com as respectivas grandezas de sequência positiva. Estas relações, de acordo com orientações nacionais e

internacionais, a exemplo do PRODIST-Módulo 8, são expressas pelas equações (2.2) e (2.3). Estas encontram-se explicitadas para as tensões, todavia, equações análogas podem ser também estabelecidas para as correntes [3], [31].

$$FD_2\% = FD_{-}\% = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \cdot 100 = \frac{\dot{V}_-}{\dot{V}_+} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$FD_0\% = \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_1} \cdot 100 = \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_+} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Em se tratando das tensões, o fator de desequilíbrio  $FD_2\%$  pode ser determinado através dos fasores fase-neutro ou fase-fase. Dificuldades inerentes às medições em campo de seus valores e respectivos ângulos de fase, motivaram o desenvolvimento de um procedimento com grande praticidade, envolvendo tão apenas o emprego das magnitudes das tensões. Para tanto, uma vez obtidos os módulos das 3 tensões fase-fase, é possível determinar o valor do fator de desequilíbrio como apresentado nas equações (2.4) e (2.5) [3], [31]. De fato, é possível perceber, que metodologias que se baseiam de medições de tensões de linha, são fáceis para serem aplicáveis em campo, pois esses dados de tensão podem ser medidos facilmente por inúmeros modelos de medidores de qualidade da energia [32].

$$FD_2\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad (2.5)$$

### 2.3 Curtos-circuitos como fontes para as VTCDs

Os sistemas elétricos, não obstante seus funcionamentos sob condições tais que resultem em tensões e correntes relativamente equilibradas, determina que a aleatoriedade imposta por variações típicas das potências ativas e reativas supridas, podem, naturalmente, promover variações dos valores eficazes de suas tensões (em torno do nominal ou de referência) e correntes (estas de uma forma mais acentuada). Porém, via de regra, tais variações das tensões ocorrem dentro dos padrões estabelecidos pela legislação e atendem os padrões requeridos. Caso isto não ocorra, ou seja, haja violações dos níveis de qualidade preconizados, estas devem ser prontamente regularizadas.

Todavia, situações operacionais ou eventos passíveis de ocorrência em campo (a exemplo de: energização de transformadores, partida de grandes motores, etc), ou mesmo diante de faltas diversas na rede, podem resultar em distúrbios manifestados no complexo elétrico na forma de variações (aumento ou decaimento) rápidas das tensões de suprimento. Estes eventos, como já mencionado, são designados por Variações de Tensão de Curta-Duração, que se manifestam por intervalos de tempo inferiores a 3 minutos, e são comumente representadas pela sigla VTCD. Quando de tais distúrbios,

fenômenos adversos podem ocorrer e impactar fortemente na continuidade operacional de redes e consumidores, trazendo, por consequência, expressivos riscos para a segurança, interrupção de processos produtivos, etc. Sob tais situações, grandes contendas entre as partes podem existir e, a busca por uma identificação da responsabilidade sobre onexo causal se apresenta como um grande desafio.

Buscando regulamentar os padrões de fornecimento de energia elétrica, dentre vários outros indicadores de qualidade, a ANEEL, através do PRODIST-Módulo 8, estabeleceu, de forma pioneira, uma proposta para quantificar e delimitar as variações de tensão de curta-duração através do denominado Fator de Impacto (FI). Todavia, tal busca para a regulamentação da matéria, até o momento, não contempla a identificação da origem das VTCDs. Isto implica que, registrada uma ocorrência deste distúrbio, e em havendo prejuízos de uma ou outra parte, fica uma questão a ser respondida, a qual se apresenta, como já mencionado, como cerne desta dissertação.

Apesar do reconhecimento da grande gama de eventos que podem motivar as situações supra postas quanto a manifestação das VTCDs, vale destacar que uma das mais conhecidas e impactantes fontes de tais distúrbios se deve a ocorrência de curtos-circuitos nas redes elétricas [33]. De fato, enquanto a falta não é identificada pela proteção e venha a ser eliminada, acentuados níveis de variações das tensões persistem, e suas respectivas consequências.

À luz do exposto, dentre as diversas possibilidades físicas responsáveis pelas condições anômalas impostas às redes elétricas, para fins ilustrativos e aplicativos neste trabalho, os desenvolvimentos subsequentes contemplam situações típicas atreladas com curtos-circuitos, em que pese as mais distintas formas com que tais distúrbios ocorrem. De fato, tais situações podem envolver diferentes fases, serem afetadas pelas impedâncias de falta, dentre outros fatores de interferência no processo. Nestes termos, os desenvolvimentos utilizados como exemplificação prática para a geração das VTCDs aqui focados podem compreender ocorrências do tipo fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra [34]. De acordo com avaliações estatísticas é sabido que as faltas fase-terra são as que mais ocorrem na prática, correspondendo a cerca de 63% dos eventos aqui tratados. Quanto aos curtos-circuitos fase-fase e fase-fase-terra, estes representam, aproximadamente, 15% e 16% dos fenômenos [35].

Visto que as condições anômalas supra tratadas se apresentam como fontes potenciais de VTCDs (quase que na totalidade com características desequilibradas), para fins dos desenvolvimentos e fundamentação do processo de análise deste trabalho, optou-se por correlacionar os mecanismos da transferência dos fatores de desequilíbrio com eventos advindos de curtos-circuitos.

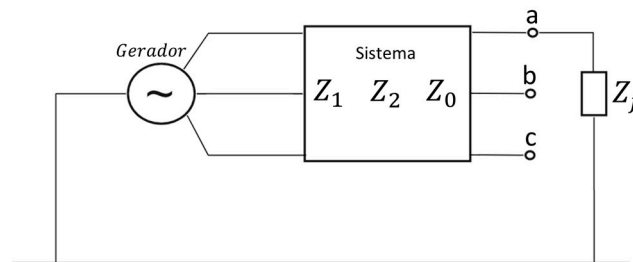
Assim, fica aqui estabelecido e esclarecido que a adoção dos curtos-circuitos como sendo as fontes responsáveis pelas VTCDs para os estudos e desenvolvimentos realizados na sequência deve ser entendida tão apenas como uma forma didática para nortear a estratégia associada com a

proposição da metodologia para a identificação da origem das ocorrências nas redes elétricas. Dentro desta linha de pensamento, apresenta-se, na sequência, uma síntese dos desenvolvimentos matemáticos tradicionalmente utilizados na engenharia elétrica para qualificar e quantificar as grandezas envolvidos nesta condição anômala de funcionamento da rede.

### 2.3.1 Falta Fase-terra

A Figura 2.2 é indicativa da falta sob análise e as equações subsequentes expressam as formulações aplicáveis para a quantificação dos níveis de corrente. Por ser um processo de análise clássico, entende-se ser desnecessário maiores esclarecimentos sobre a matéria e, nestes termos, apenas os circuitos equivalentes e equações resultantes para as correntes são apresentadas de acordo com as referências [29], [30], [36]–[38].

*Figura 2.2 Representação para uma falta fase-terra*



Fonte: Adaptado de [38].

$$\dot{I}_a = \frac{3 \cdot E_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 \cdot Z_f)} \quad (2.6)$$

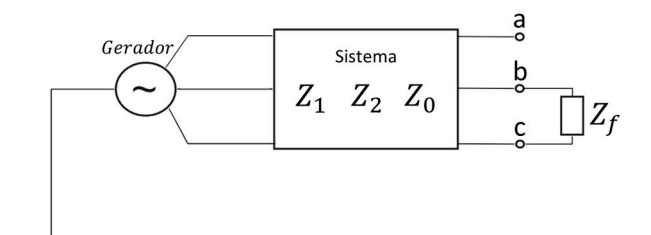
$$\dot{I}_f = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_a = 3 \cdot \dot{I}_{f1} \quad (2.7)$$

$$\dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f2} = \dot{I}_{f0} = \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_f \quad (2.8)$$

### 2.3.2 Falta Fase-Fase

A falta fase-fase é considerada a seguir:

*Figura 2.3 Representação para uma falta fase-fase.*



Fonte: Adaptado de [38].

$$\dot{I}_{f1} = \frac{\dot{E}_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.9)$$

$$\dot{I}_{f2} = -\dot{I}_{f1} \quad (2.10)$$

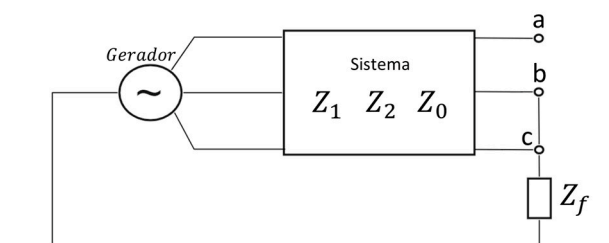
$$\dot{I}_{f0} = 0 \quad (2.11)$$

$$\dot{I}_f = -j \cdot \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{f1} = \frac{-j \cdot \sqrt{3} \cdot \dot{E}_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.12)$$

### 2.3.3 Falta Fase-Fase-terra

Quanto a falta fase-fase-terra:

**Figura 2.4** Representação para uma falta fase-fase-terra.



Fonte: Adaptado de [38].

$$\dot{I}_{f1} = \frac{(Z_0 + Z_2 + 3 \cdot Z_f) \cdot \dot{E}_a}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot (Z_1 + Z_2)} \quad (2.13)$$

$$\dot{I}_{f2} = \frac{-(Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot \dot{E}_a}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot (Z_1 + Z_2)} \quad (2.14)$$

$$\dot{I}_{f0} = \frac{-Z_2 \cdot \dot{E}_a}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot (Z_1 + Z_2)} \quad (2.15)$$

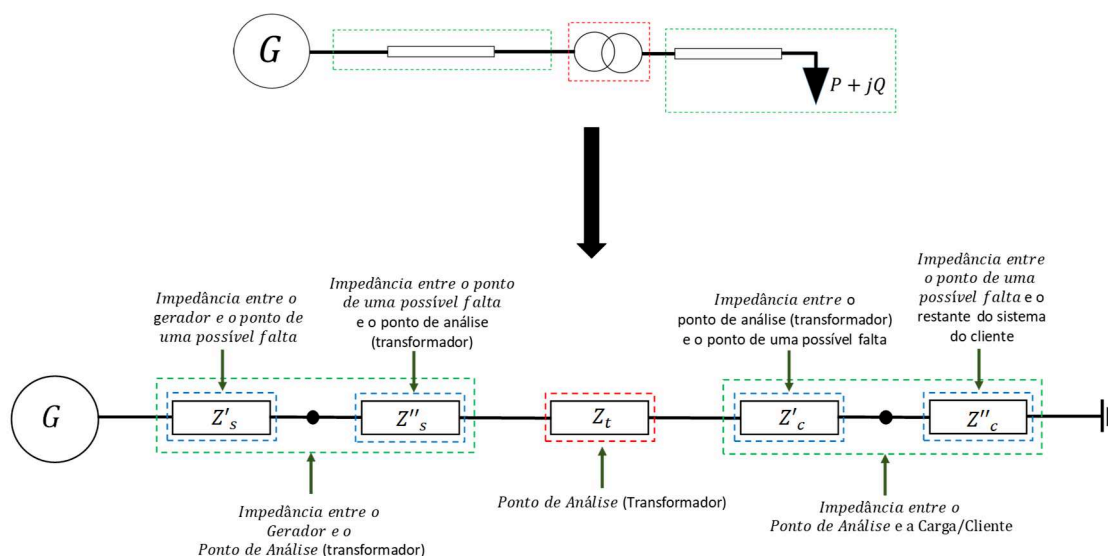
$$\dot{I}_f = 3 \cdot \dot{I}_{f0} = \dot{I}_n = \dot{I}_b + \dot{I}_c \quad (2.16)$$

Por fim, destaca-se que, uma vez conhecidas as correntes associadas com cada tipo de falta, assim como também os circuitos equivalentes representados pelas impedâncias de sequência positiva, negativa e zero de um dado sistema elétrico sob análise, torna-se possível a determinação das tensões e correntes de sequência (positiva, negativa e zero). Estas grandezas, para fins deste trabalho, são consideradas de forma pontual nos terminais do primário e secundário dos transformadores de conexão dos agentes envolvidos (duas redes de transmissão, uma interligação entre uma rede de transmissão e uma de distribuição, ou, uma rede de transmissão/distribuição e uma unidade consumidora), como a seguir:

## 2.4 Tensões e correntes de sequência nos terminais do transformador de conexão

Visando ilustrar o mecanismo matemático para a obtenção das grandezas de sequência positiva, negativa e zero manifestadas no primário e secundário do transformador de conexão, os trabalhos de desenvolvimentos subsequentes são conduzidos em consonância com o arranjo elétrico indicado na Figura 2.5, o qual serve como base para ilustração didática do processo de análise a ser estabelecido.

Figura 2.5 Sistema base utilizado para os desenvolvimentos matemáticos.



Fonte: O autor.

No diagrama unifilar:

$G$  - Fonte de tensão do sistema elétrico, contendo somente a tensão de sequência positiva;

$Z_s$  - Impedância total (soma das duas impedâncias a montante do transformador de conexão);

$Z'_s$  - Impedância entre a fonte de tensão e o ponto da falta (caso ocorra do lado primário);

$Z''_s$  - Impedância entre o ponto da falta (caso ocorra do lado primário) e o transformador de conexão;

$Z_t$  - Impedância do transformador de conexão;

$Z_c$  - Impedância total (soma das duas impedâncias a jusante do transformador de conexão);

$Z'_c$  - Impedância entre o transformador de conexão até o ponto da falta (caso ocorra do lado secundário);

$Z''_c$  - Impedância entre o ponto de falta (caso ocorra do lado secundário) e o equivalente do restante do sistema à jusante do transformador de conexão.

Uma vez estabelecido o sistema a ser empregado como base para os estudos, procede-se, na sequência, à determinação das expressões para os FDs quando o mesmo está sob influência de uma falta no lado do primário ou secundário do transformador de análise. Estes lados são também identificados como rede elétrica a montante do transformador (primário) ou a jusante do mesmo (secundário). Também, devido ao fato que os procedimentos físicos e matemáticos sejam de uso

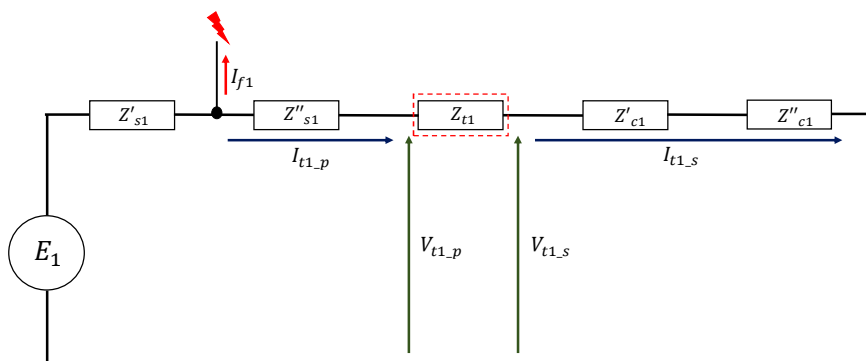
comum na engenharia elétrica, maiores detalhes dos desenvolvimentos são omitidos nas descrições subsequentes.

### 2.4.1 Falta a montante do transformador de conexão:

- **Circuito equivalente de sequência (+):**

A Figura 2.6 representa o sistema de sequência positiva para a situação em que a falta ocorre do lado primário do transformador.

Figura 2.6 Circuito elétrico equivalente para a sequência positiva – falta a montante do transformador.

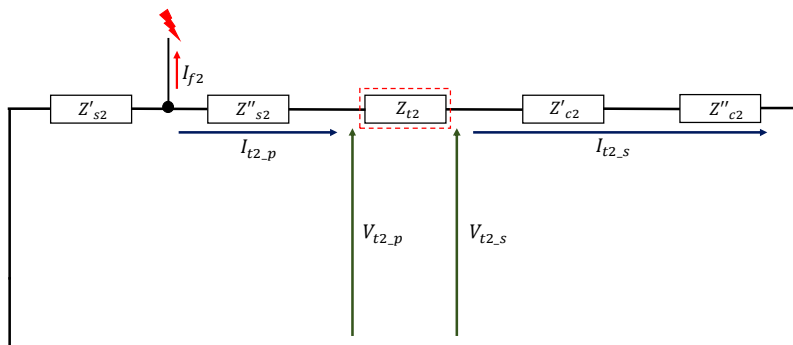


Fonte: O autor.

- **Circuito equivalente de sequência (-):**

De forma correspondente, o circuito de sequência negativa é indicado na Figura 2.7.

Figura 2.7 Circuito elétrico equivalente para a sequência negativa – falta a montante do transformador.



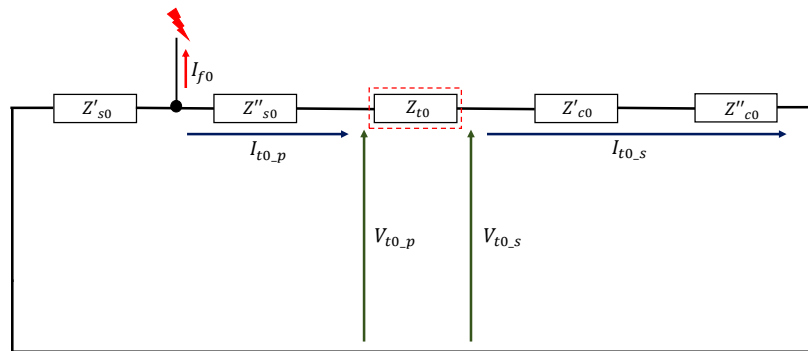
Fonte: O autor.

- **Circuito equivalente de sequência (0):**

Por fim, o circuito de sequência nula é representado pela Figura 2.8.



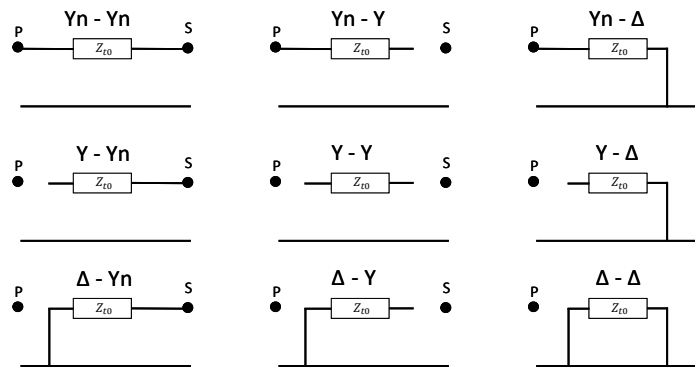
**Figura 2.8** Circuito elétrico equivalente para a sequência zero – falta a montante do transformador - modelo estabelecido para um transformador  $Y_n - Y_n$ .



Fonte: O autor.

Vale lembrar que a impedância de sequência zero do transformador possui forte correlação com o tipo de conexão do mesmo, como indicado nos circuitos equivalentes da Figura 2.9.

