



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

ADRIAN RIBEIRO FERREIRA

**Contribuições para o Processo da Atribuição de Responsabilidade das
Variações de Tensão de Curta Duração Baseado nos Fatores de
Desequilíbrio**

Uberlândia

2026

ADRIAN RIBEIRO FERREIRA

**Contribuições para o Processo da Atribuição de Responsabilidade das Variações de
Tensão de Curta Duração Baseado nos Fatores de Desequilíbrio**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Dr. José Carlos de Oliveira
Coorientador: Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende

Uberlândia

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F383c
2026

Ferreira, Adrian Ribeiro, 1995-
Contribuições para o processo da atribuição de responsabilidade das
variações de tensão de curta duração baseado nos fatores de desequilíbrio
[recurso eletrônico] / Adrian Ribeiro Ferreira. - 2026.

Orientador: José Carlos de Oliveira.
Coorientador: Paulo Henrique Oliveira Rezende.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.5020>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

I. Engenharia elétrica. I. Oliveira, José Carlos de, 1947-, (Orient.).
II. Rezende, Paulo Henrique Oliveira, 1987-, (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

ADRIAN RIBEIRO FERREIRA

**Contribuições para o Processo da Atribuição de Responsabilidade das
Variações de Tensão de Curta Duração Baseado nos Fatores de
Desequilíbrio**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Uberlândia, 23 de fevereiro de 2026

Banca Examinadora:

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

Carlos Eduardo Tavares – Prof. Dr. (UFU)

Ivan Nunes Santos – Prof. Dr. (UFU)

Ivan Marques de Toledo Camargo – Prof. Dr. (UnB)

Mateus Duarte Teixeira – Prof. Dr. (UFPR)



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:	Tese de Doutorado, 355, PPGEELT				
Data:	Vinte e três de fevereiro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	10:00	Hora de encerramento:	12:30
Matrícula do Discente:	12123EEL004				
Nome do Discente:	Adrian Ribeiro Ferreira				
Título do Trabalho:	Contribuições para o Processo da Atribuição de Responsabilidade das Variações de Tensão de Curta Duração Baseado nos Fatores de Desequilíbrio				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Paulo Henrique Oliveira Rezende. Título do Projeto: Alocação Otimizada de Reatores Saturados Cabeça de Série em Redes de Distribuição Multirramais para Regulação da Tensão. Agência financiadora: Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - Coelba ("NEOENERGIA COELBA"). Número do processo na agência financiadora: 23117.006858/2023-71. Vigência do projeto: 21/06/2023 a 20/07/2026.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Carlos Eduardo Tavares (UFU), Ivan Nunes Santos (UFU), Ivan Marques de Toledo Camargo (UnB), Mateus Duarte Teixeira (UFPR) e José Carlos de Oliveira, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. José Carlos de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, 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 presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. 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 **Mateus Duarte Teixeira, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 12:42, 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 **Carlos Eduardo Tavares, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 12:47, 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 **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 12:48, 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 Carlos de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 12:58, 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 **Ivan Marques de Toledo Camargo, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 14:20, 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, informando o código verificador **7028969** e o código CRC **986B1E5E**.

“ A Deus, à minha família e aos meus amigos, dedico este trabalho.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por iluminar meu caminho e por ser meu suporte em todas as etapas da vida.

Aos meus pais, Nivaldo e Margarida, e às minhas irmãs, Renata e Maria Clara, por todo o amor, carinho e dedicação que sempre me ofereceram. Agradeço aos meus avós, tios e demais familiares, que foram essenciais na formação de quem eu sou hoje.

À minha noiva e companheira de vida, Maya, que sempre me apoiou, amou e caminhou ao meu lado em todos os momentos desta jornada. Sem você essa conquista não seria possível.

Expresso minha gratidão especial ao meu orientador, Professor José Carlos de Oliveira, e ao meu coorientador, Professor Paulo Henrique Oliveira Rezende, pelos ensinamentos, incentivos e por toda a orientação que os senhores proporcionaram durante os anos dedicados a esta pesquisa. Com certeza, encerro este ciclo como uma pessoa e um profissional muito melhor.

Aos meus colegas e professores do Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica (LabQEE) da UFU, pelo apoio técnico e pelo companheirismo durante todos os anos de desenvolvimento da pesquisa. São pessoas que levarei para o restante da minha vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEELT) e à Universidade Federal de Uberlândia, por proverem os recursos necessários para a viabilização deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“ Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele o fará. ”

Salmos 37:5

RESUMO

As variações de tensão de curta duração (VTCD) representam desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Apesar de sua curta duração, tais fenômenos exercem influências significativas sobre a qualidade, confiabilidade e segurança dos sistemas elétricos. De fato, pesquisas feitas indicam que o número de reclamações dos agentes geradores, transmissores, distribuidores e consumidores encontram-se, majoritariamente, centradas neste efeito. À luz deste reconhecimento, o PRODIST-ANEEL, em sua última revisão, apresenta, ainda de forma incipiente, bases destinadas para a regulamentação destes distúrbios visando a garantia da qualidade requerida para a operação dos complexos elétricos. Neste contexto emerge a questão do agente responsável por estes fenômenos, cuja essência se apresenta como tema motivador desta tese de doutorado. Neste particular, muito embora o reconhecimento de publicações em relação a determinação do agente responsável, o fato é que, até o momento, não se identifica uma metodologia fundamentada em procedimentos e embasamentos factíveis a uma pronta aplicação em campo. Visando preencher esta lacuna, através de dissertação conduzida pelo programa de pós-graduação da UFU, foram apresentadas as bases de um procedimento contemplando a matéria. Este processo foi fundamentado no mecanismo da transferência de indicadores de desequilíbrio através do transformador de fronteira entre dois agentes, comparando-se as medições dos fatores de desequilíbrio das tensões em ambos os lados do transformador, quando da manifestação de uma VTCD. Não obstante as perspectivas promissoras apresentadas, a metodologia foi explorada ainda de forma embrionária, fato este que motivou a continuidade dos trabalhos através desta pesquisa. Para tanto, neste trabalho de doutorado, são realizados aprimoramentos, os quais consistem no estabelecimento das bases matemática conceituais que permitem fundamentar o processo, a extensão aplicativa para configurações topológicas com maior identidade com sistemas reais e, por fim, a validação experimental do processo. Tais avanços, que se apresentam como foco deste trabalho, permitem analisar a confiabilidade, robustez e praticidade do método de análise em foco.

Palavras-chave: Variações de Tensão de Curta Duração; Responsabilidade de Eventos; Qualidade da Energia; Perturbações de Tensão, Interrupções Elétricas; Padrões de Qualidade de Energia.

ABSTRACT

Short-Duration Voltage Variation (SDVVs) represent significant deviations in the amplitude of the rms voltage value over a time interval shorter than three minutes. Despite their short duration, such phenomena exert substantial impacts on the quality, reliability, and safety of electrical power systems. Indeed, research studies indicate that the majority of complaints from generation, transmission, distribution agents, as well as end users, are predominantly associated with this type of disturbance. In response, the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL), through the most recent revision of its Distribution Procedures (PRODIST), has introduced preliminary guidelines to regulate these disturbances and ensure adequate power quality levels. Within this context, the issue of identifying the agent responsible for such phenomena emerges as a motivating theme of this doctoral research. In this regard, although several publications addressing the determination of the responsible agent can be found in the literature, there is, to date, no methodology grounded on feasible procedures that enables straightforward field application. Aiming to fill this gap, a previous master's dissertation developed within the UFU graduate program established the foundational elements of a related procedure. This approach was based on the mechanism of transferring voltage unbalance indicators through the boundary transformer between two agents, by comparing voltage unbalance factor measurements on both sides of the transformer during the occurrence of an SDVV. Notwithstanding the promising perspectives obtained, the methodology was investigated only at an embryonic stage, which motivated the continuation and expansion of the studies through the present doctoral research. Therefore, this work introduces methodological enhancements consisting of: the establishment of conceptual and mathematical foundations to support the proposed process; the extension of its applicability to topological configurations more representative of real-world power systems; and, finally, the experimental validation of the methodology. These advances, which constitute the focus of this research, enable the assessment of the reliability, robustness, and practical applicability of the proposed analytical method.