**Figura 2.9** Equivalente de sequência zero do transformador em função do tipo de conexão do primário e secundário.



Fonte: O autor.

### 2.4.1.1 Correntes e tensões de sequência positiva, negativa e zero do lado primário do transformador de conexão

Uma vez estabelecidos os circuitos equivalentes, procede-se, na sequência, à determinação das suas correntes e tensões de sequência.

Iniciando pelas correntes do lado primário e secundário, estas se apresentam nos termos estabelecidos pelas equações (2.17) e (2.18).

$$I_{t1,p} = \frac{V_{1\_fal\grave{a}}}{Z'^i_{s1} + Z'_{t1} + (Z'_{c1} + Z'^i_{c1})} \quad (2.17)$$

$$I_{t2,p} = \frac{V_{2\_fal\grave{a}}}{Z'^i_{s2} + Z'_{t2} + (Z'_{c2} + Z'^i_{c2})} \quad (2.18)$$

Para o circuito de sequência zero, a correspondente expressão irá depender, como já mencionado, do tipo de ligação dos enrolamentos do primário e secundário, como indicado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** Correntes de sequência zero do lado primário do transformador em função do tipo de conexão de seus enrolamentos

Yn-Yn	$I_{t0\_p} = \frac{V_{0\_falta}}{Z''_{s0} + Z'_{t0} + (Z'_{c0} + Z''_{c0})}$	(2.19a)
Yn-Δ	$I_{t0\_p} = \frac{V_{0\_falta}}{Z''_{s0} + Z'_{t0}}$	(2.19b)
Demais Conexões	$I_{t0\_p} = 0$	(2.19c)

Fonte: O autor.

Uma vez conhecidas as correntes, as correspondentes tensões de sequência podem ser estabelecidas, como fornecido em (2.20) e (2.21).

$$V_{t1\_p} = V_{1\_falta} - I_{t1\_p} * Z''_{s1} \quad (2.20)$$

$$V_{t2\_p} = V_{2\_falta} - I_{t2\_p} * Z''_{s2} \quad (2.21)$$

Para o circuito de sequência zero:

**Tabela 2.2** Expressões das tensões de sequência zero em função do tipo de conexão do transformador

Yn-Yn, Yn-Δ	$V_{t0\_p} = V_{0\_falta} - I_{t0\_p} * Z''_{s0}$	(2.22a)
Demais Conexões	$V_{t0\_p} = V_{0\_falta}$	(2.22b)

Fonte: O autor.

### 2.4.1.2 Correntes e tensões de sequência positiva, negativa e zero transferidas para o lado secundário do transformador de conexão

Considerando que as modelagens sejam estabelecidas em valores pu para as grandezas representativas das correntes e tensões, por consequência, seus valores do lado primário e secundário serão iguais, porém defasadas conforme o tipo de conexão do transformador [29], [39]. Assim, representando tal defasamento pela variável  $a_c$ , a Tabela 2.3 fornece os valores para esta grandeza, para cada conexão empregada.

**Tabela 2.3** Defasamentos angulares associados pelos tipos de conexão do primário e secundário do transformador – para as grandezas de sequência positiva e negativa.

Tipo de ligação do transformador	$a_{c1}$	$a_{c2}$
Δ-Yn, Δ-Y	+ 30°	- 30°
Δ- Δ, Y-Y, Y-Yn, Yn-Yn, Yn-Y	0°	0°
Y - Δ, Yn - Δ	- 30°	+ 30°

Fonte: O autor.

Assim, os processos de transferência das correntes e tensões de sequência positiva e negativa, de um para o outro lado do transformador de conexão, são expressos através das relações matemáticas (2.23) e (2.24).

$$I_{t1\_s} = I_{t1\_p} * a_{c1} \quad (2.23)$$

$$I_{t2\_s} = I_{t2\_p} * a_{c2} \quad (2.24)$$

Quanto as correntes de sequência zero:

**Tabela 2.4** Expressões para as correntes de sequência zero – lado secundário - em função do tipo de conexão do transformador.

Yn-Yn	$I_{t0\_s} = I_{t0\_p}$	(2.25a)
Demais Conexões	$I_{t0\_s} = \mathbf{0}$	(2.25b)

Fonte: O autor.

Em relação às tensões:

$$V_{t1\_s} = I_{t1\_s} * (Z'_{c1} + Z''_{c1}) \quad (2.26)$$

$$V_{t2\_s} = I_{t2\_s} * (Z'_{c2} + Z''_{c2}) \quad (2.27)$$

Para o circuito de sequência zero:

**Tabela 2.5** Expressões para as tensões de sequência zero – lado do secundário – em função do tipo de conexão do transformador.

Yn-Yn	$V_{t0\_s} = I_{t0\_s} * (Z'_{c0} + Z''_{c0})$	(2.28a)
Demais Conexões	$V_{t0\_s} = \mathbf{0}$	(2.28b)

Fonte: O autor.

### 2.4.1.3 Fatores de desequilíbrio para uma falta do lado primário do transformador:

De acordo com as metas estabelecidas neste trabalho, o processo da identificação da origem das VTCDs, para o caso associadas com a ocorrência de curtos-circuitos desequilibrados, o mesmo está baseado no mecanismo de transferência, do primário para o secundário, dos fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero. Em atenção a esta proposta, são estabelecidas, a partir das expressões das tensões e correntes de sequência positiva, negativa e zero, as equações (2.29) a (2.38), que regem os valores dos já mencionados fatores de desequilíbrio.

Utilizando o subíndice “p” para as expressões dos fatores de desequilíbrio do lado do primário, e o subíndice “s” para o secundário, chega-se a:

$$FD2v_{.p} = \frac{V_{t2\_p}}{V_{t1\_p}} = \frac{V_{2\_falta} - I_{t2\_p} * Z''_{s2}}{V_{1\_falta} - I_{t1\_p} * Z''_{s1}} \quad (2.29)$$

$$FD2v_{.s} = \frac{V_{t2\_s}}{V_{t1\_s}} = \frac{I_{t2\_s} * (Z'_{c2} + Z''_{c2})}{I_{t1\_s} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \frac{I_{t2\_p} * a_{c2} * (Z'_{c2} + Z''_{c2})}{I_{t1\_p} * a_{c1} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \quad (2.30)$$

$$= \frac{\frac{V_{t2\_p}}{Z_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})} * a_{c2} * (Z'_{c2} + Z''_{c2})}{\frac{V_{t1\_p}}{Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} * a_{c1} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \frac{(Z'_{c2} + Z''_{c2})}{Z_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})} * a_{c2} * V_{t2\_p} \quad (2.31)$$

$$\frac{(Z'_{c1} + Z''_{c1})}{Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} * a_{c1} * V_{t1\_p}$$

Analisando-se [29], [30], [38], e reconhecendo que o termo:

$$\left| \frac{\frac{(Z'_{c2} + Z''_{c2})}{Z'_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})} * a_{c2}}{\frac{(Z'_{c1} + Z''_{c1})}{Z'_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} * a_{c1}} \right| \cong 1$$

É possível concluir que:

$$|FD2v_{.s}| \cong \left| 1 * \frac{V_{t2p}}{V_{t1p}} \right| \cong |FD2v_{.p}| \quad (2.32)$$

De forma análoga aos desenvolvimentos acima, para os fatores de desequilíbrio de sequência zero tem-se:

$$FD0v_{.p} = \frac{V_{t0p}}{V_{t1p}} = \frac{V_{0,falta} - I_{t0p} * Z''_{s0}}{V_{1,falta} - I_{t1p} * Z''_{s1}} \quad (2.33)$$

$$FD0v_{.s} = \frac{V_{t0s}}{V_{t1s}} = \frac{I_{t0s} * (Z'_{c0} + Z''_{c0})}{I_{t1s} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} \quad (2.34)$$

Quanto aos fatores de desequilíbrio relacionados as correntes de sequência negativa e zero, a transferência destes indicadores ocorre nos termos estabelecidos pelas equações (2.35) a (2.38).

$$FD2i_{.p} = \frac{I_{t2p}}{I_{t1p}} = \frac{\frac{V_{2,falta}}{Z''_{s2} + Z'_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})}}{\frac{V_{1,falta}}{Z''_{s1} + Z'_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})}} \quad (2.35)$$

$$FD2i_{.s} = \frac{I_{t2s}}{I_{t1s}} = \frac{I_{t2p} * a_{c2}}{I_{t1p} * a_{c1}} \quad (2.36)$$

Para a sequência zero:

$$FD0i_{.p} = \frac{I_{t0p}}{I_{t1p}} = \frac{\frac{V_{0,falta}}{Z''_{s0} + Z'_{t0} + (Z'_{c0} + Z''_{c0})}}{\frac{V_{1,falta}}{Z''_{s1} + Z'_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})}} \quad (2.37)$$

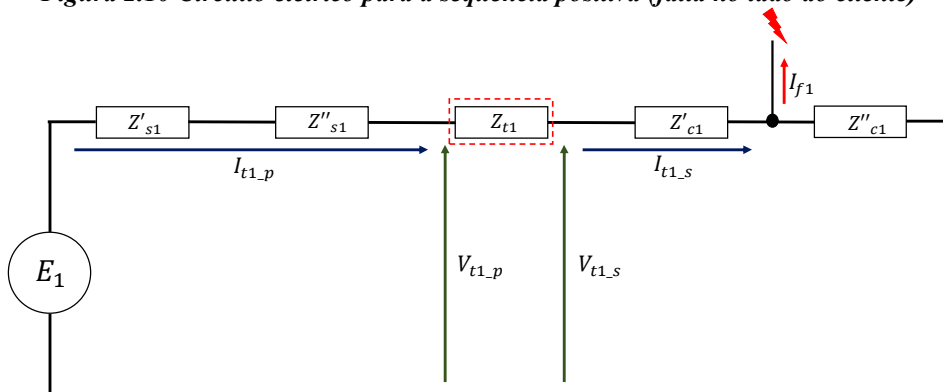
$$FD0i_{.s} = \frac{I_{t0s}}{I_{t1s}} = \frac{I_{t0p}}{I_{t1p} * a_{c1}} \quad (2.38)$$

## 2.4.2 Falta a jusante do transformador de conexão:

Seguindo a mesma estratégia para o caso de faltas do lado primário, apresenta-se, a seguir, os correspondentes resultados quando o evento ocorre do lado secundário do transformador de conexão. Tendo em vista que os procedimentos são similares aos já estabelecidos, apenas os resultados finais atrelados com cada item de análise são apresentados, sem maiores considerações.

- **Circuito equivalente de sequência (+):**

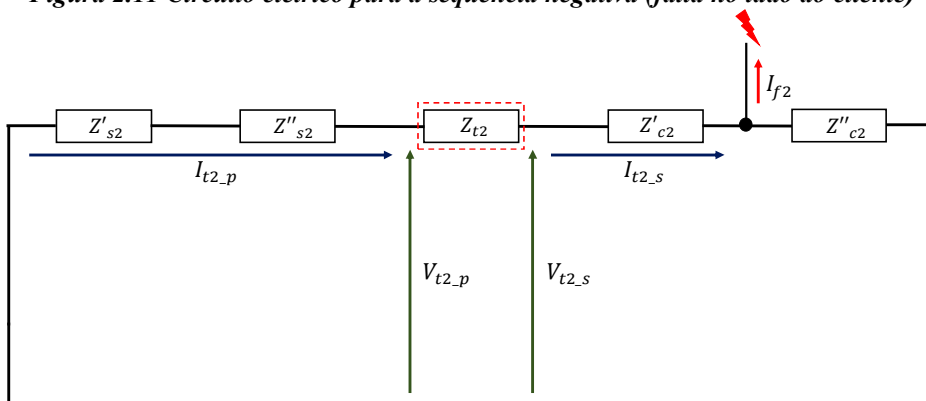
Figura 2.10 Circuito elétrico para a sequência positiva (falta no lado do cliente)



Fonte: O autor.

- **Circuito equivalente de sequência (-):**

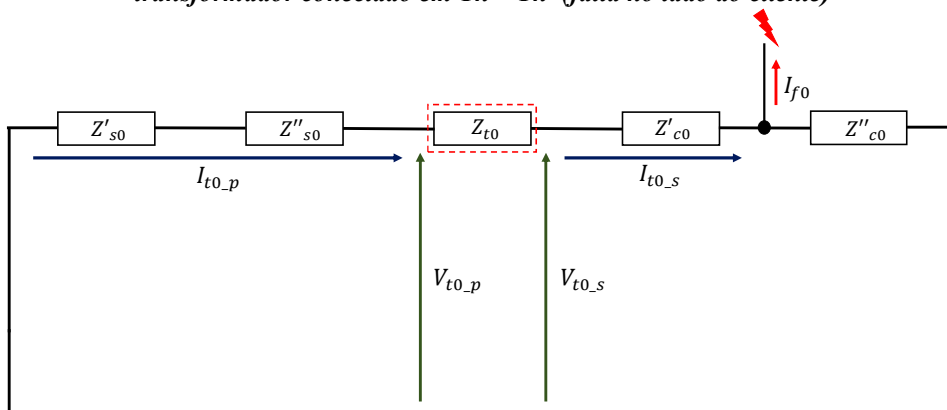
Figura 2.11 Circuito elétrico para a sequência negativa (falta no lado do cliente)



Fonte: O autor.

- **Circuito equivalente de sequência (0):**

Figura 2.12 Circuito elétrico para a sequência negativa, representação com o transformador conectado em Yn – Yn (falta no lado do cliente)



Fonte: O autor.

### 2.4.2.1 Correntes e tensões de sequência positiva, negativa e zero do lado secundário do transformador de conexão

$$I_{t1,s} = I_{f1} + \frac{V_{1\_falta}}{Z'_{c1}} \quad (2.39)$$

$$I_{t2,s} = I_{f2} + \frac{V_{2\_falta}}{Z'_{c2}} \quad (2.40)$$

**Tabela 2.6** Correntes de sequência zero do lado secundário do transformador em função do tipo de conexão de seus enrolamentos.

Yn-Yn, Δ-Yn	$I_{t0\_s} = I_{f0} + \frac{V_{0\_falta}}{Z''_{c0}}$	(2.41a)
Demais Conexões	$I_{t0\_s} = 0$	(2.41b)

Fonte: O autor.

$$V_{t1\_s} = V_{1\_falta} + Z'_{c1} * I_{t1\_s} \quad (2.42)$$

$$V_{t2\_s} = V_{2\_falta} + Z'_{c2} * I_{t2\_s} \quad (2.43)$$

**Tabela 2.7** Tensões de sequência zero do lado secundário do transformador em função do tipo de conexão de seus enrolamentos.

Yn-Yn, Δ-Yn	$V_{t0\_s} = V_{0\_falta} + Z'_{c0} * I_{t0\_s}$	(2.44a)
Demais Conexões	$V_{t0\_s} = V_{0\_falta}$	(2.44b)

Fonte: O autor.

### 2.4.2.2 Correntes e tensões de sequência positiva, negativa e zero transferidas para o lado primário do transformador de conexão

$$I_{t1\_p} = I_{t1\_s} * \overline{a_{c1}} \quad (2.45)$$

$$I_{t2\_p} = I_{t2\_s} * \overline{a_{c2}} \quad (2.46)$$

**Tabela 2.8** Correntes de sequência zero do lado primário do transformador em função do tipo de conexão de seus enrolamentos.

Yn-Yn	$I_{t0\_p} = I_{t0\_s}$	(2.47a)
Demais Conexões	$I_{t0\_p} = 0$	(2.47b)

Fonte: O autor.

$$V_{t1\_p} = E'1 * \overline{a_{c1}} - (Z'_{s1} + Z''_{s1}) * I_{t1\_p} \quad (2.48)$$

ou,

$$V_{t1\_p} = Z_{t1} * I_{t1\_p} + Z'_{c1} * I_{t1\_p} + V_{1\_falta} * \overline{a_{c1}} \quad (2.49)$$

$$V_{t2\_p} = -(Z'_{s2} + Z''_{s2}) * I_{t2\_p} \quad (2.50)$$

ou,

$$V_{t2\_p} = Z_{t2} * I_{t2\_p} + Z'_{c2} * I_{t2\_p} + V_{2\_falta} * \overline{a_{c2}} \quad (2.51)$$

**Tabela 2.9** Tensões de sequência zero do lado primário do transformador em função do tipo de conexão de seus enrolamentos.

Yn-Yn	$V_{t0\_p} = -(Z'_{s0} + Z''_{s0}) * I_{t0\_p}$ Ou,	(2.52)
	$V_{t0\_p} = Z_{t0} * I_{t0\_p} + Z'_{c0} * I_{t0\_p} + V_{0\_falta}$	
Demais Conexões	$V_{t0\_p} = 0$	(2.53)

Fonte: O autor.

### 2.4.2.3 Fatores de desequilíbrio - falta do lado secundário do transformador:

$$FD2v_{-p} = \frac{V_{t2\_p}}{V_{t1\_p}} = \frac{Z_{t2} * I_{t2\_p} + Z'_{c2} * I_{t2\_p} + V_{2\_falta} * \overline{a_{c2}}}{Z_{t1} * I_{t1\_p} + Z'_{c1} * I_{t1\_p} + V_{1\_falta} * \overline{a_{c1}}} \quad (2.54)$$

$$FD2v_{-s} = \frac{V_{t2\_s}}{V_{t1\_s}} = \frac{Z'_{c2} * I_{t2\_s} + V_{2\_falta}}{Z'_{c1} * I_{t1\_s} + V_{1\_falta}} \quad (2.55)$$

$$FD0v_{-p} = \frac{Z_{t0} * I_{t0\_p} + Z'_{c0} * I_{t0\_p} + V_{0\_falta}}{Z_{t1} * I_{t1\_p} + Z'_{c1} * I_{t1\_p} + V_{1\_falta} * \overline{a_{c1}}} \quad (2.56)$$

$$FD0v_{-s} = \frac{V_{t0\_s}}{V_{t1\_s}} = \frac{Z'_{c0} * I_{t0\_s} + V_{0\_falta}}{Z'_{c1} * I_{t1\_s} + V_{1\_falta}} \quad (2.57)$$

$$FD2i_{-p} = \frac{I_{t2\_p}}{I_{t1\_p}} = \frac{I_{t2\_s} * \overline{a_{c2}}}{I_{t1\_s} * \overline{a_{c1}}} \quad (2.58)$$

$$FD2i_{-s} = \frac{I_{t2\_s}}{I_{t1\_s}} = \frac{I_{f2} + \frac{V_{2\_falta}}{Z''_{c2}}}{I_{f1} + \frac{V_{1\_falta}}{Z''_{c1}}} \quad (2.59)$$

$$FD0i_{-p} = \frac{I_{t0\_p}}{I_{t1\_p}} = \frac{I_{t0\_p}}{I_{t1\_s} * \overline{a_{c1}}} \quad (2.60)$$

$$FD0i_{-s} = \frac{I_{t0\_s}}{I_{t1\_s}} = \frac{I_{f0} + \frac{V_{0\_falta}}{Z''_{c0}}}{I_{f1} + \frac{V_{1\_falta}}{Z''_{c1}}} \quad (2.61)$$

## 2.5 Considerações finais

De um modo geral, as expressões de FDs obtidas para uma falta no lado primário do transformador de conexão são indicativas que os processos de transferência dos indicadores de desequilíbrio de sequência negativa e zero permitiram constatar que:

- Em relação aos FDs de sequência negativa, as expressões obtidas para o lado primário e secundário apontam para que os valores encontrados, em ambos os lados, serão os mesmos tanto para o FD de tensão quanto para o de corrente.
- Em relação aos FDs de sequência zero, é importante ressaltar que o mesmo depende do tipo de ligação do transformador, destacando-se o fato que, só existe circuito de sequência zero para faltas que envolvam o solo.