Keywords: Short-Duration Voltage Variation; Responsibility Assignment; Power Quality; Voltage Disturbances, Electrical Interruptions; Power Quality Standards.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos e percentuais de fenômenos de qualidade de energia mais impactantes constatados na pesquisa de mercado indicada.	22
Figura 2 – Indicativos dos fenômenos de qualidade mais frequentes que implicam em perdas financeiras.	23
Figura 3 - Componentes de sequência (a) positiva, (b) negativa e (c) zero, e (d) advindas da estrutura trifásica desequilibrada.	31
Figura 4 – Circuito equivalente para uma falta fase-terra	34
Figura 5 – Circuito equivalente para uma falta fase-fase.	35
Figura 6 – Circuito equivalente para uma falta fase-fase-terra.	35
Figura 7 – Impedância de sequência zero equivalente para distintas conexões dos transformadores.	37
Figura 8 – Estrutura genérica dos arranjos utilizados para os desenvolvimentos matemáticos.	39
Figura 9 - Circuito elétrico para a sequência positiva (falta à montante do transformador). ...	41
Figura 10 - Circuito elétrico para a sequência negativa (falta à montante do transformador). ...	41
Figura 11 - Circuito elétrico para a sequência zero, representação com o	42
Figura 12 - Circuito elétrico para a sequência positiva (falta no lado do agente 2).	47
Figura 13 - Circuito elétrico para a sequência negativa (falta no lado do agente 2).	47
Figura 14 - Circuito elétrico para a sequência zero, representação com o	47
Figura 15 - Estrutura topológica do sistema simplificado utilizado com unidade consumidora composta por carga híbrida.	55
Figura 16 – Contribuições de correntes para uma falta originária no primário do transformador.	56
Figura 17 – Circuito equivalente de sequência positiva para uma <i>falta aplicada do lado primário</i>	56
Figura 18 – Circuito equivalente de sequência negativa para uma <i>falta aplicada do lado primário</i>	57
Figura 19 – Circuito equivalente de sequência zero para uma <i>falta aplicada do lado primário</i>	57
Figura 20 – Contribuições de correntes para uma falta originária no secundário do transformador.	60
Figura 21 – Circuito equivalente de sequência positiva para uma <i>falta aplicada do lado secundário</i>	61
Figura 22 – Circuito equivalente de sequência negativa para uma <i>falta aplicada do lado secundário</i>	61

Figura 23 – Circuito equivalente de sequência zero para uma <i>falta aplicada do lado secundário</i>	62
Figura 24 – Sistema elétrico utilizado para os estudos.....	65
Figura 25 – Correlação entre os fatores de desequilíbrio de tensão de sequência negativa para distintas relações $Z-/Z+$ - domínio numérico sempre do lado primário para VTCD ocorrida à montante do transformador de acoplamento.	68
Figura 26 – Correlação entre os fatores de desequilíbrio de tensão de sequência negativa para distintas relações $Z-/Z+$ - domínio numérico sempre do lado secundário para VTCD ocorrida à jusante do transformador de acoplamento.	68
Figura 27 – Fatores de desequilíbrio para diferentes composições percentuais da carga híbrida (passiva e motriz) – falta imposta do lado primário do transformador de conexão.	71
Figura 28 – Fatores de desequilíbrio para diferentes composições percentuais da carga híbrida (passiva e motriz) – falta imposta do lado secundário do transformador de conexão.	73
Figura 29 – Rede elétrica empregada para os estudos analíticos – carga híbrida formada por impedância constante e motores de indução trifásicos dinamicamente modelados.	74
Figura 30 – Parâmetros do transformador.	74
Figura 31 – Parâmetros do MIT utilizado na simulação.	75
Figura 32 – Parâmetros da Carga Passiva utilizada na simulação.....	75
Figura 33 – Resumo da metodologia.	82
Figura 34 – Sistema elétrico empregado - Caso 1.	83
Figura 35 – Representação dos motores - Caso 1.....	85
Figura 36 - Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) – Valores para as FDs de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do agente 1 (supridor) – Diferentes conexões de transformadores.....	86
Figura 37 - Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) – Valores para as FDs de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do agente 2 (consumidor) – Diferentes conexões de transformadores.....	87
Figura 38 - Sistema elétrico empregado para o estudo de caso 2 -	89
Figura 39 – Modelo de Retificador utilizado na simulação.	90
Figura 40 – Sistema elétrico implementado no simulador e indicação dos pontos de ocorrências dos eventos - Caso 2.	91
Figura 41 - Resultados encontrados para o estudo de caso 2.	92
Figura 42 – Avaliação do fator de influência das cargas motrizes sobre o desempenho da metodologia para o arranjo analisado.....	94
Figura 43 - Sistema de transmissão do Complexo do Rio Madeira.	94
Figura 44 - Modelo do Sistema HVDC-Rio Madeira na plataforma MATLAB/Simulink.....	95
Figura 45 - Localização das faltas aplicadas.	96
Figura 46 – Características do arranjo fotovoltaico implementado no Matlab/Simulink.....	98
Figura 47 – Sistema UFV Implementado na plataforma Matlab/Simulink.....	99

Figura 48 - Estrutura do sistema elétrico experimental.....	100
Figura 49 - (a) Fonte de tensão controlada e (b) Qualímetros utilizados para detecção das VTCDs.....	101
Figura 50 - (a) Indutância representando a impedância do sistema elétrico e (b) Transformador de análise.	102
Figura 51 - (a) Cargas resistivas e (b) Indutâncias que foram chaveadas juntamente com os reostatos para gerarem as VTCDs do lado do secundário.	102
Figura 52 – Resultados em ambiente laboratorial - VTCD oriunda do <i>primário</i>	103
Figura 53 – Resultados em ambiente laboratorial para uma VTCD oriunda do <i>secundário</i> ..	104
Figura 54 – Fluxograma resumo da metodologia para atribuição da responsabilidade das VTCDs através dos FD2v.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perdas financeiras nas indústrias ocasionadas por VTCDs.....	24
Tabela 2 - Defasamentos angulares associados pelos tipos de conexão do primário e	37
Tabela 3 - Principais ligações de transformadores no Brasil.	38
Tabela 4 – Resumo com a relação entre os fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero para tensões e correntes, de acordo com o tipo de transformador e a origem da VTCD.	53
Tabela 5 – Parâmetros equivalentes do sistema elétrico à montante da carga demanda.....	65
Tabela 6 – Parâmetros equivalentes da carga motriz correspondente a 100% da demanda.....	66
Tabela 7 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de tensão – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do primário do transformador.	66
Tabela 8 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de corrente – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do primário do transformador.	66
Tabela 9 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de tensão – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do secundário do transformador.	66
Tabela 10 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de corrente – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do secundário do transformador.....	67
Tabela 11 – Parâmetros equivalentes do sistema elétrico – carga híbrida.	69
Tabela 12 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do primário – <i>100% carga passiva</i>	70
Tabela 13 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do primário – <i>100% carga motriz</i>	70
Tabela 14 – <i>Variações de carga para análise</i>	71
Tabela 15 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do secundário – <i>100% carga passiva</i>	72
Tabela 16 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do secundário – <i>100% carga motriz</i>	72
Tabela 17 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma falta fase-terra ocorrida no primário do transformador de conexão.	76
Tabela 18 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma falta fase-terra ocorrida no secundário do transformador de conexão.	76
Tabela 19 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma falta fase-fase ocorrida no primário do transformador de conexão.	77
Tabela 20 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma falta fase-fase ocorrida no secundário do transformador de conexão.	78

Tabela 21 - Parâmetros do sistema elétrico - Caso 1.....	84
Tabela 22 – Condição operativa imposta ao sistema IEEE-BTS-HCD.....	90
Tabela 23 - Resultados dos estudos – fatores de desequilíbrio de sequência negativa do lado primário, secundário e terciário.....	97
Tabela 24 - Resultados do estudo de caso 4.	100
Tabela 25 - Parâmetros do Sistema Elétrico Experimental.	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AT	Alta tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BC	Banco de capacitor
BDGD	Base de Dados Geográfica da Distribuidora
BT	Baixa tensão
BTS	<i>Benchmark test system</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
F	Farad
FD	Fator de Desequilíbrio
FD2v	Fator de Desequilíbrio de Tensão de Sequência Negativa
FD0v	Fator de Desequilíbrio de Tensão de Sequência Zero
FD2i	Fator de Desequilíbrio de Corrente de Sequência Negativa
FD0i	Fator de Desequilíbrio de Corrente de Sequência Zero
FI	Fator de Impacto
f	Frequência
fp	Fator de potência
h	Ordem harmônica
HCD	<i>Harmonic Contribution Determination</i>
Hz	Hertz
ID	Índice de dominância
IEC	<i>International Electrotechincal Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEEE-BTS-HCD	<i>IEEE Benchmark Test System for Harmonic Contribution Determination Studies</i>
I_f	<i>Corrente de falta</i>
Z_t	<i>Impedância do transformador</i>
k	Quilo
LabQEE	Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica
M	Mega
MT	Média tensão