Quanto a ocorrência das faltas do lado secundário do transformador de conexão, pode-se observar que:

- Em relação ao FD de tensão de sequência negativa, os valores encontrados no primário e secundário do transformador são diferentes. Isso se deve ao fato das expressões obtidas para

a tensão no primário do transformador incluïrem o termo  $Z_t * I_{t_p}$ . Como a corrente de seqüência positiva é maior que a de seqüência negativa, e  $Z_t$  é o mesmo para as duas seqüências, isso resulta em que o denominador da expressão para o cálculo do fator de desequilíbrio da tensão aumente, gerando um FD diferente do secundário (que se mostra com magnitude maior);

- Em relação ao FD de corrente, este é igual no primário e secundário do transformador;
- Como para o caso de faltas do lado primário, o FD de seqüência zero é fortemente dependente do tipo de ligação do transformador e do tipo de falta. Eventos que não envolvam o solo não possuem componentes de seqüência zero.



# CAPÍTULO 3

---

## MÉTODO DE ANÁLISE PROPOSTO

### 3.1 Considerações iniciais

O capítulo precedente contemplou aspectos fundamentais associados com a técnica de análise de sistemas elétricos, no domínio da frequência, e destinados ao tratamento de fenômenos diversos atrelados com complexos trifásicos desequilibrados. A partir dos fundamentos apresentados, os trabalhos foram direcionados ao estabelecimento de formulações destinada a quantificar os níveis de desequilíbrios presentes nas redes, com destaque aos indicadores de sequência negativa e zero, grandezas estas que se apresentam como norte para o processo de análise proposto por esta dissertação.

Com base nos princípios estabelecidos, procede-se, nesta unidade, a proposição de uma estratégia para a realização de estudos aplicativos objetivando a avaliação da efetividade da proposta feita.

Os trabalhos são iniciados através de um levantamento dos tipos de transformadores em uso no Brasil, nos termos estabelecidos pelos bancos de dados da ANEEL, visto que o método de análise irá primar pelos equipamentos mais utilizados pelas empresas de transmissão e distribuição de energia.

Na sequência procede-se ao estabelecimento do processo de análise propriamente dito, o qual é avaliado através de sistema elétrico teste que servirá como base para os estudos de desempenho do processo de análise. Empregando tal arranjo, são realizados estudos matemáticos diversos contemplando situações operacionais típicas conduzindo a uma diversidade de eventos na categoria das VTCDs. Seguindo esta estratégia investigativa, são então obtidos os primeiros resultados que permitem uma primeira avaliação, ainda que totalmente matemática, da consistência da proposta de identificação da responsabilidade sobre os distúrbios aqui tratados.

### 3.2 Conexões trifásicas dos transformadores empregados pelo setor elétrico nacional

À luz do processo de análise destinado a identificação da origem das VTCDs, nos termos propostos por esta dissertação, o qual encontra-se embasado no mecanismo de transferência dos indicadores de desequilíbrio de sequência negativa e zero, do primário para o secundário dos transformadores, ou vice-versa, torna-se imperativo a caracterização dos arranjos empregados para as conexões primária e secundária dos transformadores. Isto se deve sobretudo ao fato que, as transferências destas grandezas de um para o outro lado destas unidades de conexão, são determinadas pela forma com que seus enrolamentos são interligados.

Para tanto, através de levantamentos feitos na Base de Dados Geográficos da Distribuidora (BDGD), disponibilizado pela ANEEL foram obtidas as informações constantes na Tabela 3.1. Vale observar que os arranjos indicados correspondem a configurações trifásicas, visto que, de forma consonante com o processo de análise aqui considerado, configurações monofásicas não são consideradas.

*Tabela 3.1 Tipos de conexões de transformadores mais utilizados pelas concessionárias distribuidoras no Brasil*

Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)
estrela/estrela aterrado	5934	0,18
<b>delta/estrela aterrado</b>	<b>2937530</b>	<b>90,70</b>
estrela aterrado/estrela aterrado	94297	2,91
delta/estrela/aterrado	57579	1,78
delta / delta	48	0,00
estrela/estrela aterrado/delta	19	0,00
estrela/delta	143189	4,42
Total	3238596	-

Fonte: [40].

Como indicado na tabela, a maioria absoluta dos transformadores trifásicos utilizam a conexão delta/estrela aterrada, seguida, em muito menor proporção, pelos arranjos estrela/delta e estrela aterrado/estrela aterrado. Destaca-se que, tais configurações conjuntas para os enrolamentos dos transformadores perfazem um percentual de mais de 98% das conexões das unidades trifásicas do Brasil.

Isto posto, fica esclarecido que a realização de estudos de desempenho para os transformadores supra identificados quanto ao tipo de conexão de seus enrolamentos primário e secundário resultaria em constatações para praticamente a totalidade das instalações de distribuição no contexto nacional.

### 3.3 Classificação das VTCDs quanto a sua natureza

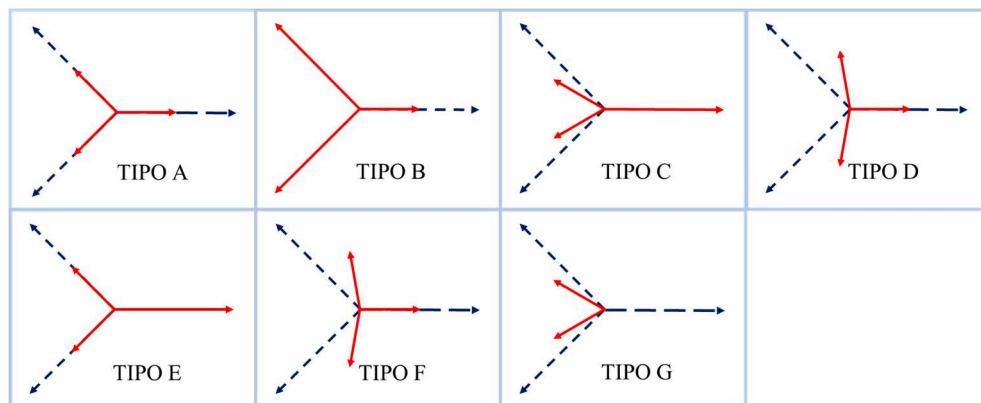
De acordo com a referência [39], os fenômenos classificados na categoria das VTCDs se apresentam classificadas em 7 diferentes tipos, as quais compreendem resultados advindos de diferentes tipos de faltas (Fase-terra, Fase-Fase e Fase-Fase-terra), assim como também das ligações empregadas para as cargas supridas. Mais uma vez vale ressaltar que a origem dos eventos ora tratados não se apresenta como exclusivamente atribuído a incidência de curtos-circuitos, todavia, tendo em vista que, frequentemente, tais situações anômalas são as mais típicas, as mesmas são, via de regra, utilizada para as exemplificações e categorizações.

Feitas as ressalvas acima, de acordo com os mais distintos documentos encontrados, os tipos de VTCDs são:

- Tipo A: falta trifásica - carga conectada em estrela ou delta;
- Tipo B: falta fase-terra - carga conectada em estrela;
- Tipo C: falta fase-fase - carga conectada em estrela, ou, falta fase-terra e carga em delta;
- Tipo D: falta fase-fase - carga conectada em delta;
- Tipo E: falta fase-fase-terra - carga conectada em estrela;
- Tipo F: falta fase-fase-terra - carga conectada em delta;
- Tipo G: similar a VTCD tipo F, com alterações das magnitudes e ângulos das fases.

Objetivando oferecer uma visualização gráfica dos eventos supra definidos, a Figura 3.1 ilustra a composição fasorial dos eventos. A situação que antecede a ocorrência do fenômeno é indicada por linhas tracejadas, enquanto que em vermelho tem-se as tensões durante o distúrbio.

*Figura 3.1 Tipos de VTCDs conforme Math Bollen.*



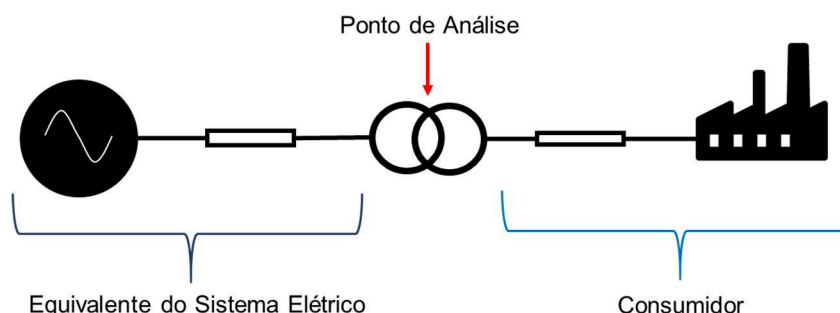
Fonte: Adaptado de [39].

### 3.4 Sistema elétrico teste para os estudos matemáticos de desempenho do método

Esta seção destina-se a definir um sistema elétrico a ser utilizado para as simulações computacionais direcionadas para a avaliação do processo de identificação das responsabilidades das VTCDs. O mecanismo proposto, como estabelecido neste trabalho, se apresenta fundamentado na reprodução de eventos associados com a incidência de variações de tensão de curta duração, os quais, manifestados do lado primário ou secundário dos transformadores, se propagam pelos enrolamentos originando uma transferência dos fatores de desequilíbrio que norteiam o processo de análise. Assim, para a realização dos estudos, torna-se necessário o estabelecimento de redes elétricas, às quais são submetidas a distúrbios geradores dos fenômenos em pauta, ou seja, curtos-circuitos. Não obstante o reconhecimento que tais fontes de distúrbios não são únicas, para fins das investigações em foco, devido ao fato de se apresentarem como potenciais fontes, as faltas se apresentam com versatilidade e potencialidade suficientes para os estudos aqui requeridos.

A Figura 3.2 representa um sistema bastante simplificado, constituído por uma fonte de suprimento representado tão apenas pelo seu equivalente de Thevenin, visto a partir do primário de um transformador de conexão, o qual supre uma carga elétrica representando a unidade consumidora. A utilização da terminologia “sistema elétrico 1” está relacionada ao fato que, para o presente capítulo, é estabelecida uma configuração mais simples de um complexo elétrico, visto as simplificações que este proporciona aos desenvolvimentos matemáticos a serem conduzidos. Não obstante o fato que o arranjo aqui utilizado seja bastante simples, o mesmo, de uma forma genérica se mostra adequado para os primeiros estudos investigativos sobre o desempenho da metodologia proposta. Posteriormente, para as análises através de recursos computacionais com maior potencial avaliativo, será empregado um complexo elétrico com uma composição mais identificada com uma estrutura comercial.

*Figura 3.2 Sistema elétrico 1.*



Fonte: O autor.

Os parâmetros representativos do sistema em questão encontram-se indicados na Tabela 3.2. Estes foram embasados de informações trazidas por [21], [41].

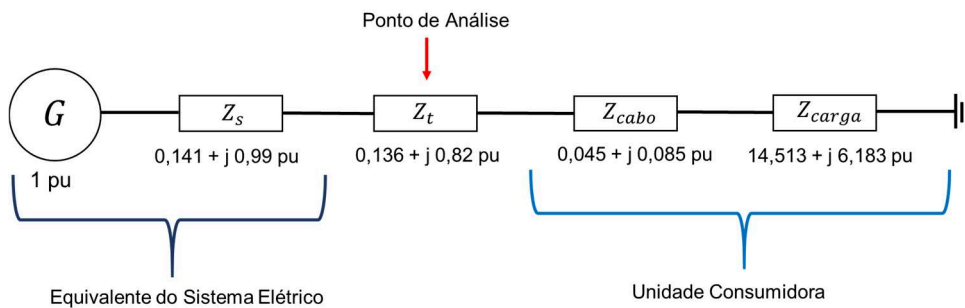
**Tabela 3.2 Parâmetros do sistema elétrico 1.**

Equivalente da Concessionária	
Tensão de Alimentação	34,5 kV
Nível de Curto Circuito (Sec)	102,55 MVA
X/R	7
Ponto de Análise	
Transformador	Delta/estrela aterrada
	34,5kV/13,8kV
	7,5 MVA
	R = 1% X = 6%
Unidade Consumidora	
Cabos	R: 0,09 Ω L: 0,42 mH
	Carga do consumidor (Impedância constante)

Fonte: O autor.

O diagrama unifilar correspondente ao arranjo acima descrito é indicado na Figura 3.3.

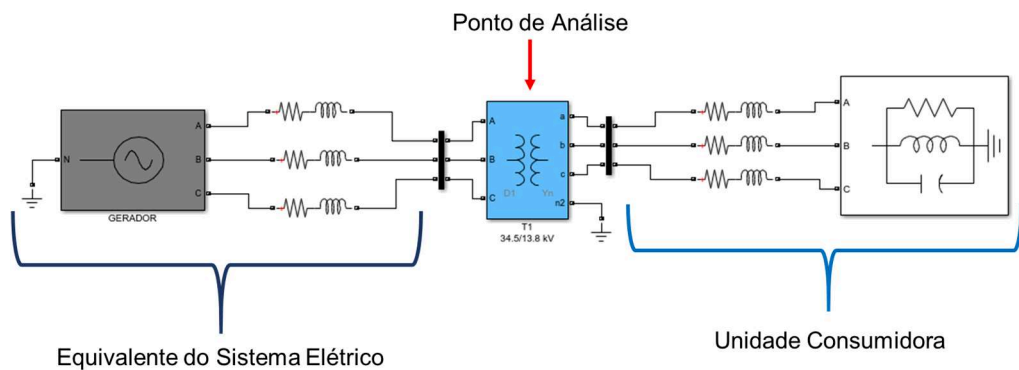
**Figura 3.3 Diagrama unifilar representativo do sistema elétrico.**



Fonte: O autor.

Muito embora, para o momento, não haja necessidade de uma modelagem do sistema numa base computacional, a exemplo do simulador Matlab-Simulink, posteriormente, objetivando uma análise da correlação entre os desempenhos obtidos via formulações matemáticas baseadas nas técnicas de modelagem no domínio da frequência, e outra, no domínio do tempo, tal quesito será necessário. Visando tal aplicação futura (Capítulo 4), apresenta-se, na Figura 3.4, o resultado da implementação computacional do sistema aqui proposto.

**Figura 3.4 Sistema elétrico 1 na plataforma Matlab-Simulink.**



Fonte: O autor.

Considerando a incidência de distintos curtos-circuitos, quer do lado primário como do lado secundário do transformador de conexão, estes irão resultar nos diversos tipos de VTCDs. A partir dos eventos aplicados e matematicamente avaliados, são obtidos os respectivos fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero, dos lados primário e secundário do transformador ilustrado. Estas grandezas se apresentam como fundamentos para a análise da consistência do processo de análise estabelecido por este trabalho.

### 3.5 Avaliação matemática da proposta metodológica para a atribuição da responsabilidade das VTCDs

Objetivando apresentar uma base sólida para uma melhor compreensão dos fundamentos associados com a metodologia aqui proposta, considera-se relevante que o processo seja didaticamente aqui explorado. Para tanto, contando com as formulações matemáticas consideradas no capítulo precedente e baseadas no domínio da frequência, são desenvolvidas, passo a passo, as etapas que se apresentam como requisitos a serem cumpridos até o estabelecimento da correlação entre os fatores de desequilíbrio e o mecanismo de suas propagações de um para o outro lado do transformador de conexão.

#### 3.5.1 Falta no primário do transformador:

A situação considerada se apresenta com as seguintes características:

- $\dot{E}_1 = 1 \text{ pu}$ ;
- $Z_s = 0,141 + j0,99 \text{ pu}$ ;
- $Z_t = 0,136 + j0,82 \text{ pu}$ ;
- $Z_c = Z_{\text{cabo}} + Z_{\text{carga}} = (0,045 + j0,085) + (14,513 + j6,183) = 14,558 + j6,268 \text{ pu}$

Considerando a incidência de uma falta fase-terra, do lado primário do transformador, através de uma impedância de  $7 \Omega$  (0,603 pu na base considerada), tem-se que a tensão residual na fase A seja de 0,5 pu, enquanto as demais permanecem próximas a 1 pu. Assim, utilizando-se das equações (2.6) a (2.8) apresentadas no capítulo 2, obtêm-se os seguintes valores para a corrente de falta:

$$\dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f2} = \dot{I}_{f0} = 0,261 \angle -54,04^\circ \text{ pu}$$

As tensões de sequência no ponto onde ocorrer a falta, por sua vez, são:

$$\dot{V}_{f1} = \dot{E}_1 - Z_1 \cdot \dot{I}_{f1} = 0,778 \angle -9,0^\circ \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{f2} = -Z_2 \cdot \dot{I}_{f2} = 0,261 \angle -152,2^\circ \text{ pu}$$

$$\dot{V}_{f0} = -Z_0 \cdot \dot{I}_{f0} = 0,270 \angle -149,38^\circ \text{ pu}$$

E as correntes que se estabelecem no primário do transformador são:

$$I_{t1,p} = \frac{\dot{V}_{f1}}{Z_{t1} + Z_{c1}} = 0,048|_{-34,76^\circ} pu$$

$$I_{t2,p} = \frac{\dot{V}_{f2}}{Z_{t2} + Z_{c2}} = 0,016|_{-178^\circ} pu$$

$$I_{t0,p} = 0$$

Assim, as tensões manifestadas no primário do transformador se apresentam como:

$$V_{t1,p} = \dot{V}_{f1} = 0,778|_{-9,0^\circ} pu$$

$$V_{t2,p} = \dot{V}_{f2} = 0,261|_{-152,2^\circ} pu$$

$$V_{t0,p} = \dot{V}_{f0} = 0,270|_{-149,38^\circ} pu$$

Já para o lado do secundário, as suas correntes são:

$$I_{t1,s} = I_{t1,p} * a_{c1} = 0,048|_{-4,76^\circ} pu$$

$$I_{t2,s} = I_{t2,p} * a_{c2} = 0,016|_{152^\circ} pu$$

$$I_{t0,s} = 0$$

Enquanto as tensões do secundário se apresentam como a seguir:

$$V_{t1,s} = I_{t1,s} * Z_{c1} = 0,757|_{-18,55^\circ} pu$$

$$V_{t2,s} = I_{t2,s} * Z_{c2} = 0,253|_{-175,36^\circ} pu$$

$$V_{t0,s} = 0$$

Uma vez conhecidas as tensões e correntes de sequência, tanto para o primário como para o secundário, é possível calcular os FDs correspondentes, como abaixo:

$$FD2v_p = \left| \frac{V_{t2,p}}{V_{t1,p}} \right| \cong 0,335$$

$$FD2v_s = \left| \frac{V_{t2,s}}{V_{t1,s}} \right| \cong 0,334$$

$$FD0v_p = \left| \frac{V_{t0,p}}{V_{t1,p}} \right| \cong 0,347$$

$$FD0v_s = \left| \frac{V_{t0,s}}{V_{t1,s}} \right| = 0$$

De forma similar, os FDs para as correntes em ambos os lados são:

$$FD2i_p = \left| \frac{I_{t2,p}}{I_{t1,p}} \right| = 0,333$$

$$FD2i_s = \left| \frac{I_{t2,s}}{I_{t1,s}} \right| = 0,333$$

$$FD0i_p = \left| \frac{I_{t0,p}}{I_{t1,p}} \right| = 0$$

$$FD0i_s = \left| \frac{I_{t0,s}}{I_{t1,s}} \right| = 0$$

### 3.5.2 Falta no secundário do transformador:

Desta feita, a falta fase-terra ocorre do lado secundário do transformador (nos seus terminais de saída) e encontra-se associada com uma impedância de  $1,65 \Omega$  ( $0,89 pu$ ). Tal valor implica, novamente, numa tensão residual de  $0,5 pu$  na fase onde a mesma ocorre.

Com base nas equações (2.6, 2.7 e 2.8) tem-se as seguintes correntes de falta:

$$I_{f1} = I_{f2} = I_{f0} = 0,181 | \underline{-48,38^\circ} pu$$

Cujas correspondentes tensões de sequência no ponto de falta são:

$$V_{f1} = E_1 - Z_1 \cdot I_{f1} = 0,738 | \underline{-11,27^\circ} pu$$

$$V_{f2} = -Z_2 \cdot I_{f2} = 0,311 | \underline{-152,4^\circ} pu$$

$$V_{f0} = -Z_0 \cdot I_{f0} = 0,146 | \underline{-150,32^\circ} pu$$

Por conseguinte, as correntes do lado secundário do transformador, sob as condições postas, são:

$$I_{t1,s} = I_{f1} + \frac{V_{1,falta}}{Z_{c1}} = 0,227 | \underline{-45,57^\circ} pu$$

$$I_{t2,s} = I_{f2} + \frac{V_{2,falta}}{Z_{c2}} = 0,170 | \underline{-53,66^\circ} pu$$

$$I_{t0,s} = I_{f0} + \frac{V_{0,falta}}{Z_{c0}} = 0,176 | \underline{-50,83^\circ} pu$$

Cujas tensões são:

$$V_{t1,s} = V_{f1} = 0,738 | \underline{-11,27^\circ} pu$$

$$V_{t2,s} = V_{f2} = 0,311 | \underline{-152,4^\circ} pu$$

$$V_{t0,s} = V_{f0} = 0,146 | \underline{-150,32^\circ} pu$$

Para o lado primário do transformador, as correntes e tensões são:

$$I_{t1,p} = I_{t1,s} * \overline{a_{c1}} = 0,227 | \underline{-75,57^\circ} pu$$

$$I_{t2,p} = I_{t2,s} * \overline{a_{c2}} = 0,170 | \underline{-23,66^\circ} pu$$



$$I_{t0\_p} = 0$$

$$V_{t1\_p} = Z_{t1} * I_{t1\_p} + V_{1\_falta} * \overline{a_{c1}} = 0,828 | -39,33 pu$$

$$V_{t2\_p} = Z_{t2} * I_{t2\_p} + V_{2\_falta} * \overline{a_{c2}} = 0,170 | -121,8 pu$$

$$V_{t0\_p} = 0$$

As grandezas supra obtidas conduzem aos seguintes valores para os FDs para as tensões e correntes, no primário e secundário do transformador:

$$FD2v_{-p} = \left| \frac{V_{t2\_p}}{V_{t1\_p}} \right| \cong 0,2053$$

$$FD2v_{-s} = \left| \frac{V_{t2\_s}}{V_{t1\_s}} \right| \cong 0,4214$$

$$FD0v_{-p} = \left| \frac{V_{t0\_p}}{V_{t1\_p}} \right| \cong 0$$

$$FD0v_{-s} = \left| \frac{V_{t0\_s}}{V_{t1\_s}} \right| = 0,198$$

$$FD2i_{-p} = \left| \frac{I_{t2\_p}}{I_{t1\_p}} \right| = 0,749$$

$$FD2i_{-s} = \left| \frac{I_{t2\_s}}{I_{t1\_s}} \right| = 0,749$$

$$FD0i_{-p} = \left| \frac{I_{t0\_p}}{I_{t1\_p}} \right| = 0$$

$$FD0i_{-s} = \left| \frac{I_{t0\_s}}{I_{t1\_s}} \right| = 0,775$$

### 3.6 Considerações finais

Uma vez realizado um levantamento dos tipos de transformadores trifásicos mais empregados no cenário nacional, ficou evidenciado que na sua maioria expressiva, são 3 os tipos mais difundidos nas instalações elétricas em operação no país. Esta informação é de grande importância para nortear os trabalhos de desenvolvimento empregando configurações para os enrolamentos primários e secundários em consonância com a realidade de campo.

Visando oferecer uma contribuição didática sobre os tipos de fenômenos que determinam o elenco dos fenômenos VTCDs, ficou, pois, identificado que, não obstante o fato que os eventos aqui tratados não sejam unicamente advindos de curtos-circuitos, estes fenômenos representam uma boa gama dos fatores responsáveis pelas ocorrências. Assim, estas foram as fontes de distúrbios adotadas para fins das exemplificações e estudos conduzidos na pesquisa.

Tomando por base um sistema teste com características bastante simplificadas, porém adequadas aos objetivos de uma primeira etapa do processo avaliativo do desempenho da metodologia proposta, foram conduzidos estudos iniciais, fundamentados em avaliações matemáticas do processo da identificação da responsabilidade das VTCDs.

Os desenvolvimentos realizados permitiram ratificar constatações já feitas no capítulo precedente, as quais são sintetizadas abaixo:

- ✓ Quando a falta ocorre no primário, os valores dos fatores de desequilíbrio da tensão de sequência negativa são aproximadamente iguais para o primário e secundário do transformador;
- ✓ Para uma falta no secundário, tais grandezas se mostram com valores distintos para um e outro lado do transformador de conexão;
- ✓ Por outro lado, os fatores de desequilíbrio de corrente são os mesmos, no primário e secundário, independente da origem da falta;
- ✓ No que tange à tensão de sequência zero, esta ocorre tão apenas do lado em que a falta incide, fato este atrelado com a conexão dos enrolamentos do transformador do sistema 1;
- ✓ Também, só há presença de corrente de sequência zero quando a falta ocorre no secundário, fato este, novamente, devido à ligação aterrada no secundário;
- ✓ Assim, a presença da sequência zero se apresenta como informação que complementa a análise envolvendo a sequência negativa.

Feitas tais considerações, os trabalhos prosseguem, nos termos estabelecidos no capítulo 4, de forma a avaliar, de forma computacional e mais abrangente, o processo de atribuição de responsabilidade sobre as VTCDs até então explorado de forma conceitual.

# CAPÍTULO 4

---

## AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE ANÁLISE

### 4.1 Considerações iniciais

Os trabalhos conduzidos neste capítulo encontram-se direcionados para uma análise mais abrangente da proposta feita por esta dissertação, destinada a identificação da responsabilidade sobre eventos VTCDs.

Para tanto, empregando-se um sistema teste com características mais identificadas com instalações reais, e utilizando os recursos computacionais oferecidos pelo software MATLAB-SIMULINK, são realizados estudos investigativos no domínio do tempo, compreendendo:

- Aplicação de faltas diversas responsáveis por afundamentos de tensão com distintas magnitudes;
- Distintos arranjos para as conexões do transformador de acoplamento;
- Avaliação dos efeitos de eventuais pré-desequilíbrios presentes na rede elétrica de suprimento e da unidade consumidora;
- Estabelecimento de termos comparativos entre os resultados obtidos pelas equações matemáticas e a simulação computacional.

Estes estudos, de caráter mais abrangente que aqueles oferecidos pela modelagem no domínio da frequência anteriormente empregado, se apresentam como uma etapa complementar ao processo de validação da proposição metodológica desta dissertação.

### 4.2 Sistema elétrico teste para os estudos computacionais de desempenho do método

Como já esclarecido, o complexo elétrico do capítulo anterior (“sistema elétrico 1”), justificado por motivos de maior simplicidade as tratativas matemáticas, se apresentou como opção para os desenvolvimentos feitos. Todavia, objetivando maior identidade com situações típicas em campo, para os trabalhos investigativos conduzidos nesta unidade, empregou-se uma estrutura de carga mais complexa. Não obstante o fato que, aparentemente, o emprego dos dois sistemas possa se

mostrar, numa primeira análise, dispensável, vale destacar que a presença de uma unidade consumidora constituída por cargas motrizes, impedância constante, e potência constante, proporcionará uma avaliação mais sistematizada e completa do processo.

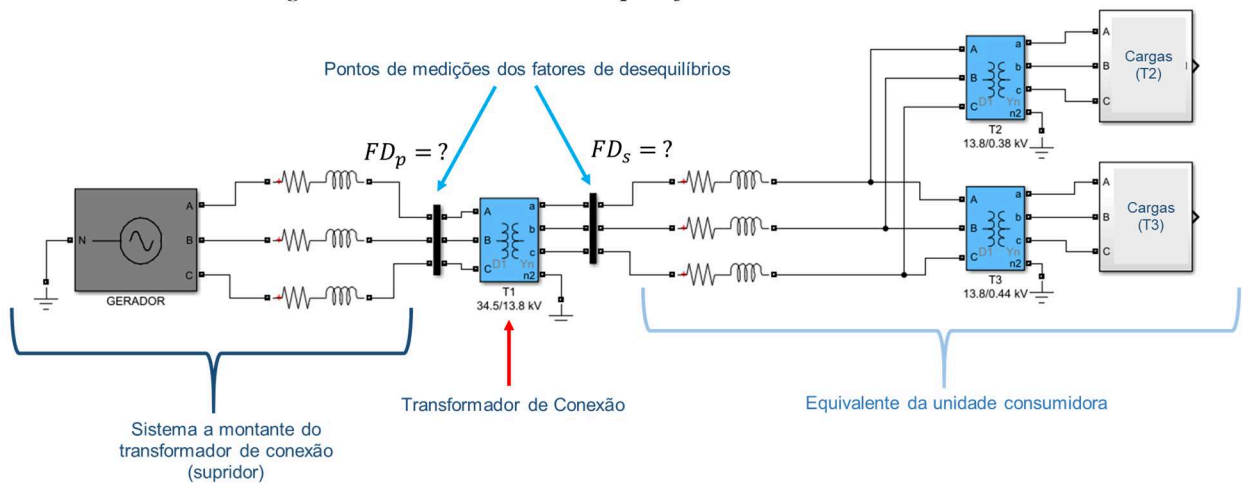
Em consonância com estas premissas, a Tabela 4.1 sintetiza os principais componentes que perfazem o sistema elétrico 2, os parâmetros foram baseados em informações advindas de [21], [41] e [42]. O sistema implementado no simulador Matlab-Simulink, é indicado na Figura 4.1. Uma meritória de destaque refere-se a potência adotada para o transformador T3, muito embora este valor não seja comercial, o objetivo desta opção foi, didaticamente, inserir uma carga equivalente de maior porte que aquelas individualmente supridas por unidades de menor potência nominal.

**Tabela 4.1 Parâmetros do sistema elétrico 2.**

<b>Equivalente da Concessionária</b>	
Tensão de Alimentação	34,5 kV
Nível de Curto Circuito (Scc)	102,55 MVA
X/R	7
<b>Ponto de Análise</b>	
Transformador T1	Relação de Transformação: 34,5kV/13,8kV Potência: 7,5 MVA X: 3 % R: 0,5 %
<b>Cargas Industriais</b>	
Cabos	R: 0,09 $\Omega$ L: 0,42 mH
Transformador T2	Relação de Transformação: 13,8kV/0,38kV Potência: 1,5 MVA X: 3,5 % R: 0,7 %
Cargas ligadas a T2	Conjunto de 3 Motores: 200 kVA; Carga de Potência Constante: 800 kVA
Transformador T3	Relação de Transformação: 13,8kV/0,44kV Potência: 5 MVA X: 3,5 % R: 0,5 %
Cargas ligadas a T3	Carga de Potência Constante: 2 MVA Carga de Impedância Constante: 2 MVA

Fonte: O autor.

Figura 4.1 Sistema elétrico 2 na plataforma Matlab-Simulink.



Fonte: O autor.

Não obstante o reconhecimento que as VTCDs possam advir de vários fenômenos na rede e no consumidor, como já mencionado, a ocorrência de faltas se apresenta como eventos que representam uma das mais comuns fontes dos distúrbios aqui tratados. Diante disso, o processo de análise da eficácia da proposta metodológica contemplado nesta dissertação se baseia na aplicação de curtos-circuitos através de impedâncias distintas, tanto à montante como à jusante do transformador de conexão, as quais resultam em uma diversidade de tensões residuais desequilibradas, tanto à montante quanto a jusante do transformador de conexão, originando as seguintes situações operacionais:

- Falta-leve: produzindo, durante o evento, uma tensão residual da ordem de 0,8 pu para a fase sob falta;
- Falta-moderada: resultando em tensões residuais de cerca de 0,5 pu para a fase sob falta;
- Falta-severa: responsável por uma tensão residual próxima a zero.

Além dos aspectos supra postos, as investigações feitas ainda contemplaram faltas do tipo: fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase, e, falta trifásica-desequilibrada.

Feitas tais considerações, apresenta-se, na sequência, os desempenhos obtidos para o processo de análise da responsabilidade da origem das VTCDs, em consonância com as variáveis de influência supra identificadas.

Para a apresentação dos resultados foi utilizada a seguintes estrutura:

- Definição do local onde se situa a ocorrência do fenômeno responsável pela VTCD;
- Apresentação dos indicadores de desequilíbrios de tensão de sequência negativa  $FD2v$  e nula  $FD0v$ , em valores pu da grandeza de sequência positiva, para o lado primário e secundário do transformador;
- Apresentação dos indicadores de desequilíbrios de corrente de sequência negativa  $FD2i$  e nula  $FD0i$  para o lado primário e secundário do transformador.

### 4.3 Desempenho da metodologia para transformadores $\Delta - Y_n$

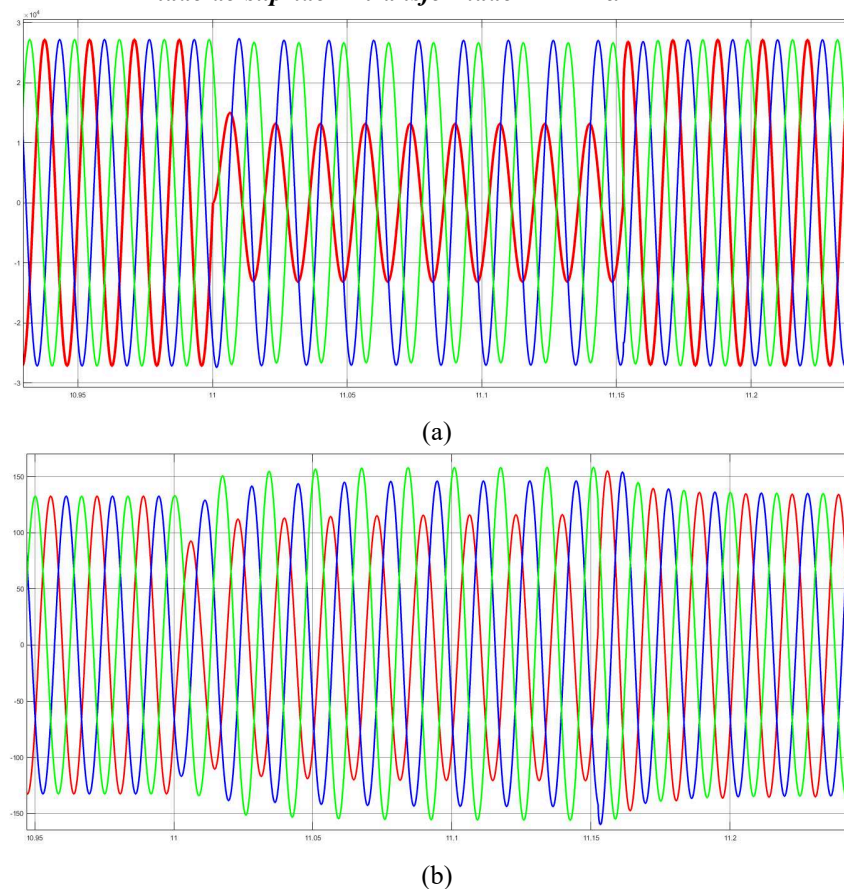
Uma vez estabelecido o sistema elétrico teste quanto a sua topologia e parâmetros, procedese, a seguir, a apresentação dos desempenhos obtidos para os fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero quanto às suas propagações de um para o outro lado do transformador de suprimento do consumidor adotado.

Para os estudos aqui feitos vale destacar que foi selecionada a conexão dos transformadores de maior uso no país, como já identificado em bancos de dados da ANEEL, a saber, os transformadores com primário em delta e secundário em estrela-aterrada. Os demais arranjos serão contemplados posteriormente, de forma mais simplificada quanto a estes últimos aspectos.