NQEE	Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica
NT	Nota técnica
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Ponto de acoplamento comum
PES	<i>Power and Energy Society</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da energia elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V	Volt
VA	Volt-Ampère
VA _r	Volt-Ampère reativo
V_f	<i>Tensão de falta</i>
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração
W	Watt
μ	Micro

SUMÁRIO

1 Introdução	21
1.1 Objetivos e Contribuições desta Tese de Doutorado	26
1.2 Estrutura da Tese	27
2 Fundamentação Teórica do Método de Análise	29
2.1 Considerações Iniciais	29
2.2 Componentes Simétricas	29
2.3 VTCDs Associadas com Curtos-Circuitos	33
2.3.1 Falta Fase-Terra	34
2.3.2 Falta Fase-Fase	35
2.3.3 Falta Fase-Fase-Terra	35
2.4 Conexões de Transformadores e Impedâncias Equivalentes	36
2.5 Transferência das Correntes e Tensões de Sequência entre o Primário e o Secundário	38
2.5.1 Transferência dos Fatores de Desequilíbrio para Eventos à Montante do Transformador de Conexão	40
2.5.2 Transferência dos Fatores de Desequilíbrio para Eventos à Jusante do Transformador de Conexão	46
2.6 Considerações finais	51
3 Análise de Desempenho da Metodologia com Cargas Híbridas	54
3.1 Considerações Iniciais	54
3.2 Fatores de Desequilíbrio para Instalações com Cargas Híbridas	55
3.3 Desempenho Computacional do Processo de Transferência dos Fatores de Desequilíbrios com Cargas Híbridas	64
3.4 Estudos Envolvendo a Impedância Constante e Motor de Indução Representado por Modelos Dinâmicos no MATLAB/Simulink	73
3.5 Considerações Finais	79
4 Desempenho Computacional da Metodologia e Validação Experimental da Estratégia de Análise	81
4.1 Considerações Iniciais	81

4.2 Estratégia para os Estudos de Casos	82
4.3 Estudos de Desempenho - Caso 1	83
4.3.1 Resultados para Eventos do Lado da Rede Supridora (agente 1)	85
4.3.2 Resultados para Eventos do Lado das Unidades Consumidoras (agente 2)	87
4.4 Estudos de Desempenho - Caso 2	88
4.5 Estudos de Desempenho – Caso 3	94
4.6 Estudos de Desempenho - Caso 4	98
4.7 Avaliação do Desempenho da Metodologia em Ambiente laboratorial	100
4.8 Considerações Finais	104
5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	106
6 Referências	110
Anexo I – Produtos Gerados	115

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos têm passado por constantes mudanças, as quais, de forma particular nos últimos anos, envolvem o aumento da demanda por fontes de energia renovável, a redução da utilização de combustíveis fósseis e o avanço na adoção de recursos energéticos distribuídos, como sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia (BESS), entre outros. Esses avanços trouxeram inúmeros benefícios para os sistemas, todavia, numa outra vertente, também conduzem a vários desafios, a exemplo da complexidade operacional do sistema integrado, a necessidade de maior atenção à qualidade da energia, etc [1].

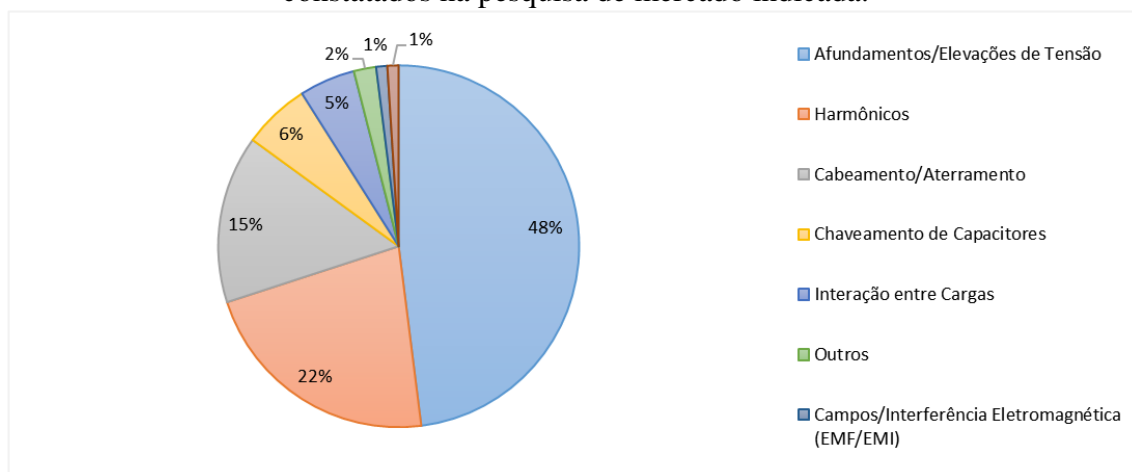
Outro ponto relevante é que os sistemas industriais se encontram cada vez mais automatizados, incorporando tecnologias avançadas, como processamento intensivo de informações, controle de processos, sistemas de medição e de atuação. Nesse contexto, a automação industrial, baseada na aplicação de computadores, equipamentos eletrônicos, teoria de controle e tecnologias correlatas, exerce funções essenciais de gerenciamento, otimização, detecção, controle e regulação dos processos produtivos. O uso dessas técnicas visa ao atendimento de objetivos previamente definidos, como o aumento da produtividade, a eficiência energética, a redução do consumo e a garantia de uma operação segura. Contudo, a crescente adoção dessas tecnologias exige atenção à operação das redes elétricas de suprimento, a fim de assegurar níveis adequados de qualidade de energia para as cargas atendidas [2].

De fato, a qualidade de energia elétrica desempenha um papel vital devido ao impacto que acarreta nos diversos segmentos que perfazem os complexos elétricos, os quais envolvem as concessionárias de energia, os fabricantes de equipamentos e unidades consumidoras industriais, comerciais e residenciais. Em atenção a esta temática, os padrões dos fornecimentos da energia devem ser observados em consonância com as diretrizes claramente expostas no PRODIST [3] e Procedimentos de Rede [4], [5]. Estas regulamentações, estabelecidas pela agência reguladora ANEEL e ONS, contemplam fenômenos diversos quanto a sua natureza, estratégias para medição e quantificação, limites considerados admissíveis, dentre outros. Os indicadores considerados neste documento compreendem as variações de tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variações de tensão de curta duração (VTCD), ou seja, refere-se a um amplo conjunto de fenômenos passíveis de manifestação nas tensões nos pontos de acoplamento entre as unidades supridoras e consumidoras. A exemplo de empresas que se mostram bastante sensíveis aos padrões de qualidade da energia elétrica ressaltam-se aquelas

destinadas à fabricação de semicondutores, computadores, automotivo, farmacêutico, bebidas e alimentos, mineração, sistemas financeiros, etc [6].

Tendo em vista tais interdependências dos consumidores com a qualidade da energia, pesquisas foram conduzidas sobre os fenômenos que mais afetam grupos distintos de indústrias, as quais conduziram aos indicados na Figura 1 e Figura 2 [7]. A primeira contempla os desvios de qualidade da energia que mais afetam as unidades pesquisadas. Esta indica claramente que os maiores problemas se apresentam na forma das VTCDs ($\cong 50\%$), seguidas por harmônicos e questões relacionadas ao cabeamento e aterramento. Numa outra via, além dos aspectos relacionados com a operação confiável e segura dos consumidores, há também a se considerar os impactos de ordem financeiras.

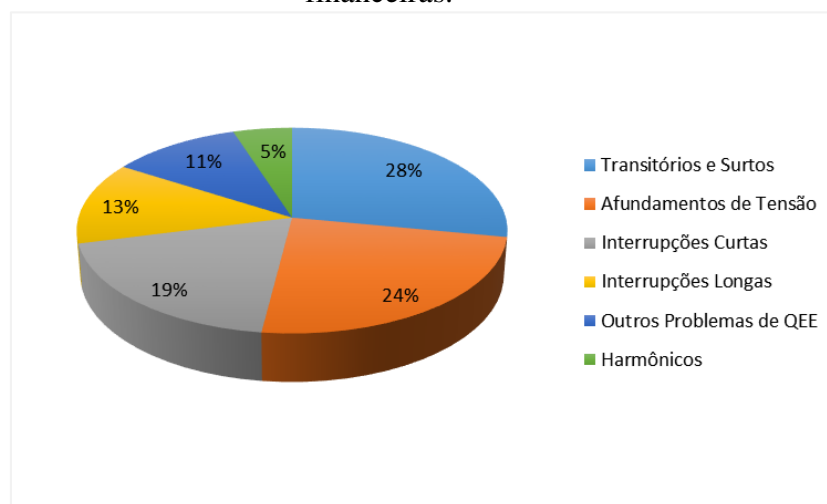
Figura 1 - Tipos e percentuais de fenômenos de qualidade de energia mais impactantes constatados na pesquisa de mercado indicada.