#### 4.3.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora

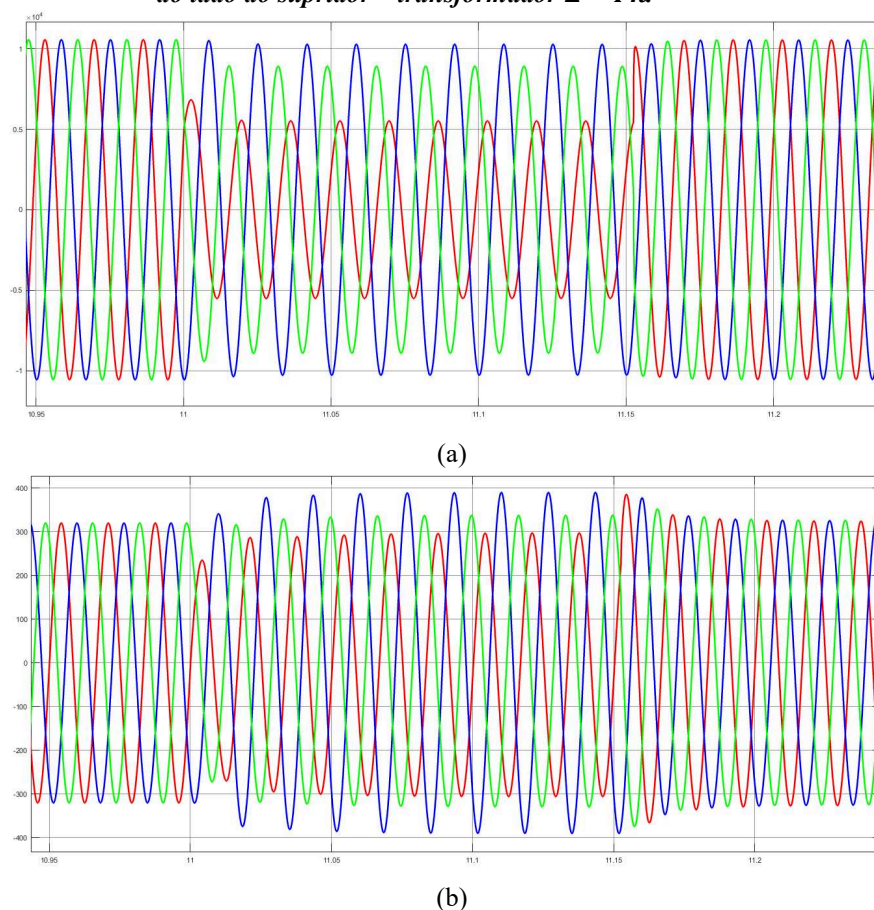
Como resultados dos estudos conduzidos através do software Matlab-Simulink, as Figuras 4.2a e 4.2b apresentam, respectivamente, os oscilogramas para as **tensões** e **correntes** no primário do transformador, para uma falta fase-terra moderada. Complementarmente, as Figuras 4.3a e 4.3b exibem os oscilogramas das mesmas grandezas nos terminais do secundário do transformador.

*Figura 4.2 Oscilogramas de Tensão (a) e Corrente (b) no lado do primário do transformador – VTCD produzida do lado do supridor – transformador  $\Delta - Y_n$ .*



Fonte: O autor.

**Figura 4.3 Oscilogramas de Tensão (a) e Corrente (b) no lado do secundário do transformador – VTCD produzida do lado do suprridor – transformador  $\Delta - Yn$ .**



Fonte: O autor.

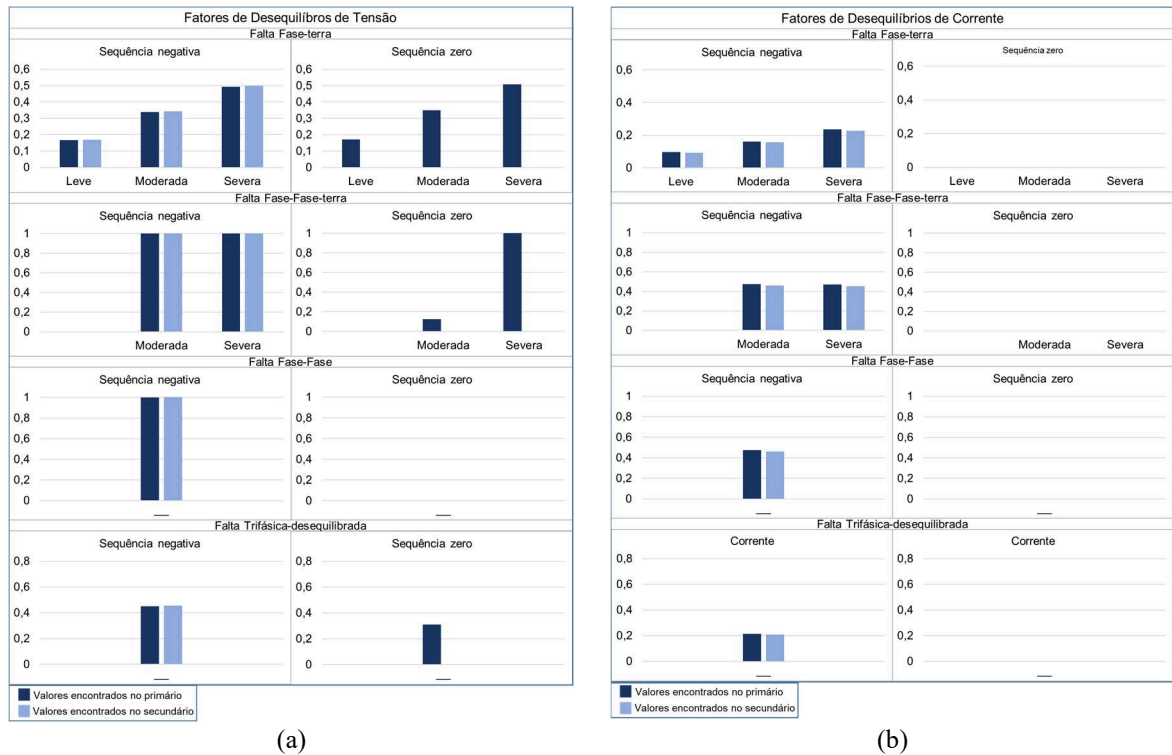
A partir das informações advindas dos estudos computacionais acima expostos, torna-se possível a obtenção das grandezas focadas no processo de análise proposto por esta dissertação, qual seja, os fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero para as tensões e correntes. Naturalmente, os detalhes dos processos de cálculo envolvidos nos procedimentos e a explicitação das variáveis requeridas (valores das tensões e corrente de sequência positiva, negativa e zero) dispensam maiores explicações. Assim, as Figuras 4.4a e 4.4b expressam tão apenas as grandezas de interesse direto aos estudos.

A apresentação dos resultados encontra-se organizado como abaixo:

- No conjunto de barras *à esquerda* os fatores de **desequilíbrio de sequência negativa**, para condições designadas por: leve, moderada e severa de faltas. A cor azul escura é indicativa do valor determinado para o primário do transformador de conexão, enquanto que a cor azul clara corresponde ao mesmo indicador do lado secundário, portanto, o processo de transferência destas grandezas pode ser prontamente comparado e correlacionado;
- Os gráficos *à direita* das figuras correspondem aos fatores de **desequilíbrio de sequência zero**, observando-se a mesma interpretação acima posta, portanto, aquelas em azul escuro encontram-se associadas com a grandeza do lado primário e as em azul claro do lado

secundário. Para estas variáveis vale destacar que, diferentemente do que ocorre para a sequência negativa, as conexões dos transformadores podem impedir a propagação do indicador de um para o outro lado do transformador.

Figura 4.4 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do supridor – transformador  $\Delta - Y_n$ .



Fonte: O autor.

Observando-se os desempenhos obtidos, nos termos retratados nas figuras, pode-se concluir que, para eventos decorrentes de fenômenos anômalos do lado primário do transformador, ou do supridor, constata-se que:

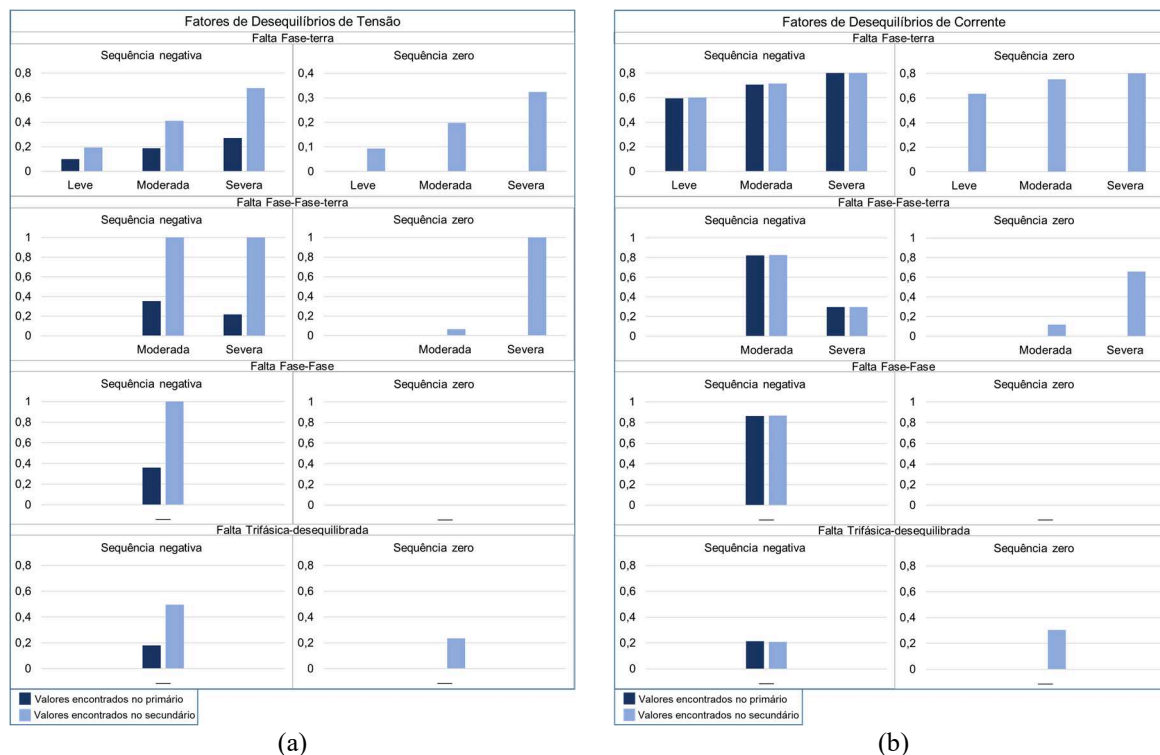
- O  $FD2v$  encontrado é o mesmo em ambos os lados do transformador, independentemente da magnitude da falta encontrada. A intensidade da falta que o sistema está submetido influencia no valor encontrado para o  $FD2v$ , no entanto, não altera a característica deste ser o mesmo em ambos os lados do transformador. Para o  $FD2i$ , conforme era esperado, seu valor também é o mesmo, no primário e secundário do transformador de conexão;
- Em relação ao conteúdo de sequência zero, nota-se que, para as faltas que envolvam o solo, há presença de conteúdo de tensão de sequência zero, e consequentemente  $FD0v$ , no lado da ocorrência da falta, ou seja, no primário do transformador. Em relação a corrente de sequência zero, não há circulação desta, devido a ligação ser  $\Delta - Y_n$ , e a falta ser originária do primário do transformador.



### 4.3.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora

Os resultados atrelados com este caso visam elucidar o desempenho do método da análise considerando-se o mesmo arranjo topológico anteriormente empregado, todavia, sob a ação de eventos VTCDs oriundos do lado do consumidor, o qual encontra-se alimentado pela conexão  $Yn$  do secundário do transformador. Os estudos obedecem a mesma lógica utilizada anteriormente quanto a severidade das faltas e as Figuras 4.5a e 4.5b são indicativas dos fatores de desequilíbrios assim obtidos.

Figura 4.5 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de seqüência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – transformador  $\Delta - Yn$ .



Fonte: O autor.

Os resultados acima expostos conduzem às seguintes constatações:

- Os  $FD2v$  observado no primário e secundário do transformador são bastantes distintos, independentemente da intensidade e tipo da falta. Novamente, a intensidade da falta influenciou somente nos valores dos  $FD2v$ , todavia, não influenciou no diagnóstico apresentado através da metodologia, sinalizando que a falta é proveniente do lado do cliente. O conteúdo de corrente de seqüência, representado por  $FD2i$ , novamente foi o mesmo em ambos os lados do transformador de conexão;
- Analisando-se o conteúdo de seqüência zero, observa-se que, para as faltas que envolvam o solo, outra vez, há presença do conteúdo de tensão de seqüência zero somente no lado da ocorrência da falta, isto é, no secundário do transformador. Em relação a corrente de seqüência zero, desta vez, há circulação desta no lado em que ocorre a falta, de modo que, a  $FD0i$  se torna diferente de zero, isso acontece em razão da ligação do secundário do transformador ser  $Yn$ .

## 4.4 Desempenho da metodologia para transformadores com outras conexões comerciais

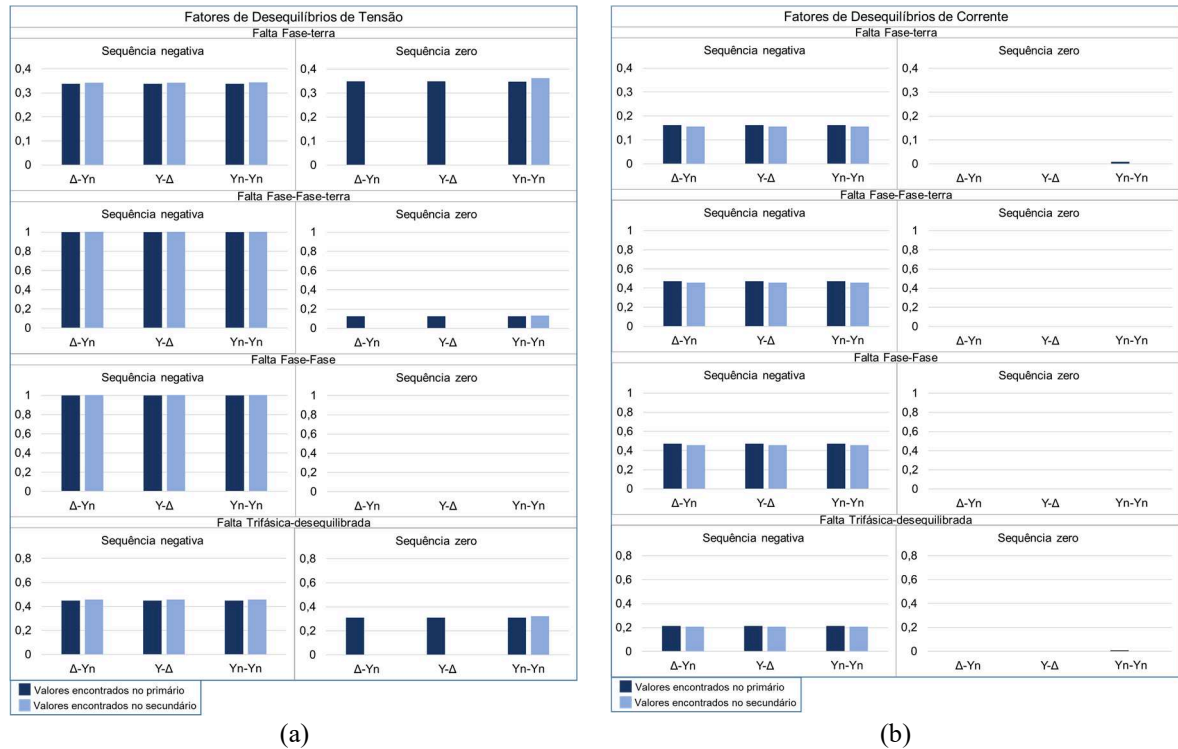
Uma vez constatada a eficácia do processo de identificação da origem das VTCDs para os transformadores de uso mais difundido no mercado, procede-se, nesta etapa, a continuidade dos estudos de desempenho computacional do método, empregando-se distintos tipos de conexões já destacadas como utilizadas pelo setor elétrico.

Como já identificado no capítulo 3, somado à conexão explorada na seção anterior, os trabalhos investigativos ora apresentados encontram-se consonantes com instalações elétricas, cujos transformadores de conexão se apresentam como do tipo:  $\Delta - Yn$  (91% das unidades instaladas),  $Y - \Delta$  (4%) e  $Yn - Yn$  (3%). Para estes, da mesma forma já realizada, para a produção dos distúrbios associados com as VTCDs são aplicados curtos-circuitos fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase e, por fim, trifásicos desequilibrados. No que tange a intensidade das tensões residuais para os fenômenos, estes são adotados como produzindo níveis da ordem de 0,5 pu.

### 4.4.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora

Seguindo a mesma lógica adotada para os trabalhos, as Figuras 4.6a e 4.6b mostram os desempenhos obtidos para os fatores de desequilíbrio nos termos estabelecidos pela estratégia desta dissertação. Comparativamente aos resultados explorados na seção anterior, destaca-se que, para a presente situação, os mesmos são apresentados com todas as VTCDs conduzindo a tensões residuais da ordem de 0,5 pu. As grandezas correspondentes aos indicadores de desequilíbrio de tensão e corrente, de sequência negativa e zero, são indicadas para cada tipo de transformador, conforme suas conexões para os enrolamentos do primário e secundário. Também ressalta-se que, não obstante as grandezas associadas com o transformador  $\Delta - Yn$  tenham sido considerados anteriormente, os mesmos são reproduzidos aqui apenas para o estabelecimento dos termos de referência com os demais.

Figura 4.6 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de seqüência negativa e zero – VTCD produzida do lado do supridor – Diferentes conexões de transformadores.



Fonte: O autor.

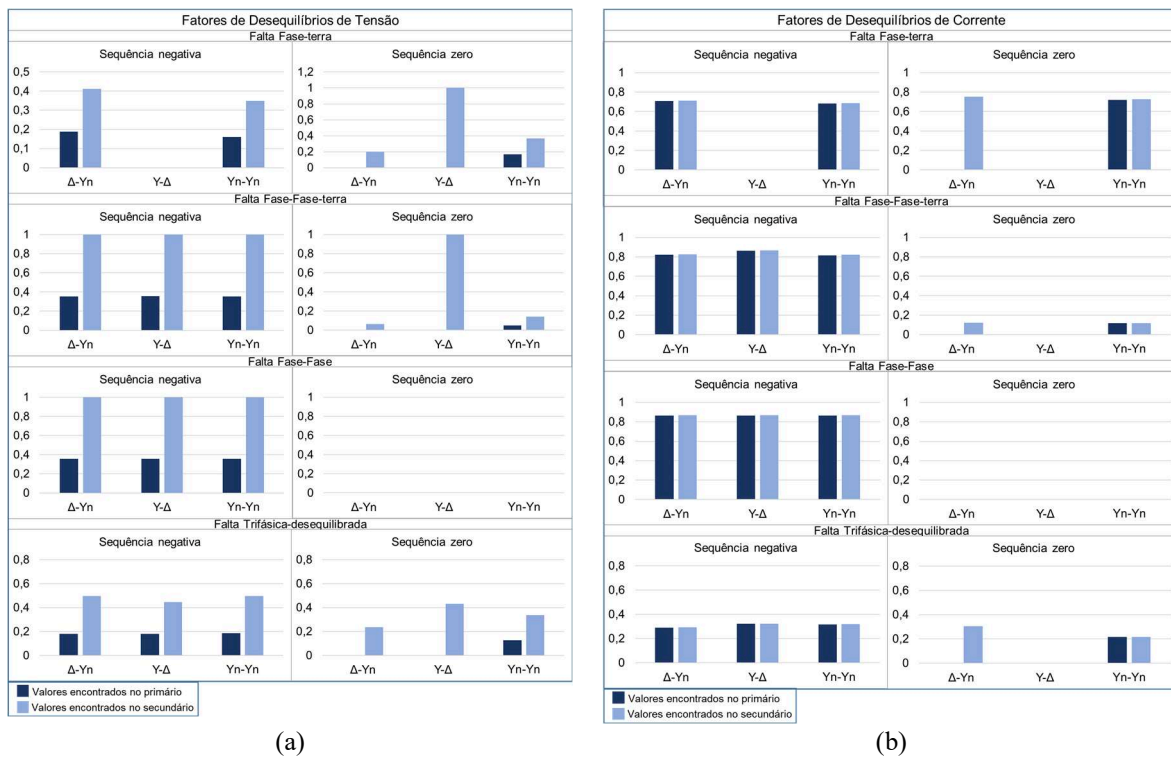
Os resultados evidenciam que:

- Apesar de serem empregadas diferentes configurações para as ligações dos transformadores, os  $FD2v$  verificados em ambos os lados do transformador são iguais, mantendo o padrão de análise esperado pelo método. É importante destacar que, a configuração de ligação do transformador também não influenciou na magnitude dos  $FD2v$  encontrados. Assim como nos casos anteriores, o  $FD2i$  também é idêntico no primário e secundário do transformador;
- Em relação ao  $FD0v$ , o mesmo merece destaque, para faltas que envolvam o solo e, sendo esta oriunda do primário do transformador, para as ligações,  $\Delta - Yn$  e  $Y - \Delta$ , não há transferência do conteúdo de tensão de seqüência zero para o lado do secundário, contudo, para a ligação  $Yn - Yn$  há transferência para o secundário. Observando-se o  $FD0i$ , nota-se que, devido a configuração do sistema, seu valor é muito pequeno, até mesmo para a ligação  $Yn - Yn$ .

#### 4.4.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora

Tal como realizado para os estudos da seção 4.3, apresenta-se, nas Figuras 4.7a e 4.7b, os resultados das simulações para a incidência das faltas responsáveis pelos eventos do lado do consumidor.

Figura 4.7 Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de seqüência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – Diferentes conexões de transformadores.



(a)

(b)

Fonte: O autor.

Os desempenhos obtidos apontam para as seguintes constatações:

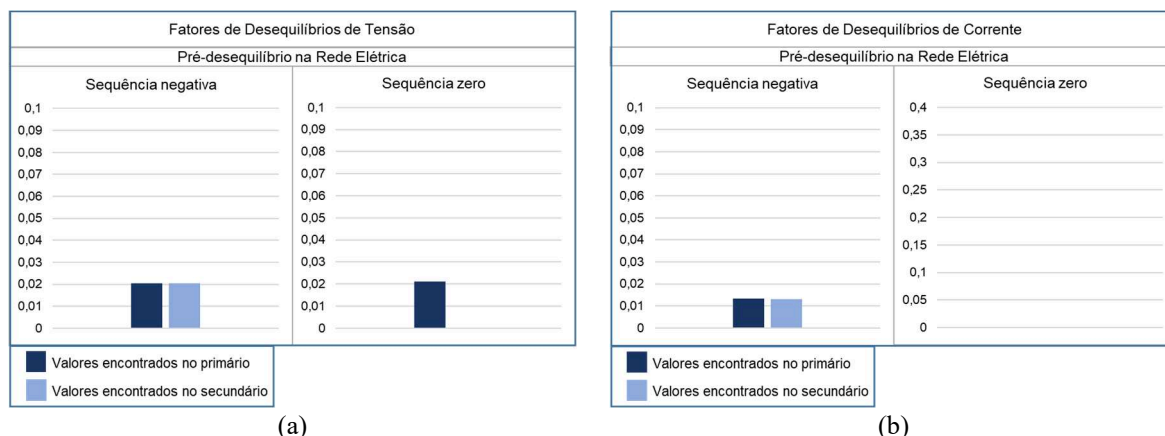
- De um modo geral, o  $FD2v$  foi significativamente diferente em ambos os lados do transformador, conforme esperado pelo método proposto. Uma observação a ser realizada envolve a falta Fase-terra sob a presença de um transformador com ligação  $Y - \Delta$ , para esse caso,  $FD2v$  foi nulo em ambos os lados. Esse comportamento ocorre em virtude da configuração do circuito utilizado, onde, devido aos transformadores responsáveis por conectar a carga no sistema terem conexão no primário em delta, ou seja, sem a conexão com o solo, ocasiona ao sistema uma não circulação de corrente de seqüência negativa na ocorrência de uma falta Fase-terra. Analisando-se os  $FD2i$ , estes são iguais no primário e secundário do transformador, independente da configuração analisada.
- No tocante a análise das componentes de seqüência zero, para as faltas que envolvem o solo, observa-se a presença do conteúdo de tensão de seqüência zero somente no lado em que ocorre a falta, exceto para a ligação  $Yn - Yn$ , em que há presença do conteúdo de seqüência zero em ambos os lados. Em relação a corrente de seqüência zero, só existe circulação desta nos lados de conexões  $Yn$ .

### 4.5 Análise dos efeitos de pré-desequilíbrios presentes na rede de suprimento

Uma vez constatado que o processo de análise se mostra compatível com as expectativas, um questionamento passível de ser feito refere-se a correlação entre a resposta do processo diante da presença de pré-desequilíbrios nas redes de suprimento. Estes, naturalmente, teriam sido atribuídos à operação normal da rede elétrica sob condições não ideais de balanceamento paramétrico de seus componentes ou de consumidores outros que o considerado no processo avaliativo.

Objetivando explorar os efeitos deste fator de impacto, foram considerados níveis prévios de desequilíbrios advindos de alterações do ângulo da fase B, originalmente de  $-120^\circ$  para  $-116,5^\circ$ , produzindo, assim, níveis de 2%. Tal patamar se apresenta compatível com os valores limites estabelecidos por documentos normativos, a exemplo do PRODIST-Módulo 8 [3]. A Figura 4.8 é indicativa deste efeito sobre os enrolamentos primários do transformador, novamente adotado como  $\Delta - Yn$ . As grandezas indicadas mostram os fatores de desequilíbrio (de sequência negativa e zero) de tensão e corrente, no primário e secundário do transformador de conexão, considerando-se tão apenas a condição operacional pré ocorrência do evento.

**Figura 4.8. Fatores de desequilíbrios de Tensão e Corrente de sequência negativa e zero – pré-desequilíbrio imposto ao supridor – transformador  $\Delta - Yn$ .**

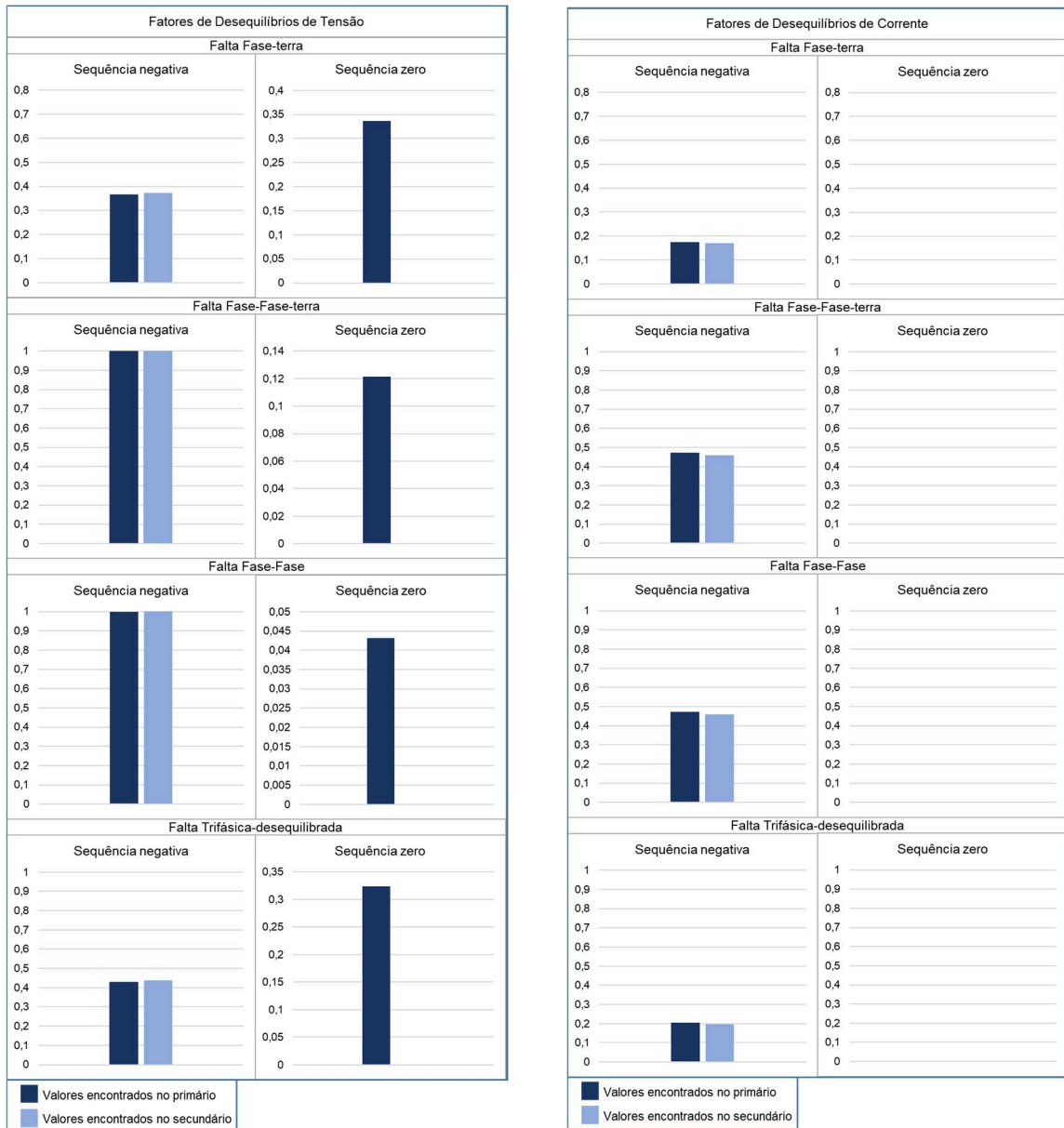


Fonte: O autor.

#### 4.5.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora

À luz das condições supra postas, procede-se, agora, a avaliação do comportamento da metodologia quando da presença de eventuais pré-desequilíbrios. Nestes termos, as Figuras 4.9a e 4.9b mostram as performances do processo para distintos tipos de VTCDs.

**Figura 4.9. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do supridor – Pré-desequilíbrio na rede.**



(a)

(b)

Fonte: O autor.

Os resultados anteriores evidenciam que:

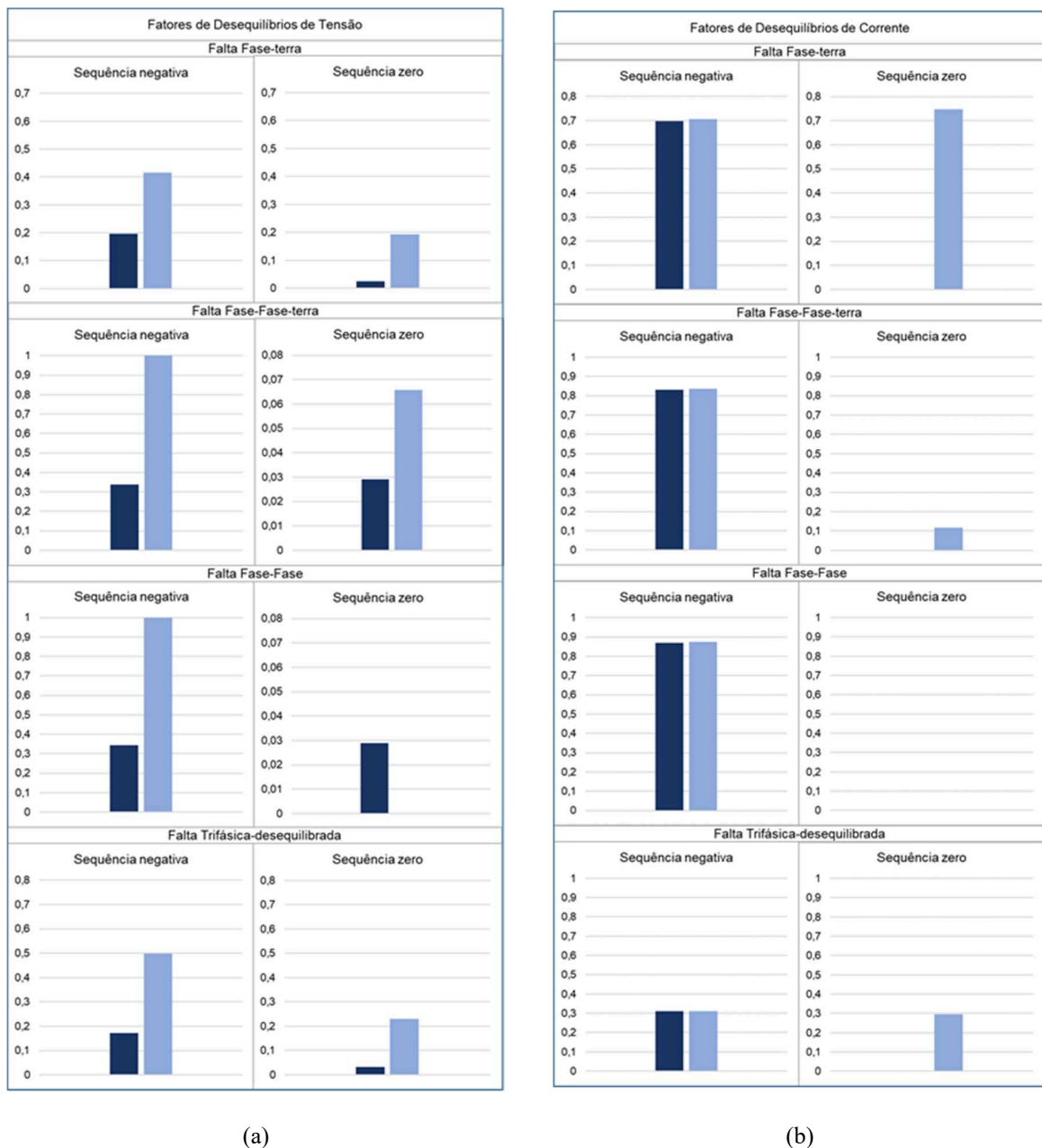
- O pré-desequilíbrio imposto na rede é repassado para o secundário do transformador, de modo que, o  $FD2v$  é o mesmo em ambos os lados do mesmo. Sob condições de manifestação das VTCDs o  $FD2v$  é similar para os dois lados do transformador, o mesmo ocorrendo com o  $FD2i$ ;
- Analisando o conteúdo de sequência zero, nota-se que, a rede com o pré-desequilíbrio já se apresentava com certo conteúdo de tensão de sequência zero. Esta não é transferida para o secundário do transformador para a conexão utilizada. Quando da VTCD atrelada com uma falta à terra, o correspondente fator de desequilíbrio é intensificado, entretanto, a não

transferência para o secundário continua sendo assegurada. Já, para a falta fase-fase, constata-se um conteúdo de sequência zero proveniente do pré-desequilíbrio da rede. Em relação a corrente de sequência zero, devido as características do arranjo, esta não se manifesta quer no primário ou secundário do transformador.

### 4.5.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora

No que tange ao desempenho do sistema quando a origem dos eventos das VTCDs ocorre do lado da unidade consumidora, os resultados das simulações encontram-se fornecidos nas Figuras 4.10a e 4.10b.

**Figura 4.10. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – Pré-desequilíbrio na rede.**



Fonte: O autor.

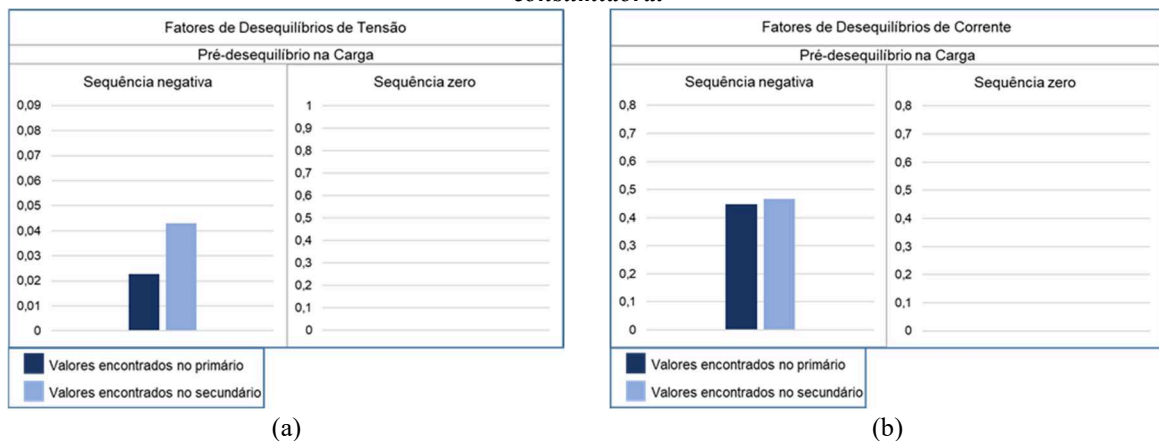
As figuras evidenciam o seguinte desempenho:

- O princípio de análise do método se mantém inalterado em seu comportamento físico esperado, indicando que os  $FD2v$  são bastante distintos para o primário e secundário do transformador. Novamente, o  $FD2i$  se mantém igual para os dois lados do transformador;
- Analisando-se o conteúdo de sequência zero de tensão, percebe-se um nível maior no secundário quando de incidência de faltas tipo fase-terra. Para o primário, observa-se um pequeno conteúdo de tensão de sequência zero, advinda do pré-desequilíbrio da rede. Em relação a circulação da corrente de sequência zero, constata-se a presença desta apenas no lado  $Yn$ .

#### 4.6 Análise dos efeitos de pré-desequilíbrios presentes na unidade consumidora

Para a realização da investigação aqui considerada, a presença do pré-desequilíbrio foi atribuída à carga suprida pelo transformador T3. Assim, foi considerado que, 80% da potência total encontrava-se conectada à fase A, e os demais 20% dividido entre as demais. Esta condição operacional impôs um nível de desequilíbrio de tensão próximo de 2% no barramento de conexão do transformador T1, como indicado na Figura 4.11.

Figura 4.11. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) para um pré-desequilíbrio nas cargas da unidade consumidora.