Fonte: Electric Power Research Institute [7].

A Figura 2, por sua vez, ilustra a correlação entre eventos relacionados às variações de tensão aqui referidas e prejuízos de ordem econômica que ocorrem em distintos tipos de indústrias.

Figura 2 – Indicativos dos fenômenos de qualidade mais frequentes que implicam em perdas financeiras.



Fonte: European Power Quality Survey [7].

O custo estimado anual dos problemas de qualidade de energia é de US\$15 bilhões. Para instalações com processos mais sensíveis, esse impacto se traduz em valores que variam de US\$14,000 a US\$6,5 milhões por hora visto que, algumas instalações, após seus desligamentos, requerem horas para o retorno ao processo produtivo [8]. De acordo com o exposto, as VTCDs se apresentam como anomalias operacionais que mais afetam as unidades consumidoras, causando prejuízos na forma de custos diretos e indiretos, incluindo danos a equipamentos, tempo de inatividade e perda de produtividade [9], [10]. Esta última indica que o custo de perturbações típicas de energia foi responsável por cerca de 1 bilhão de dólares na década de 1990 e, na atualidade, representa cifras da ordem de 10 bilhões de dólares anualmente. De acordo com [11], [12], durante o período de monitoramento de um ano, o custo total da queda de tensão foi estimado em US\$ 4 milhões. Tais grandezas apontam para o fato que o custo de energia não fornecida por MWh é estimado em US\$2,800/MWh. Para uma indústria de semicondutores, com um consumo anual de energia de 100 MWh, o custo incorrido por evento de interrupção é de US\$50,000. Em [13] foi feita a análise do impacto das VTCDs em unidades consumidoras na China. Tal análise foi baseada em questionários e/ou entrevistas pessoais para calcular as perdas resultantes e o desdobramento desta pesquisa determinou que o custo por queda de tensão variava significativamente entre os setores industriais conforme o valor agregado do produto final. A exemplo disso destaca-se que, na indústria de fibras químicas, os prejuízos variavam de US\$29,000 a US\$172,000, enquanto na indústria de semicondutores, de US\$574,000 a US\$3,585,000. Complementarmente, a Tabela 1 ilustra

valores típicos das perdas financeiras relacionadas com a ocorrência de VTCDs para alguns tipos de indústrias.

Tabela 1 - Perdas financeiras nas indústrias ocasionadas por VTCDs.

Tipo de Indústria	Custo (€)
Têxtil	€1.000 – €100.000
Plásticos	€2.000 – €50.000
Vidro	€10.000 – €1.000.000
Papel	€30.000 – €3.000.000
Aço	€50.000 – €4.000.000
Semicondutores	€75.000 – €10.000.000

Fonte: Adaptado de [14].

Diante do exposto, ficam evidenciadas importantes consequências negativas provocadas pelos eventos, fato este que determina a necessidade da implementação de medidas mitigatórias, cujos custos são expressivos e, em função destes investimentos, emerge os desafios para a identificação das responsabilidades dos fenômenos em pauta. De fato, ao se considerar o efeito final resultante num determinado Ponto de Acoplamento Comum – PAC, definido pelo barramento de conexão entre o supridor e o consumidor, ou ainda, entre dois agentes, genericamente designados por agente 1 e agente 2, a busca por mecanismos sistematizados e confiáveis para a atribuição da responsabilidade do evento se mostra extremamente relevante e desafiadora. A temática do compartilhamento e/ou identificação das responsabilidades relacionadas aos eventos associados ao cenário da Qualidade da Energia tem sido amplamente discutida e investigada nos últimos anos. Os progressos alcançados no contexto das distorções harmônicas, por exemplo, revelam perspectivas atrativas e viáveis indicadas nos estudos relatados em [15]–[17]. Também, a problemática dos desequilíbrios de tensões tem sido abordada em várias pesquisas [18], [19]. Apesar dessas considerações, no que diz respeito às VTCDs, é crucial destacar que o termo "compartilhamento" já não é mais apropriado, uma vez que, para esses eventos, a atribuição de responsabilidade se mostra mais pertinente. Nesse último contexto, é possível identificar alguns trabalhos publicados que são sintetizados a seguir:

- Em [20] apresenta-se uma abordagem fundamentada em medições realizadas em vários barramentos da rede. Em cada um desses pontos, a tensão residual, ou seja, a tensão remanescente associada à VTCD, no momento em que o evento ocorre e a sua duração são monitorados. Após a coleta dos dados, realiza-se uma análise na qual cada variável coletada é correlacionada com as demais grandezas nos diversos barramentos. Esse procedimento visa determinar se a falha ocorreu a montante ou a jusante do ponto físico

analisado. É relevante salientar que esse método requer uma infraestrutura de rede bem estruturada, apoiada por diversos medidores, a fim de garantir a segurança na aplicação do método analisado;

- Uma estratégia baseada nas impedâncias pré e pós-falta é estabelecida em [21]. Para isso, realiza-se uma análise das partes real e imaginária dessas grandezas, bem como dos ângulos das correntes antes e durante a falta. Após a integração dessas informações, é conduzido um pós-processamento com o objetivo de identificar a origem da variação de tensão de curta duração. Entretanto, é necessário destacar que o método enfrenta desafios inerentes à obtenção das grandezas necessárias, e sua eficácia foi constatada como sendo baixa;
- O estudo abordado em [22] fundamenta-se na medição dos desvios nos valores de corrente em diferentes barramentos do sistema, tanto nas condições pré quanto durante a falta. Novamente, destaca-se a necessidade de monitoramento em vários pontos do sistema, exigindo um considerável esforço na análise dos dados;
- Já [23] aborda a questão por meio de um processo fundamentado em medições de correntes, potências ativas e distorções harmônicas. As variáveis são mensuradas antes, durante e, em alguns casos, após os eventos. Ao observar o comportamento dessas grandezas, é possível determinar a origem do evento desencadeador da falha e, conseqüentemente, da VTCD. No entanto, é importante ressaltar que a necessidade de realizar diferentes medições em diversos momentos apresenta desafios para as aplicações práticas do método proposto;
- Uma outra abordagem é feita em [24]. Esta propõe um processo de análise utilizando a Transformada Rápida de Fourier e uma complementação da mesma. As tensões e correntes são monitoradas e processadas, permitindo a identificação da origem do evento. Vale notar que o método demanda um considerável nível de processamento computacional para sua implementação;
- No estudo contemplado em [25], a identificação da responsabilidade das VTCDs é conduzida por meio de informações relacionadas ao comportamento do fluxo de potência antes e durante o afundamento de tensão. Isso envolve a análise de valores obtidos nos quadrantes real e imaginário antes e durante o evento. Importante notar que o método também demanda o conhecimento das impedâncias das componentes de sequências para sua aplicação;

- O estudo [26] analisa métodos existentes e novos, apresentando resultados que evidenciam a melhoria de desempenho de procedimentos estabelecidos na escolha de janelas de tempo para cada método. A aplicação em tempo real do processo é enfatizada por meio dos recursos propostos. Apesar dos resultados computacionais promissores, não existem evidências de sua praticabilidade e eficácia em instalações reais para a identificação da origem das VTCDs.
- Por fim, o método proposto em [27] utiliza a similaridade de cossenos para localizar a causa do distúrbio responsável pela VTCD, seja ele uma falta ou um distúrbio decorrente de variações de grandes cargas. O cosseno do ângulo entre tensão e corrente é calculado na fase em que ocorre a queda de tensão, e o resultado desse cálculo indica o sentido do distúrbio no sistema, com o objetivo de atribuir responsabilidade à concessionária, a outros parques industriais adjacentes ou à unidade consumidora em questão. É um método que indica perspectivas interessantes, muito embora a alta demanda para o processamento computacional.

Do exposto segue que, até o momento, não existem procedimentos que tenham evidenciado características que apontam para a eficácia das propostas em termos de aplicação em campo, muito embora o reconhecimento de suas bases conceituais sólidas. Nestes termos, as buscas continuam motivando pesquisas e, inserido neste contexto, este trabalho de doutorado encontra-se voltado para apresentar, explorar e avançar em aspectos associados com uma estratégia alternativa, conduzida, inicialmente, na dissertação de mestrado [28], do mesmo autor desta tese de doutorado, a qual demonstrou possuir fundamentos teóricos alicerçados em princípios básicos da engenharia elétrica, e também, grande viabilidade para uso em campo.

1.1 Objetivos e Contribuições desta Tese de Doutorado

Em atenção ao exposto, esta tese de doutorado tem o objetivo principal proporcionar avanços nos estudos e desenvolvimentos realizados no trabalho pioneiro que apontam para a viabilidade da metodologia para a atribuição de responsabilidade das VTCDs identificadas num PAC [28].