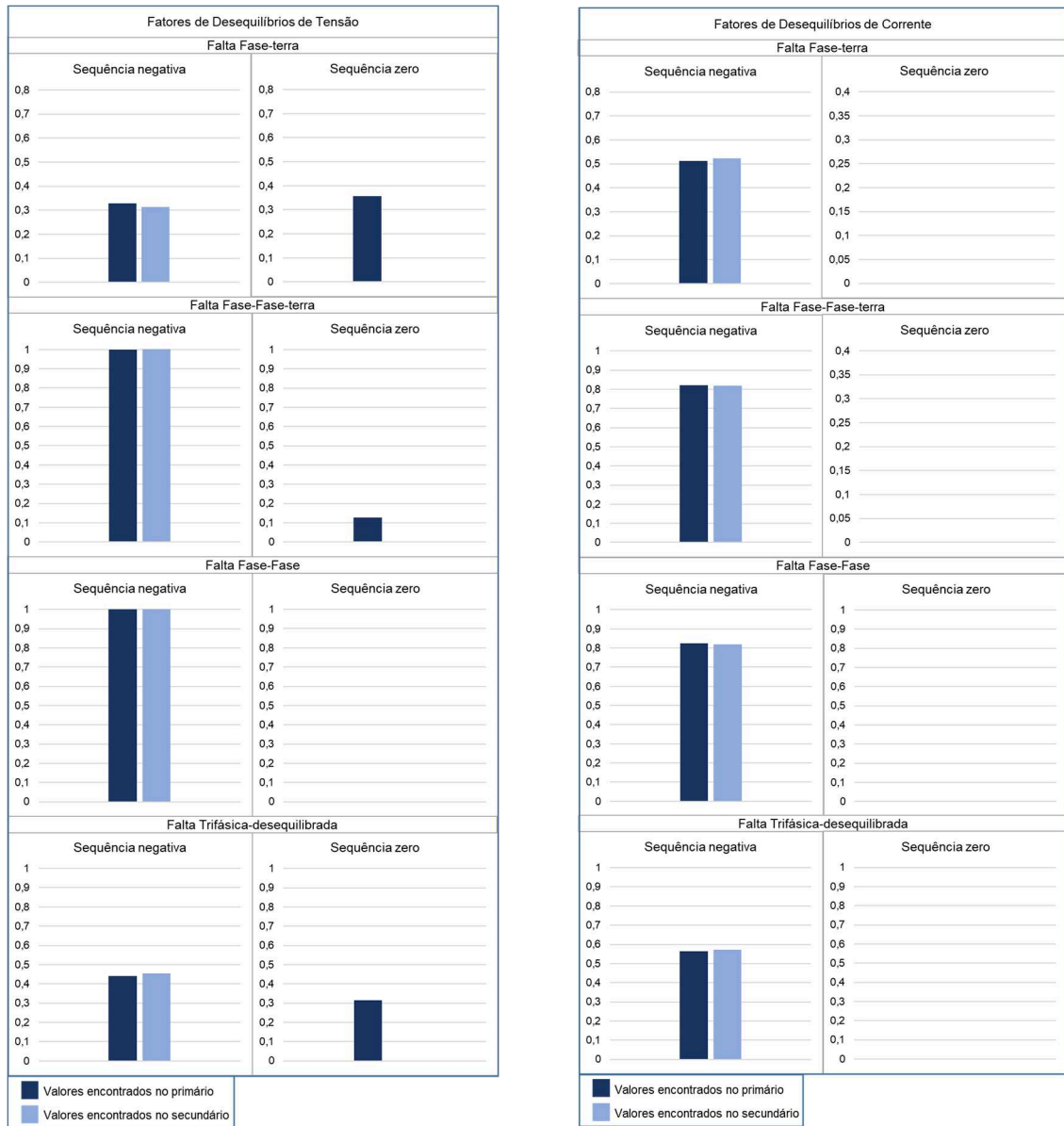
Fonte: O autor.

##### 4.6.1 Resultados para Eventos advindos do lado rede supridora

Para as mesmas condições postas para os estudos conduzidos na seção 4.5.1, tem-se o desempenho sintetizado nas Figuras 4.12a e 4.12b.



**Figura 4.12. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de seqüência negativa e zero – VTCD produzida do lado do suprridor – Pré-desequilíbrio nas cargas da unidade consumidora.**



(a)

(b)

Fonte: O autor.

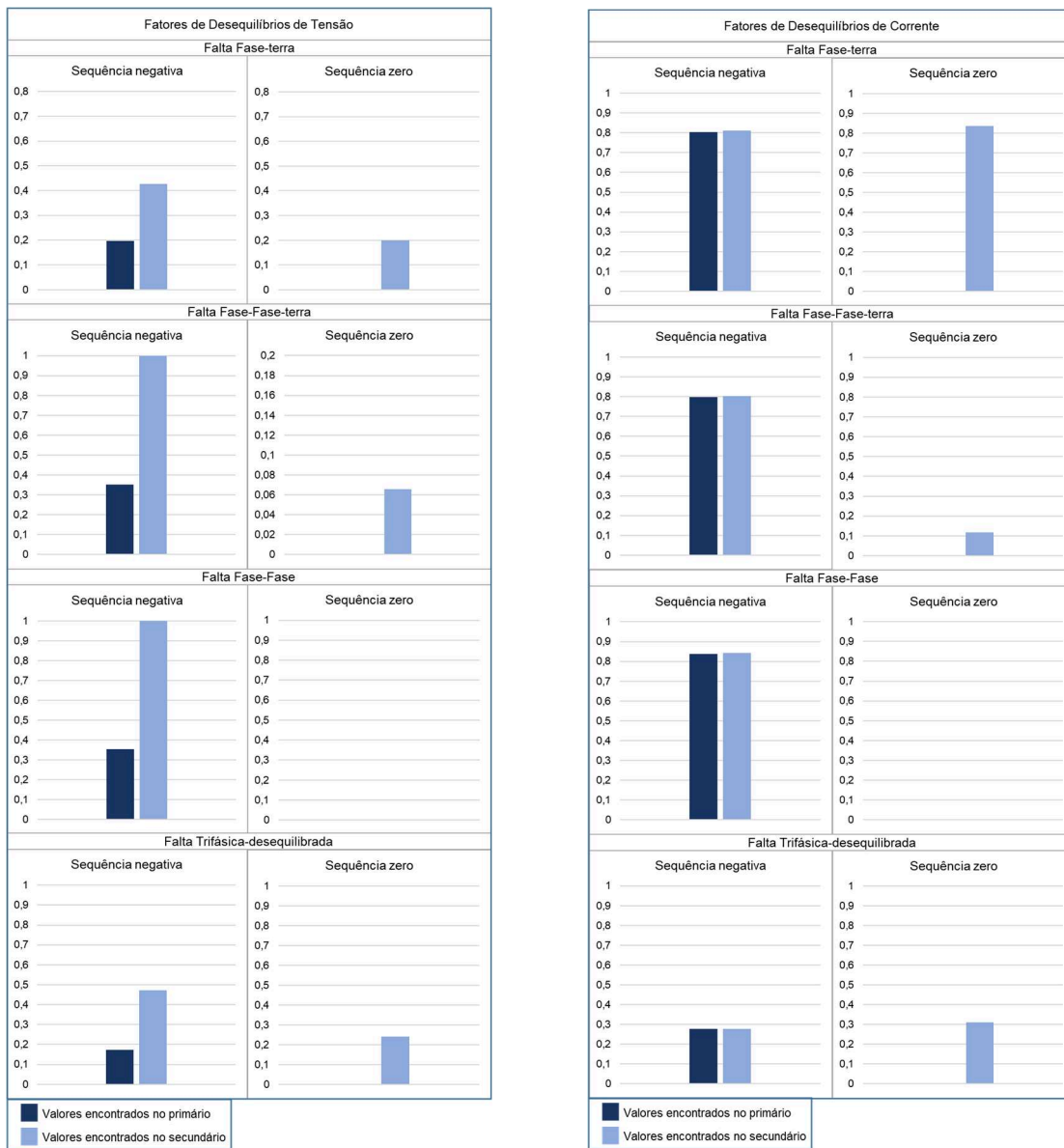
Os resultados anteriores permitem constatar que:

- Assim como nos casos anteriores, os  $FD2v$  encontrados em ambos os lados do transformador são iguais, mantendo-se os resultados para faltas advindas do primário do transformador. Os  $FD2i$  também são os mesmos em ambos os lados do transformador;
- Quanto ao conteúdo de tensão de seqüência zero, nota-se a presença desta somente no lado de ocorrência da falta (primário). Pelas características do sistema não há circulação de corrente de seqüência zero.

### 4.6.2 Resultados para Eventos advindos do lado da unidade consumidora

Para a situação relacionada com a origem dos eventos de VTCD do lado do consumidor, as Figuras 4.13a e 4.13b expressam o desempenho obtido.

Figura 4.13. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de seqüência negativa e zero – VTCD produzida do lado da unidade consumidora – Pré-desequilíbrio nas cargas da unidade consumidora.



(a)

(b)

Fonte: O autor.

Os desempenhos obtidos revelam que:

- Mantendo-se a tendência das análises antecedentes, os  $FD2v$  são bastantes distintos entre um e outro lado do transformador, assim como os  $FD2i$ , que também manteve o padrão observado previamente;
- Quanto ao conteúdo de seqüência zero, nota-se a presença do conteúdo de tensão e corrente somente no lado de ocorrência das faltas, ou seja, no lado em que há conexão  $Y_n$ .

## **4.7 Comparação entre os desenvolvimentos matemáticos e a simulação computacional**

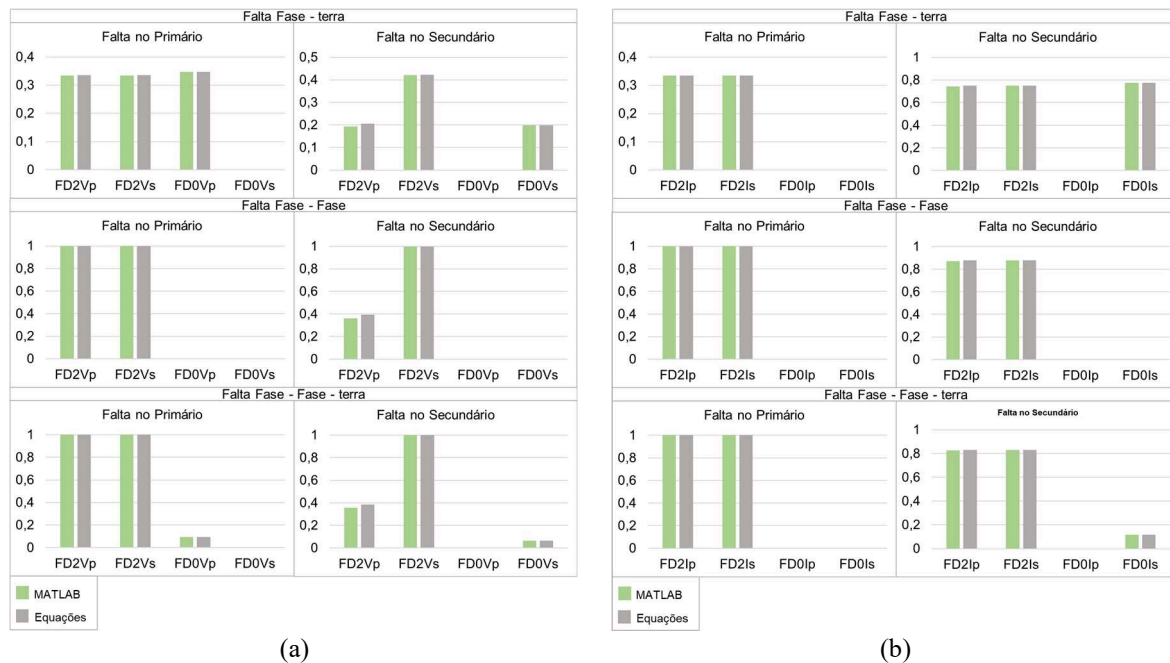
Feita as diversas análises apresentadas e discutidas nas seções precedentes, é feita, agora, uma comparação entre os comportamentos do processo de transferência dos indicadores associados com os fatores de desequilíbrio, obtidos através das equações matemáticas desenvolvidas e dos estudos computacionais feitos na plataforma Matlab-Simulink. Para tanto, como não poderia ser diferente, recorre-se, novamente, aos resultados obtidos para o sistema elétrico 1, o qual, é também objeto de avaliações computacionais nos termos já estabelecidos para o arranjo mais completo supra explorado. Assim, em termos comparativos, as performances do processo de transferência dos indicadores de desequilíbrio através dos dois procedimentos postos são analisados.

Vale ressaltar que esta avaliação se mostra relevante uma vez que o processo matemático foi embasado totalmente em formulações no domínio da frequência, enquanto que os estudos conduzidos com o software estão fundamentados em técnicas de modelagem no domínio do tempo. Portanto, são processos de análises distintos e, sendo seus resultados aderentes, fica então estabelecida uma etapa, mesmo que embrionária, de validação da proposta desta dissertação.

### **4.7.1 Avaliação comparativa dos desequilíbrios de tensão e corrente - transformador $\Delta - Y_n$**

As Figuras 4.14a e 4.14b, associadas com os fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero expressam que, independentemente do caso analisado, as grandezas se mostram muito próximas, quer sejam elas obtidas pelas expressões matemáticas, quer sejam advindas da simulação computacional.

Figura 4.14. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de seqüência negativa e zero para a ligação  $\Delta - Yn$ : Comparação entre valores encontrados através do software MATLAB-Simulink e Equações Matemáticas

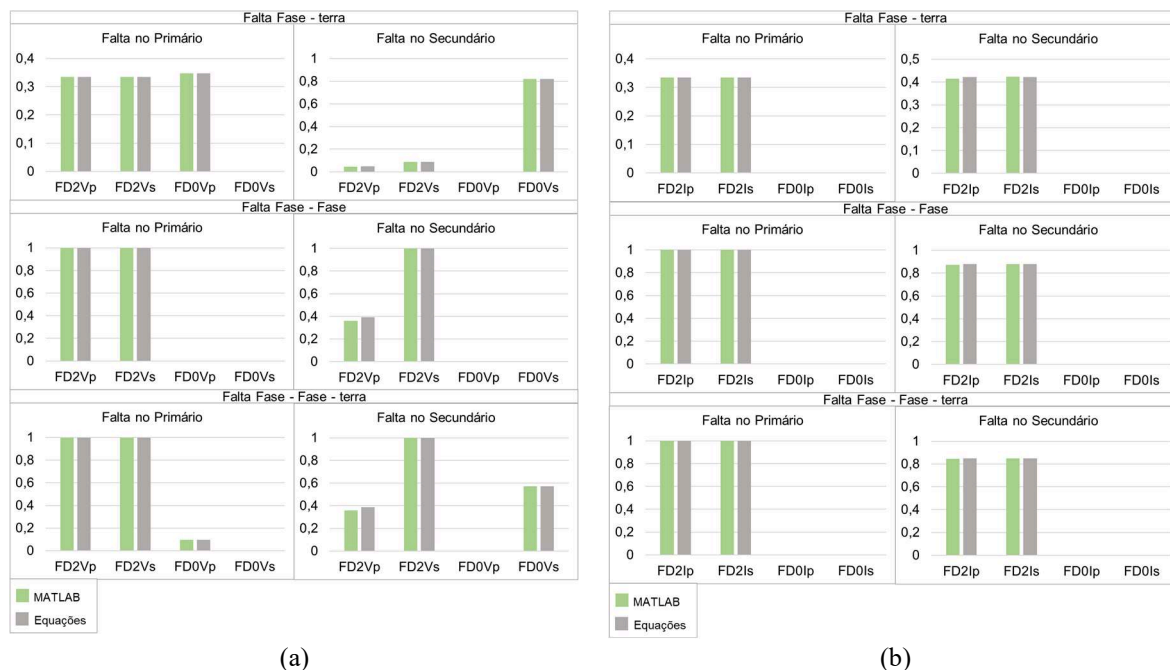


Fonte: O autor.

#### 4.7.2 Avaliação comparativa dos desequilíbrios de tensão e corrente - transformador $Y - \Delta$

Os resultados encontram-se fornecidos nas Figuras 4.15a e 4.15b, as quais evidenciam que, novamente, há total aderência entre os mesmos.

Figura 4.15. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de seqüência negativa e zero para a ligação  $Y - \Delta$ : Comparação entre valores encontrados através do software MATLAB-Simulink e Equações Matemáticas

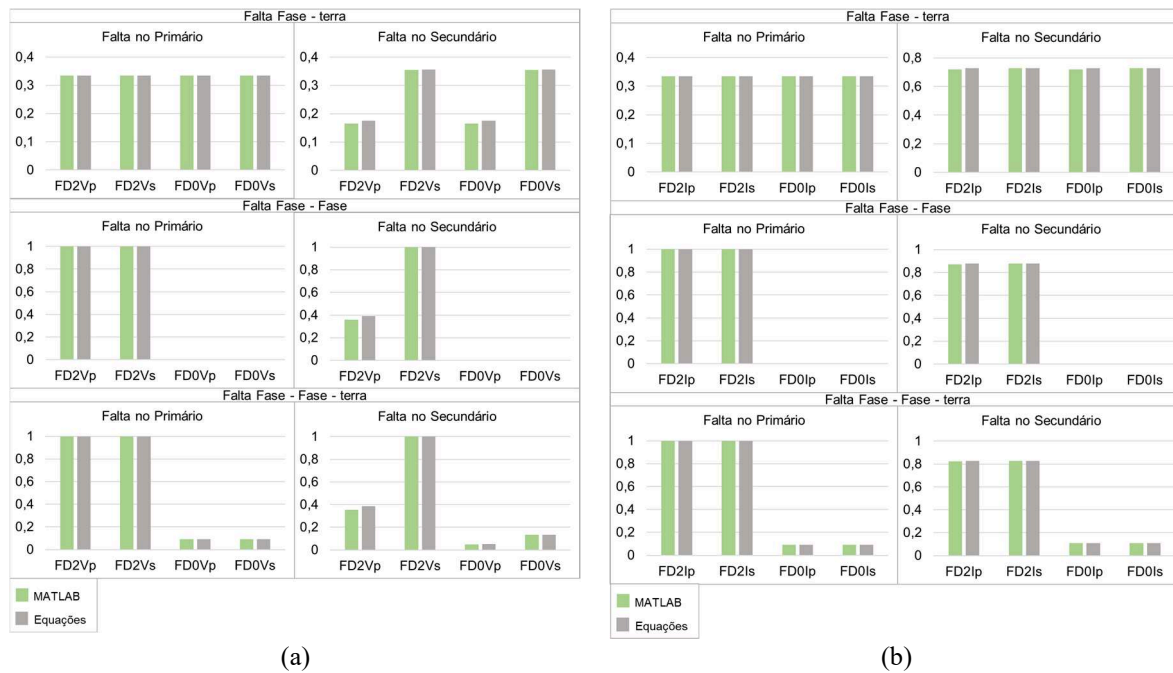


Fonte: O autor.

### 4.7.3 Avaliação comparativa dos desequilíbrios de tensão e corrente - transformador $Y_n - Y_n$

Por fim, apresenta-se, na sequência, os desempenhos computacionais e matemáticos obtidos para os fatores de desequilíbrio par a ligação  $Y_n - Y_n$ . O comportamento das grandezas obedece a mesma tendência anteriormente registrada.

Figura 4.16. Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) de sequência negativa e zero para a ligação  $Y_n - Y_n$ : Comparação entre valores encontrados através do software MATLAB-Simulink e Equações Matemáticas



Fonte: O autor.

## 4.8 Considerações finais

Os trabalhos investigativos realizados neste capítulo permitem estabelecer os seguintes pontos conclusivos:

- ✓ O método se mostrou com grandes perspectivas aplicativas, visto sua eficácia verificada para todas as avaliações conduzidas, as quais envolveram: distintos configurações para os enrolamentos dos transformadores; diferentes VTCDs oriundas de curtos-circuitos que conduziram a uma diversidade de tipos e valores para suas tensões residuais; presença de pré-desequilíbrios inerentes à rede supridora ou unidade consumidora; dentre outros aspectos;
- ✓ A utilização do conteúdo de tensão de sequência negativa permitiu uma análise mais eficiente quanto a atribuição da origem do evento causador da VTCD, visto que esta grandeza não depende do tipo de ligação do transformador e pode ser facilmente determinada apenas através do conhecimento das magnitudes das tensões de linha (método Cigré);

- ✓ Por outro lado, o conteúdo de corrente de sequência negativa não se mostra como grandeza indicativa para fins da atribuição de responsabilidade, pois, independentemente do caso, esta variável sempre tem o mesmo valor em ambos os lados do transformador;
- ✓ O conteúdo de sequência zero se mostra uma variável relevante para algumas situações, e também, pode ser utilizado como uma forma de complemento da análise envolvendo a tensão de sequência negativa, pois, tal componente é fortemente dependente do tipo de ligação do transformador e da natureza da falta;
- ✓ Visando uma análise de validação do processo, estudos conduzidos com base em técnicas de modelagem no domínio do tempo e da frequência foram conduzidos, indicando total consonância entre os desempenhos quando da avaliação da responsabilidade do evento manifestado.

# CAPÍTULO 5

---

## CONCLUSÕES

Uma vez feita a contextualização da área de atuação deste trabalho de pesquisa e constatada a necessidade de desenvolvimentos complementares voltados para o estabelecimento de uma metodologia para a atribuição de responsabilidade das VTCDS, a pesquisa conduzida nesta dissertação de mestrado se revestiu, num primeiro momento, em estabelecer a fundamentação teórica para expor os princípios básicos para o embasamento da proposição de uma estratégia de análise aos fins almejados. Assim, alicerçado em princípios clássicos da teoria de curtos trifásicos desequilibrados, foram desenvolvidas as bases matemáticas para a metodologia idealizada. Estas, como objetivo fim, culminaram em expressões para os fatores de desequilíbrio de sequência positiva e negativa das tensões e corrente, de um e outro lado do transformador de conexão entre o supridor e a unidade consumidora focados nos estudos. Através de uma análise destes indicadores e dos processos de transferência dos mesmos, do primário para o secundário, ou vice-versa, foram estabelecidas as premissas do método de análise.

As primeiras avaliações conduzidas permitiram observar que, quando as fontes de VTCDs se apresentam do lado primário, os FDs de sequência negativa para o primário e secundário apontavam os mesmos valores tanto para as tensões como para as correntes, como seria esperado. Quanto aos FDs de sequência zero, o processo de transferência pelos enrolamentos do transformador já se mostrou dependente do tipo de ligação do transformador, como determinado pela teoria clássica.

Diferentemente do comportamento acima, quando a origem das VTCDs se apresentava do lado secundário ou do consumidor, os FDs de tensão de sequência negativa indicavam valores distintos entre o primário e secundário. O motivo desta diferença foi devidamente justificado no capítulo 2. Em relação aos FDs de corrente, estes evidenciaram valores iguais entre o primário e o secundário do transformador, enquanto que as correspondentes grandezas de sequência nula, mais uma vez, se apresentaram dependentes da conexão empregada para o transformador.

O capítulo 3 abordou os resultados de um levantamento, à nível nacional, dos tipos de transformadores trifásicos, quanto aos seus arranjos de conexão em prática. Do exposto ficou evidenciado que na sua maioria expressiva, são 3 os tipos mais difundidos nas instalações elétricas em operação no país. Esta informação foi decisiva para a caracterização das conexões típicas a serem pesquisadas quando dos estudos de desempenho da metodologia. Somado a esta questão, foram

também sintetizados os tipos de VTCDs e apresentadas as justificativas para que os estudos fossem conduzidos à luz da incidência de faltas do tipo curto-circuito, visto serem estas, uma das mais expressivas fontes dos fenômenos aqui considerados. Por fim, foi proposto um sistema elétrico radial simples, o qual serviu como caso teste para as primeiras investigações, ainda de cunho matemático, para a análise da factibilidade da proposta metodológica desta dissertação. Os desenvolvimentos feitos permitiram constatar que, quando a falta ocorre no primário, os valores dos fatores de desequilíbrio da tensão de sequência negativa são aproximadamente iguais para o primário e secundário do transformador. Já, para uma falta no secundário, tais grandezas se mostram com valores bastantes distintos. Quanto aos fatores de desequilíbrio de corrente, estes são os mesmos, no primário e secundário, independente da origem da falta. No que tange à tensão de sequência zero, esta é encontrada tão apenas do lado em que o evento ocorre e, só há presença de corrente de sequência zero quando a origem do distúrbio está no secundário, fato este atribuído à conexão do transformador. Assim, a presença da sequência zero se apresenta como informação que complementa a análise envolvendo a sequência negativa.

Utilizando um sistema elétrico com propriedades mais compatíveis com a realidade de campo, o capítulo 4 foi dedicado a análises computacionais mais abrangentes sobre a eficácia do processo de análise. Os estudos evidenciaram grandes perspectivas aplicativas, visto sua consistência verificada para todas as avaliações conduzidas, as quais envolveram: distintas configurações para os enrolamentos dos transformadores; diferentes VTCDs; presença de pré-desequilíbrios inerentes à rede supridora ou unidade consumidora; dentre outros aspectos. Mais uma vez, os FDs de tensão de sequência negativa permitiram uma análise eficiente da atribuição da origem do evento causador da VTCD, visto que esta grandeza não depende do tipo de ligação do transformador. Por outro lado, o conteúdo de corrente de sequência negativa não se mostrou útil como indicador aos fins almejados, pois, independentemente do caso, esta variável sempre tem o mesmo valor em ambos os lados do transformador. No que se refere ao conteúdo de sequência zero, esta se mostra uma variável relevante para algumas situações, e também, como um suporte ao uso da tensão de sequência negativa.

Numa última fase do processo avaliativo, foram realizados estudos comparativos com base nas técnicas de modelagem no domínio do tempo e da frequência foram conduzidos, indicando total consonância entre os desempenhos do processo da análise para a avaliação da responsabilidade do evento manifestado.

Sintetizando, os resultados dos desenvolvimentos matemáticos e computacionais obtidos nesta dissertação permitem constatar que:

- Quando as faltas originam as VTCDs a montante do transformador, os fatores de desequilíbrios das tensões e correntes de sequência negativa apresentam os mesmos valores do lado primário e secundário;



- Por outro lado, quando o evento ocorre do lado secundário, os fatores de desequilíbrios das tensões de sequência negativa são distintos para os dois lados do transformador. Para esse caso também ficou constatado que os fatores de desequilíbrios das correntes são praticamente iguais para ambos os lados do transformador;
- Assim, os fatores de desequilíbrios de tensão de sequência negativa são os principais indicadores a serem analisados, devido a sua aplicabilidade as mais distintas situações e, a sua fácil implementação em campo, pois, para sua obtenção, é necessário somente os valores das tensões de linha (Cigré);
- Quanto a questão do fator de desequilíbrio de sequência zero, notou-se que, caso este indicador seja passível de medição, os mesmos não modificam as constatações supra feitas, mas apenas oferecem uma base complementar para o processo de identificação da responsabilidade sobre a origem do distúrbio em questão. Como esperado, a presença do fator de desequilíbrio de sequência zero somente se faz presente nas tensões e correntes quando a causa da VTCD possui correlação com faltas envolvendo a terra. De fato, em se tratando de transformadores com conexões  $\Delta$ -Yn e Y- $\Delta$ , pode-se observar o fator de sequência zero somente no lado onde se manifestou a falta. Para a conexão Yn-Yn, entretanto, tal observação não é aplicável.

A partir destas constatações fica evidenciado que os mecanismos que regem a transferência dos fatores de desequilíbrios advindos da ocorrência das VTCDs oriundas de um ou outro lado do transformador de acoplamento, se apresentam como uma estratégia com indicativos promissores para oferecer, de forma confiável, simples e exequível em para emprego nas instalações, uma resposta aos anseios colocados como desafios nesta pesquisa de mestrado.

Para a continuidade do trabalho, sugere-se:

- Aplicação da metodologia em campo, que poderá reforçar as investigações apresentadas no atual estudo;
- Análise envolvendo a presença de geração distribuída no lado do cliente;
- Proposição de uma estratégia para complementação e aprimoramento das normas que regem o controle e fiscalização da qualidade da energia elétrica, nos termos estabelecidos pela ANEEL;
- Avaliação da eficácia da metodologia para sistemas malhados com múltiplas fontes;
- Investigações complementares sobre o cálculo do FD durante a ocorrência dinâmica das VTCDs.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 
- [1] B. P. Santos, A. Alberto, T. D. F. M. Lima, and F. M. B. Charrua-Santos, “Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades,” in *Revista Produção e Desenvolvimento*, 2018, p. 14.
- [2] ANEEL, “Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.,” Brasil, 2010.
- [3] A. N. de E. E. ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST,” Brasil, 2018.
- [4] ONS, “Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica,” Brasil, 2017.
- [5] E. K. LUNA, “Uma Contribuição ao Estudo de VTCDs Aplicado a Equipamentos Eletrônicos Alimentados por Conversor CA-CC,” Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil, 2005.
- [6] OSE, “A revisão do modulo 8 – critérios de avaliação das variações de tensão de curta duração (VTCDs) – Parte 1,” 2016. [Online]. Available: <https://www.osetoeletrico.com.br/a-revisao-do-modulo-8-criterios-de-avaliacao-das-variacoes-de-tensao-de-curta-duracao-vtcds-parte-1/>. [Accessed: 12-Jul-2021].
- [7] R. M. Maia and M. V. Cruz, “Aspectos da Sensibilidade de uma planta industrial durante Variações de Tensão de Curta Duração,” 2011, p. 5.
- [8] R. M. Maia, “Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia,” Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil, 2011.
- [9] C. D. C. TEIXEIRA and C. S. TAKIGUCHI, “Impacto Econômico de Problemas de Qualidade de Energia em Indústria Automobilística,” in *VI SBQEE*, 2005, p. 6.
- [10] E. G. de Carvalho, “Technological innovation in the automotive industry: features and recent evolution,” in *Economia e Sociedade*, 2008.
- [11] OSE, “Qualidade da Energia Elétrica: Tendências e Desafios,” 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Or9oFP0vNac>. [Accessed: 11-Jul-2021].
- [12] U. R. Oliveira and H. M. Rocha, “Gerenciamento de Riscos Operacionais em Montadoras de Veículos,” in *Pretexto*, 2014, p. 19.
- [13] A. B. Amaral, “O impacto da insuficiência no fornecimento de energia elétrica nas empresas brasileiras do setor de telecomunicações,” Universidade de São Paulo (USP), Brasil, 2017.
- [14] É. M. MOTOKI, “Procedimentos para Mitigação do Impacto de Qualidade de Energia na Indústria Têxtil,” Universidade de São Paulo (USP), Brasil, 2007.
- [15] É. M. Motoki and N. Kagan, “Procedimentos para Mitigação da Qualidade de Energia na Indústria Têxtil,” in *XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia*, 2007, p. 6.
- [16] D. S. Diniz, G. L. Máximo, and M. P. Spagnol, “Procedimentos para Mitigação do Impacto de Qualidade de Energia na Indústria Fabricante de Papel,” in *XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2008, p. 10.
- [17] F. Salim, K. M. Nor, D. M. Said, and A. A. A. Rahman, “Voltage Sags Cost Estimation for

- Malaysian Industries,” in *IEEE International Conference Power & Energy (PECON)*, 2014, p. 7.  
<https://doi.org/10.1109/PECON.2014.7062411>
- [18] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, “Power Quality Problems and New Solutions,” in *ICREPO*, 2003, p. 9.
- [19] B. M. GIANESINI, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias,” Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2020.  
<http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.619>
- [20] A. C. dos Santos, “Uma Contribuição ao Processo do Compartilhamento de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas Via Chaveamento de Unidades Capacitivas,” Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2015.  
<https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.18>
- [21] A. C. DOS Santos, “Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas: Análises, Contribuições e Proposições,” Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Brasil, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2445>
- [22] R. C. F. Gregory, “Propostas de Metodologias para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos Trifásicos,” Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2020.  
<http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.725>
- [23] M. De Santis, C. Noce, P. Varilone, and P. Verde, “Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks,” in *Electric Power Systems Research*, 2017, p. 10.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.008>
- [24] V. B. Núñez, X. B. Moliner, J. M. Frigola, S. H. Jaramillo, J. Sánchez, and M. Castro, “Two Methods for Voltage Sag Source Location,” in *International Conference on Harmonics & Quality of Power*, 2008, p. 6.
- [25] G. W. Chang, J.-P. Chao, H. M. Huang, C.-I. Chen, and S.-Y. Chu, “On Tracking the Source Location of Voltage Sags and Utility Shunt Capacitor Switching Transients,” in *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 2008, p. 8.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.923143>
- [26] S.-J. Ahn, D.-J. Won, Y. Chung, and S. Moon, “A New Approach to Determine the Direction and Cause of Voltage Sag,” in *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2008, p. 8.
- [27] A. A. I. H. Shareef and A. Mohamed, “Identification of voltage sag source location using S and TT transformed disturbance power,” in *Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013, p. 15.  
<https://doi.org/10.1007/s11771-013-1463-5>
- [28] F. O. Passos, “Localizador da Fonte de AMTs Baseado nas Medições de Tensões de Fronteira,” Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2015.
- [29] W. D. Stevenson, *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, 2nd ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [30] P. S. R. Murty, *Power Systems Analysis*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101111-9.00013-6>
- [31] IEC, “Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-6: Limits — Assessment of emission limits

- for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems,” 2008.
- [32] Fluke, *Fluke 434-II/435-II/437-II: Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos - Manual do Usuário*. 2012.
- [33] J. R. V. CARNEIRO, “Uma Contribuição para Determinação de Valores de Referência para as Variações de Tensão de Curta Duração,” Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil, 2015.
- [34] J. R. Cabral, “Análise Numérica de Curto Circuito Utilizando Componentes Simétricas e Componentes de Fases para Obter Índices de Afundamentos de Tensão,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [35] W. D. X. FILHO, “Metodologia para Determinação das Variações de Tensão de Curta Duração e Definição das Áreas de Vulnerabilidade,” Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Brasil, 2017.
- [36] L. C. Zanetta, *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. Brasil: Livraria da Física, 2008.
- [37] N. Kagan, *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência: Componentes Simétricas*, 2nd ed. Brasil: Blucher, 2000.
- [38] J. W. Resende, *Apostila: Análise de Sistemas de Energia Elétrica*. Uberlândia, Brasil.
- [39] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 1999.
- [40] ANEEL, “Base de Dados Geográfica da Distribuidora – BDGD,” 2017.
- [41] J. Rubens, “Alimentador real de média tensão,” 2021. [Online]. Available: <http://www.jrubens.eng.br/download/AMT1.pdf>. [Accessed: 12-Jul-2021].
- [42] USP, “Conteúdo: Modelagem de Sistemas Elétricos.” [Online]. Available: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4374278/mod\\_resource/content/1/Aula Carlos - Modelagem regime.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4374278/mod_resource/content/1/Aula_Carlos_-_Modelagem_regime.pdf). [Accessed: 13-Jul-2021].

## LISTA COM TRABALHOS PUBLICADOS:

- **Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE 2021):**

*Título:* Uma Proposta para a Identificação da Responsabilidade das VTCDs através da Transferência dos Indicadores de Desequilíbrios nos Transformadores de Conexão.

A. R. Ferreira, J. C. de Oliveira, and P. H. O. Rezende, “Uma Proposta para a Identificação da Responsabilidade das VTCDs através da Transferência dos Indicadores de Desequilíbrios nos Transformadores de Conexão,” in Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), 2021, p. 6.

- **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL 2020):**

*Título:* Correlação Entre o Ponto da Incidência da Falta e a Eficácia do Método de Identificação da Origem das VTCDs via Fator de Desequilíbrio.

A. R. Ferreira, J. C. de Oliveira, and P. H. O. Rezende, “Correlação Entre o Ponto da Incidência da Falta e a Eficácia do Método de Identificação da Origem das VTCDs Via Fator de Desequilíbrio,” in Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL), 2020, p. 6.

- **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2020):**

*Título:* Uma Proposta Metodológica para a Atribuição da Responsabilidade sobre a Origem das VTCDs baseada na Correlação de Componentes Simétricas.

A. R. Ferreira, J. C. de Oliveira, and P. H. O. Rezende, “Uma Proposta Metodológica para a Atribuição da Responsabilidade sobre a Origem das VTCDs baseada na Correlação de Componentes Simétricas,” in Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2020, p. 6.

- **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL 2019):**

*Título:* Uma Proposta para Atribuição de Responsabilidade do Fenômeno VTCD em Instalações Supridas com Transformadores Delta-Estrela aterrado.

A. R. Ferreira, J. C. de Oliveira, and P. H. O. Rezende, “Uma Proposta Para Atribuição de Responsabilidade do Fenômeno VTCD em Instalações Supridas Com Transformadores Delta-Estrela Aterrado,” in *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL)*, 2019, p. 6.

- **Capítulo de Livro - Engenharia Elétrica e de Computação: Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico 4:**

*Título:* Uma Proposta para a Identificação da Origem dos Fenômenos VTCDs em Instalações Consumidoras Supridas por Transformadores Delta-Estrela Aterrada.

FERREIRA, A. R.; OLIVEIRA, J. C. DE; REZENDE, P. H. O. Uma Proposta para a Identificação da Origem dos Fenômenos VTCDs em Instalações Consumidoras Supridas por Transformadores Delta-Estrela Aterrada. In: Atena (Org.); Engenharia Elétrica e de Computação: Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico 4. 4o ed, p.225, 2020. Brasil: Atena.