Tomando por base o estágio dos desenvolvimento realizados na dissertação supra identificada, a presente pesquisa avança no aprimoramento do processo de análise contribuindo com os seguintes aspectos:

- Aprimoramento do desenvolvimento de uma base de modelagem analítica, no domínio da frequência, visando oferecer uma estratégia para a avaliação do processo de transferência dos fatores de desequilíbrio, contemplando composições de unidades de consumo passivas e motrizes, bem como centros de geração fotovoltaica;
- Inserção dos fatores de desequilíbrio de sequência zero, como fator complementar para a robustez e confiabilidade dos processos de análise da metodologia;
- Avaliação do desempenho do método de análise através de estruturas físicas de complexos elétricos distintos e compatíveis com sistemas reais;
- Validação da metodologia em ambiente laboratorial controlado em escala reduzida com distintas conexões de transformadores e variados tipos de eventos.

1.2 Estrutura da Tese

Visando a atingir os objetivos ora expostos, além do presente capítulo introdutório, a estrutura desta proposta de tese compreende as seguinte etapas:

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica do Método de Análise

Este capítulo desenvolve, aprimora e analisa as bases para representação matemática do procedimento estabelecido, permitindo, assim, um embasamento teórico para a generalização do processo de análise para distintas configurações dos transformadores de conexão entre os agentes. Uma vez definidas as fontes dos distúrbios, representadas pela ocorrência de distintos tipos de curtos-circuitos, são então conduzidos estudos sobre o desempenho do processo de análise, culminando pela validação, ainda no campo teórico, da eficácia da estratégia alicerçada na transferência dos fatores de desequilíbrios entre o primário e o secundário do transformador de interligação.

Capítulo 3 – Análise de Desempenho da Metodologia com Cargas Híbridas

Considerando que as cargas motrizes constituem parte significativa das demandas elétricas e apresentam dinâmica operacional própria quando submetidas a sistemas de suprimento com desequilíbrios de tensão, esta questão é abordada nesta seção da tese, objetivando avaliar o grau de influência que esta composição híbrida da carga exerce sobre o processo de análise. Para tanto, desenvolvimentos matemáticos complementares e estudos de desempenho computacionais são então realizados com vistas a identificação da efetividade do método contemplado no trabalho.

Capítulo 4 – Desempenho Computacional da Metodologia e Validação Experimental da Estratégia de Análise

Uma vez consolidada a metodologia no contexto analítico, procede-se à avaliação de seu desempenho por meio de estudos computacionais aplicados a quatro complexos elétricos, cujas características topológicas e paramétricas apresentam maior identidade com sistemas reais. Adicionalmente, nesta mesma unidade da tese, são desenvolvidas investigações de caráter experimental, realizadas em ambiente laboratorial controlado, com o propósito de validar a efetividade do método proposto.

Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Por fim, neste capítulo são tecidas considerações e conclusões finais sobre o trabalho como um todo, destacando os pontos mais relevantes observados no desenvolvimento da pesquisa. Adicionalmente, são também apresentadas diretrizes para a continuidade da proposta metodológica estabelecida para a identificação da responsabilidade sobre os eventos VTCDs.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MÉTODO DE ANÁLISE

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo, de caráter conceitual sobre o processo de análise, encontra-se direcionado para o estabelecimento dos princípios norteadores da estratégia para a identificação da responsabilidade das variações de tensão de curta duração. De um modo geral, ao longo dos desenvolvimentos, estes eventos são considerados como advindos de curtos-circuitos assimétricos manifestados nas redes dos agentes envolvidos. Todavia, é importante destacar que, de fato, qualquer outro motivo que justifique o surgimento de assimetrias operacionais, poderá ser igualmente contemplado quando da aplicação do processo de análise posto.

Objetivando estabelecer as técnicas de análise a serem consideradas, são então realizadas as modelagens dos complexos elétricos à montante e à jusante do transformador de conexão dos agentes conectados ao lado primário e secundário da unidade de acoplamento. Para tanto, são empregadas ferramentas de análise fundamentadas nas técnicas de representação no domínio da frequência, somado às 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 visando a identificação da responsabilidade do evento ocorrido. Destaca-se que, sob a designação “agentes”, ao longo do trabalho deve-se entender a conexão entre uma rede de transmissão e outra de distribuição, uma rede supridora e outra consumidora, um ponto de interligação entre unidades de geração eólica/fotovoltaica com sistemas de transmissão ou distribuição, etc.

Obtidas as informações sobre a correlação entre as grandezas representativas dos Fatores de Desequilíbrio produzidas de um e outro lado do transformador de conexão, estas são consideradas quanto aos seus níveis e a lógica de transferência que conduz aos fundamentos do processo de identificação estabelecido.

2.2 Componentes Simétricas

Dentre os recursos clássicos empregados para as análises de desempenho dos sistemas

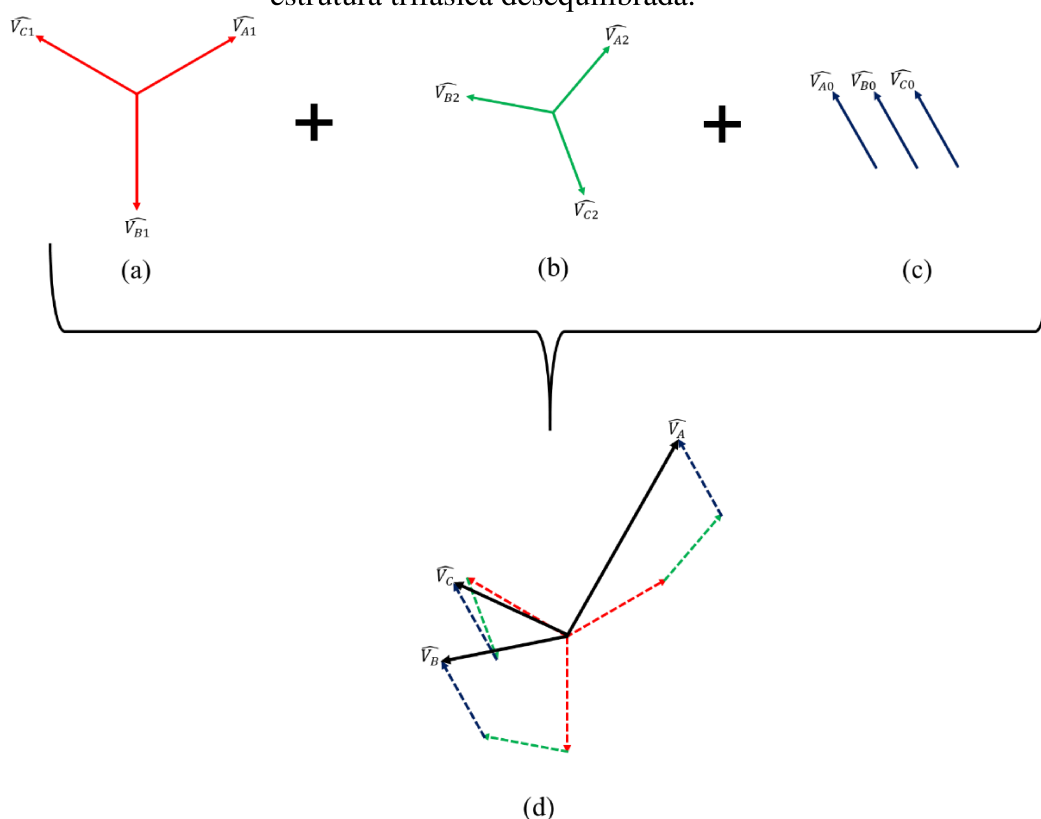
elétricos no domínio da frequência, um dos mais difundidos para redes trifásicas, corresponde ao conhecido emprego da decomposição das tensões e correntes trifásicas desequilibradas, originalmente no domínio A, B, C, nas denominadas componentes de sequência (zero, positiva e negativa) [29], [30].

As grandezas envolvidas no processo de decomposição, nos termos definidos pelos fundamentos desta transformação, são:

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

A Figura 3d é indicativa do processo de decomposição nos denominados sistemas A, B, C em suas respectivas componentes positiva (+), negativa (-) e zero (0).

Figura 3 - Componentes de sequência (a) positiva, (b) negativa e (c) zero, e (d) advindas da estrutura trifásica desequilibrada.



Fonte: O autor.

Como amplamente conhecido, a correlação entre as grandezas de fase e aquelas advindas da decomposição pode ser expressa nos termos indicados por (1), na qual tem-se, além das tensões (ou correntes), o operador $a = 1|120^\circ$.

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

Uma vez determinadas as componentes de sequência das tensões (ou correntes) pode-se estabelecer, quantitativamente, os conhecidos fatores de desequilíbrio para estas grandezas, resultando, assim, nos fatores de desequilíbrio de tensão (FDv) e o de corrente (FDi). Estas variáveis são quantificadas em termos da relação entre as respectivas grandezas de sequência negativa e de sequência positiva. De forma similar tem-se, também, para algumas aplicações os indicadores de desequilíbrio relacionadas com a sequência zero. Nestes casos, as grandezas representativas dos fatores de desequilíbrio de sequência zero, quer para as tensões e correntes,

são determinadas através da relação entre a magnitude da componente de sequência zero diante da respectiva grandeza de sequência positiva.

De acordo com orientações nacionais e internacionais, a exemplo do PRODIST-Módulo 8, as expressões que permitem a determinação dos fatores de desequilíbrio acima postos podem ser expressas por (2) e (3). Estas encontram-se explicitadas para as tensões, todavia, equações análogas podem ser também estabelecidas para as correntes [3], [31].

Não obstante o reconhecimento que as formulações apresentadas são, atualmente, as utilizadas no contexto nacional e internacional, vale lembrar que a literatura relata outras expressões para os fatores de desequilíbrio, algumas das quais não são mais utilizadas para os cálculos aqui pretendidos. A exemplo disso cita-se a formulação, já em desuso, baseada num fator de desequilíbrio obtido pela razão entre o máximo desvio das tensões de linha em relação ao seu valor médio, conforme apresentado em (4). Uma outra definição, também já não aplicável na atualidade, corresponde a apresentada em (5) [32].

$$FD_2\% = FD_{-}\% = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2)$$

$$FD_0\% = \frac{V_0}{V_1} \cdot 100 = \frac{V_0}{V_+} \cdot 100 \quad (3)$$

$$K\% = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100 \quad (4)$$

$$K\% = \frac{3(V_{max} - V_{min})}{V_A + V_B + V_C} \cdot 100 \quad (5)$$

Em se tratando da aplicação para as tensões trifásicas, o fator de desequilíbrio $FD_2\%$ pode ser determinado, ao invés dos fasores A, B e C (módulos e ângulos), tomando por base os módulos das grandezas medidas entre fase-neutro ou fase-fase. De fato, dificuldades inerentes às medições em campo de seus valores e respectivos ângulos de fase, motivaram o desenvolvimento de um procedimento alternativo 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 (6) e (7) [3], [31]. Este procedimento simplifica significativamente a determinação do fator de desequilíbrio de sequência negativa, visto que, para tanto, são utilizadas apenas as medições de tensões de linha. Estas, normalmente, se encontram disponibilizadas pelos medidores já instalados nas redes elétricas [33].

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

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad (7)$$

2.3 VTCDs Associadas com Curtos-Circuitos

Somado às clássicas origens dos desequilíbrios, a exemplo das cargas e impedâncias assimétricas, há ainda a se considerar que situações operacionais anômalas, ou eventos, passíveis de ocorrência em campo, como é o caso da energização de transformadores, partida de grandes motores, ocorrência de faltas, dentre outras, podem resultar em distúrbios temporários manifestados no complexo elétrico na forma de variações (aumento ou decaimento) rápidas das tensões de suprimento. Estes fenômenos são comumente designados pela terminologia Variações de Tensão de Curta Duração – VTCDs. Quando da manifestação de tais ocorrências, estas acontecem e são eliminadas em intervalos de tempo inferiores a 3 minutos. Quando da manifestação destes distúrbios, podem ocorrer grandes impactos na rede elétrica, podendo mesmo culminar na descontinuidade operacional dos complexos elétricos, resultando em possíveis 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 o nexos 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, a proposta estabelecida, nos termos atuais, 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 sobre a responsabilidade da anomalia ocorrida, a qual se apresenta, como já mencionado, como o motivador deste trabalho.

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 [34]. Diante deste reconhecimento, dentre as diversas possibilidades físicas responsáveis pelos eventos em foco, 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 considerados podem compreender ocorrências do tipo fase-terra, fase-fase e fase-fase terra [35].

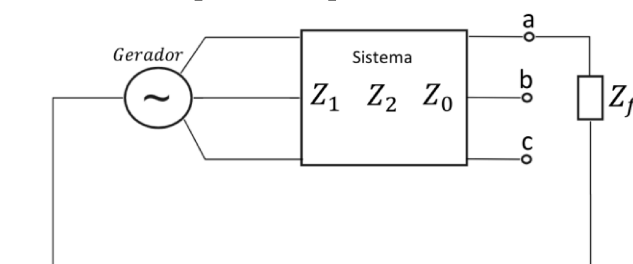
De acordo com avaliações estatísticas é sabido que as faltas fase-terra são as que mais ocorrem na prática, correspondendo a cerca de 63% dos eventos aqui tratados. Quanto aos curtos-circuitos fase-fase e fase-fase-terra, estes representam, aproximadamente, 15% e 16% dos fenômenos [36].

Tomando por base que as VTCDs, embora suas mais distintas fontes, são aqui admitidas como advindas dos curtos-circuitos, procede-se, na sequência, aos desenvolvimentos matemáticos tradicionalmente utilizados para o tratamento da matéria em pauta.

2.3.1 Falta Fase-Terra

A Figura 4 ilustra a manifestação de uma falta fase-terra e as equações que se seguem expressam as formulações clássicas e aplicáveis para a determinação das correntes resultantes. Por se tratar de assunto amplamente conhecido, entende-se ser desnecessário maiores esclarecimentos sobre a matéria e, nestes termos, apenas os circuitos equivalentes e equações resultantes para as correntes são apresentadas [29], [30], [37]–[39].

Figura 4 – Circuito equivalente para uma falta fase-terra



Fonte: Adaptado de [39].

$$\dot{I}_a = \frac{3 \cdot \dot{E}_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 \cdot Z_f)} \quad (8)$$

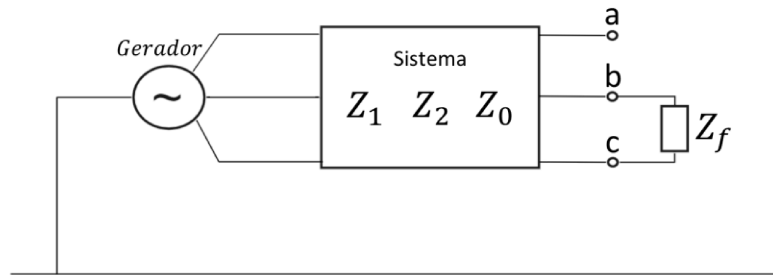
$$\dot{I}_f = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_a = 3 \cdot \dot{I}_{f1} \quad (9)$$

$$\dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f2} = \dot{I}_{f0} = \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_f \quad (10)$$

2.3.2 Falta Fase-Fase

De forma análoga, as faltas fase-fase conduzem aos seguintes resultados:

Figura 5 – Circuito equivalente para uma falta fase-fase.



Fonte: Adaptado de [39].

$$\dot{I}_{f1} = \frac{\dot{E}_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (11)$$

$$\dot{I}_{f2} = -\dot{I}_{f1} \quad (12)$$

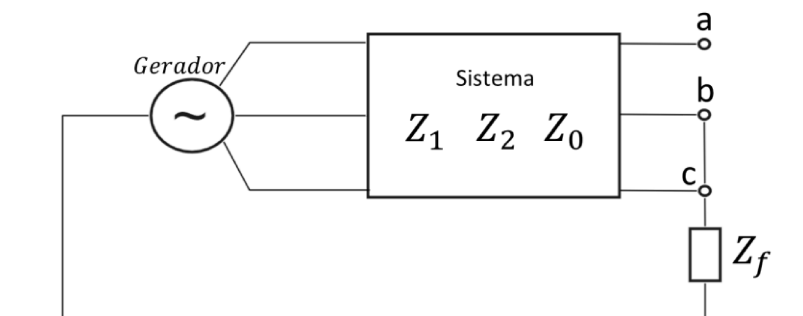
$$\dot{I}_{f0} = 0 \quad (13)$$

$$\dot{I}_f = -j \cdot \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{f1} = \frac{-j \cdot \sqrt{3} \cdot \dot{E}_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (14)$$

2.3.3 Falta Fase-Fase-Terra

Quanto a falta fase-fase-terra:

Figura 6 – Circuito equivalente para uma falta fase-fase-terra.



Fonte: Adaptado de [39].

$$\dot{I}_{f1} = \frac{(Z_0 + Z_2 + 3 \cdot Z_f) \cdot \dot{E}_a}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot (Z_1 + Z_2)} \quad (15)$$

$$\dot{I}_{f2} = \frac{-(Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot \dot{E}_a}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot (Z_1 + Z_2)} \quad (16)$$

$$\dot{I}_{f0} = \frac{-Z_2 \cdot \dot{E}_a}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_0 + 3 \cdot Z_f) \cdot (Z_1 + Z_2)} \quad (17)$$

$$\dot{I}_f = 3 \cdot \dot{I}_{f0} = \dot{I}_n = \dot{I}_b + \dot{I}_c \quad (18)$$

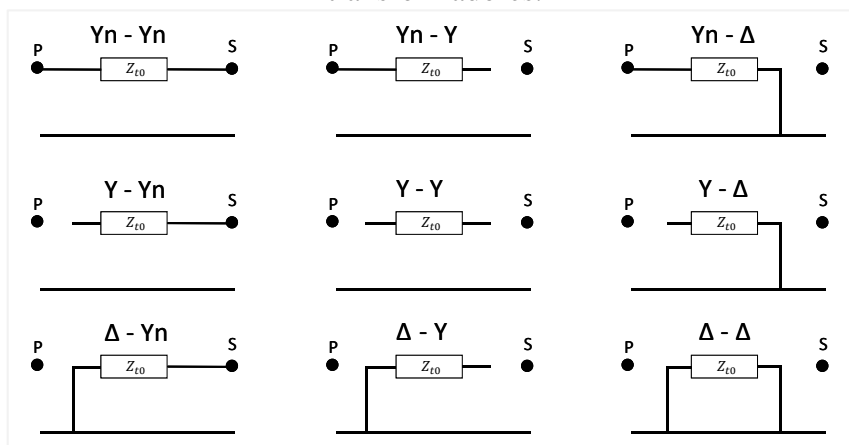
Por fim, destaca-se que, uma vez conhecidas as correntes associadas com cada tipo de falta, assim como também os circuitos equivalentes representados pelas impedâncias de sequência positiva, negativa e zero de um dado sistema elétrico sob análise, torna-se possível a determinação das tensões e correntes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

2.4 Conexões de Transformadores e Impedâncias Equivalentes

Quanto aos efeitos das conexões dos transformadores sobre os parâmetros que definem as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, vale destacar que, por se tratar de componentes estáticos, os valores das grandezas, para estes componentes, quer para a sequência positiva ou negativa se apresentam com valores iguais. Isto ocorre independentemente dos arranjos que perfazem os seus enrolamentos primário e secundário. No entanto, no que tange à sequência zero, como conhecido, seu valor é influenciado pelos arranjos das bobinas que compõem o transformador.

A Figura 7 sintetiza os tipos de conexões encontrados e a estratégia para a definição de suas impedâncias de sequência zero equivalentes.

Figura 7 – Impedância de sequência zero equivalente para distintas conexões dos transformadores.



Fonte: O autor.

Quanto ao processo físico da transferência dos fasores correspondentes às tensões e correntes, do primário para o secundário, é sabido que as de sequência positiva e as negativas se propagam de forma consonante com os defasamentos definidos pela conexão do transformador [23], [38]. Assim, representando tal defasamento pela variável α_c , a Tabela 2 fornece os valores para esta grandeza conforme a componente de sequência considerada.

Tabela 2 - Defasamentos angulares associados pelos tipos de conexão do primário e secundário do transformador – sequência positiva e negativa.

Tipo de ligação do transformador	α_{c1}	α_{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.

À luz do processo de análise destinado a identificação da origem das VTCDs, embasado no mecanismo de transferência dos indicadores de desequilíbrio de sequência do primário para o secundário dos transformadores, ou vice-versa, torna-se imperativo a caracterização dos arranjos empregados.

De acordo com a referência [28], a maioria dos transformadores empregados nas instalações elétricas no Brasil apresenta as configurações de ligação delta/estrela aterrada, estrela/delta e estrela aterrada/estrela aterrada, com predominância da ligação delta/estrela aterrada. Corroborando esses resultados, dados mais recentes, referentes aos anos de 2024 e 2025, extraídos da Base de Dados Geográficos da Distribuidora (BDGD), a partir da amostra

de algumas distribuidoras para fins de análise, evidenciam novamente a predominância do transformador com ligação delta/estrela aterrada, conforme apresentado na Tabela 3 [40].

Tabela 3 - Principais ligações de transformadores no Brasil.

Transformadores AT/MT			Transformadores MT/BT		
CPFL Paulista			CPFL Paulista		
Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)	Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)
delta/estrela aterrado	441	91,88	delta/estrela aterrado	233939	100,00
estrela/delta	1	0,21	estrela/delta	0	0,00
estrela aterrado/estrela aterrado	0	0,00	estrela aterrado/estrela aterrado	0	0,00
Não informado	0	0,00	Não informado	2	0,00
outros	38	7,92	outros	0	0,00
Total	480	100,00	Total	233941	100,00
EDP ES			EDP ES		
Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)	Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)
delta/estrela aterrado	113	74,83	delta/estrela aterrado	58526	100,00
estrela/delta	0	0,00	estrela/delta	0	0,00
estrela aterrado/estrela aterrado	21	13,91	estrela aterrado/estrela aterrado	2	0,00
Não informado	0	0,00	Não informado	0	0,00
outros	17	11,26	outros	0	0,00
Total	151	100,00	Total	58528	100,00
EDP SP			EDP SP		
Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)	Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)
delta/estrela aterrado	130	78,79	delta/estrela aterrado	61773	100,00
estrela/delta	0	0,00	estrela/delta	0	0,00
estrela aterrado/estrela aterrado	0	0,00	estrela aterrado/estrela aterrado	2	0,00
Não informado	0	0,00	Não informado	0	0,00
outros	35	21,21	outros	1	0,00
Total	165	100,00	Total	61776	100,00
ELEKTRO SP			ELEKTRO SP		
Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)	Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)
delta/estrela aterrado	121	40,33	delta/estrela aterrado	156836	98,18
estrela/delta	0	0,00	estrela/delta	0	0,00
estrela aterrado/estrela aterrado	3	1,00	estrela aterrado/estrela aterrado	2867	1,79
Não informado	94	31,33	Não informado	16	0,01
outros	82	27,33	outros	31	0,02
Total	300	100,00	Total	159750	100,00
Energisa Minas-Rio (EMR)			Energisa Minas-Rio (EMR)		
Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)	Tipos de Conexões Trifásicas	Quantidade	Porcentagem do total (%)
delta/estrela aterrado	2204	88,69	delta/estrela aterrado	16836	99,99
estrela/delta	0	0,00	estrela/delta	0	0,00
estrela aterrado/estrela aterrado	281	11,31	estrela aterrado/estrela aterrado	0	0,00
Não informado	0	0,00	Não informado	0	0,00
outros	0	0,00	outros	2	0,01
Total	2485	100,00	Total	16838	100,00

Fonte: BDGD [40].

2.5 Transferência das Correntes e Tensões de Sequência entre o Primário e o Secundário

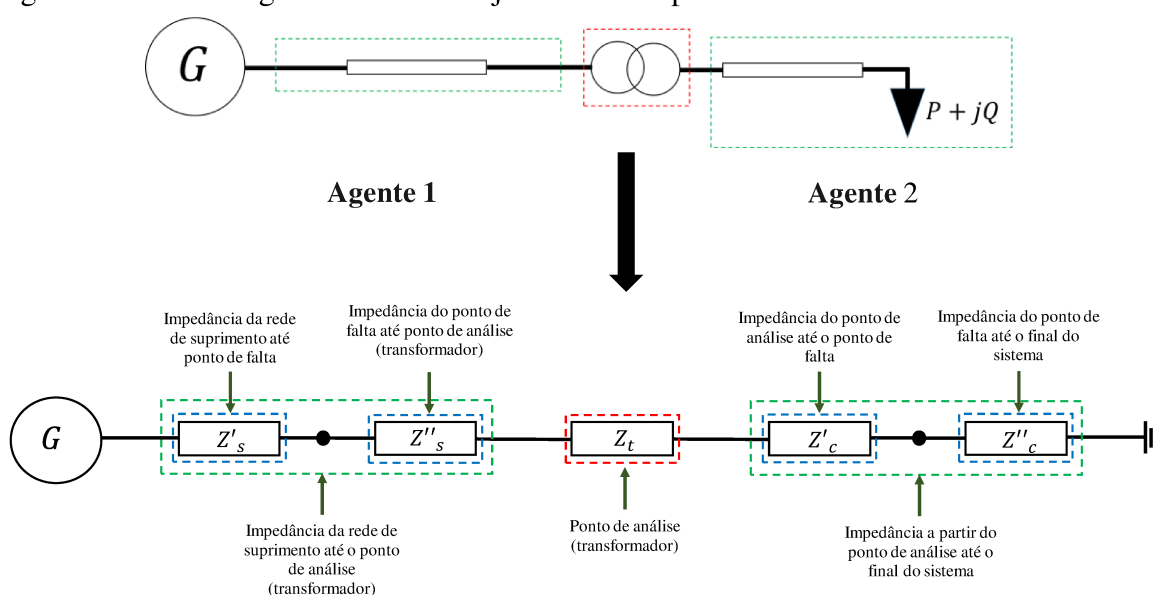
A seguir é feita uma avaliação das tensões de sequência presentes num sistema elétrico constituído por 2 agentes, um à montante e outro à jusante do transformador de conexão entre duas áreas elétricas, o qual, por vezes, é designado por transformador de fronteira.

No que tange aos dois sistemas elétricos interligados pelos transformadores, como já explicitado, estes podem compreender a conexão de: uma rede de transmissão e outra de distribuição; uma rede de suprimento e uma unidade consumidora (industrial, comercial ou

residencial); uma interligação de redes elétricas de sistemas de transmissão/distribuição com unidades de geração renovável (eólica, fotovoltaica), rede de distribuição e unidades de geração distribuída, etc.

Tendo por foco a análise do processo da propagação dos fatores de desequilíbrio entre os enrolamentos do transformador procede-se, na sequência, a obtenção das grandezas de sequência positiva, negativa e zero manifestadas em ambos os lados do equipamento. De forma ilustrativa, a Figura 8 indica a estrutura física da rede elétrica completa aqui considerada.

Figura 8 – Estrutura genérica dos arranjos utilizados para os desenvolvimentos matemáticos.



Fonte: O autor.

No diagrama unifilar:

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

Z_s - Impedância total (soma das impedâncias à montante do transformador);

Z'_s - Impedância entre a fonte de suprimento até 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;

Z_t - Impedância do transformador;

Z_c - Impedância total (soma das impedâncias à jusante do transformador);

Z'_c - Impedância entre o transformador 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 sistema à jusante do ponto de falta.

Utilizando a estrutura topológica do arranjo hipotético apresentado na Figura 8 os desenvolvimentos subsequentes estabelecem as expressões para os fatores de desequilíbrio (FDs) quando da manifestação de uma falta do lado primário e, na sequência, do lado secundário do transformador. Novamente, 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.

2.5.1 Transferência dos Fatores de Desequilíbrio para Eventos à Montante do Transformador de Conexão

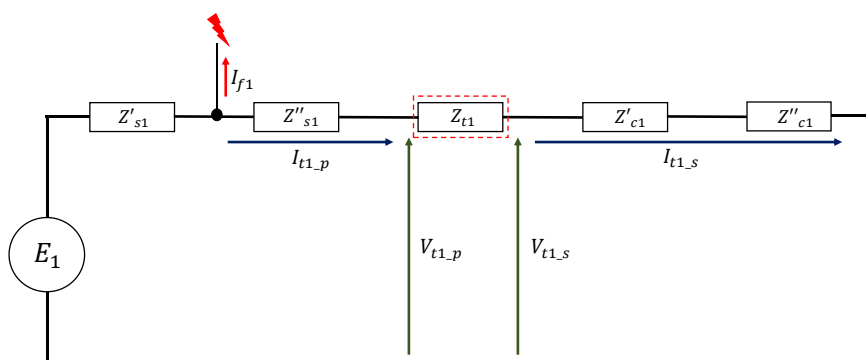
Diante do reconhecimento que os procedimentos utilizados para as análises de faltas, como já mencionado, são aqueles presentes na literatura, os desenvolvimentos a seguir encontram-se centrados em sintetizar os principais aspectos atrelados com o processo da determinação dos indicadores de desequilíbrio para posterior análise do mecanismo que rege o processo da identificação da origem das VTCDs.

Iniciando pela ocorrência do fenômeno na área à montante do transformador, os circuitos equivalentes apresentados a seguir contemplam os diversos tipos de faltas passíveis de manifestação, as quais, de acordo com sua especificidade (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra, etc.) determina o padrão para a corrente de falta I_f indicada.

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

A Figura 9 representa o circuito equivalente de sequência positiva para uma falta do lado primário do transformador.

Figura 9 - Circuito elétrico para a sequência positiva (falta à montante do transformador).

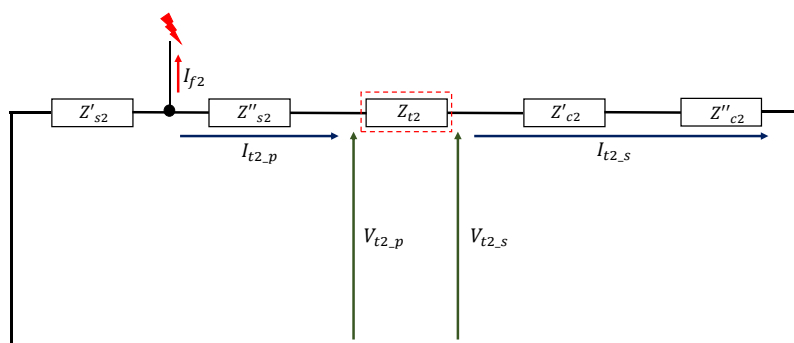


Fonte: O autor.

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

De forma correspondente, o circuito de sequência negativa é indicado na Figura 10.

Figura 10 - Circuito elétrico para a sequência negativa (falta à montante do transformador).

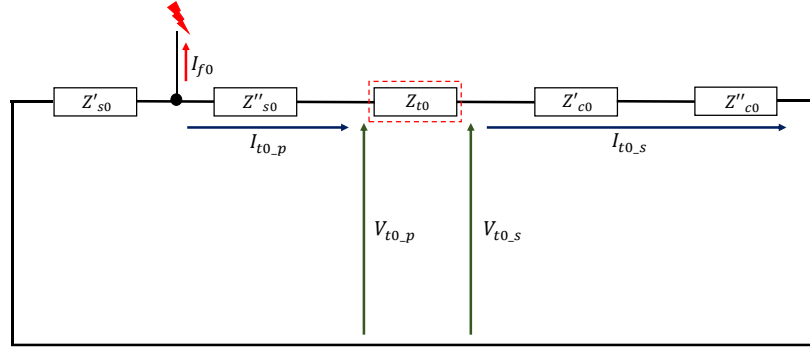


Fonte: O autor.

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

Quanto ao circuito de sequência nula, este é representado pela Figura 11, a qual encontra-se particularizada para o arranjo estrela-estrela, aterradas em ambos os lados.

Figura 11 - Circuito elétrico para a sequência zero, representação com o transformador conectado em Yn – Yn (falta à montante do transformador).



Fonte: O autor.

Iniciando pelas correntes, estas se apresentam nos termos estabelecidos em (19) e (20), onde V_{1_falta} , V_{2_falta} e V_{0_falta} correspondem as tensões de sequência positiva, negativa e zero no ponto de falta indicado nas imagens anteriores.

$$I_{t1_p} = \frac{V_{1_falta}}{Z''_{s1} + Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} \quad (19)$$

$$I_{t2_p} = \frac{V_{2_falta}}{Z''_{s2} + Z_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})} \quad (20)$$

As correntes de sequência zero, do lado primário, para a conexão Yn/Yn, está presente em (21). Em se tratando da conexão Yn/D a corrente em questão é dada por (22). Para as demais conexões tem-se (23).

$$I_{t0_p} = \frac{V_{0_falta}}{Z''_{s0} + Z_{t0} + (Z'_{c0} + Z''_{c0})} \quad (21)$$

$$I_{t0_p} = \frac{V_{0_falta}}{Z''_{s0} + Z_{t0}} \quad (22)$$

$$I_{t0_p} = 0 \quad (23)$$

Uma vez conhecidas as correntes, as correspondentes tensões de sequência podem ser obtidas através de (24) e (25).

$$V_{t1_p} = V_{1_falta} - I_{t1_p} * Z''_{s1} \quad (24)$$

$$V_{t2_p} = V_{2_falta} - I_{t2_p} * Z''_{s2} \quad (25)$$

Para o circuito de sequência zero, em se tratando das conexões Yn/Yn e Yn/D, as correspondentes tensões são dadas por (26). Quanto aos demais arranjos tem-se (27).

$$V_{t0_p} = V_{0_falta} - I_{t0_p} * Z''_{s0} \quad (26)$$

$$V_{t0_p} = V_{0_falta} \quad (27)$$

Em consonância com os defasamentos existentes entre as grandezas de sequência positiva e negativa, valores estes indicados na Tabela 2 e, a transferência dos fatores associados com as correntes de sequência positiva e negativa, do primário para o secundário, ocorre nos termos estabelecidos por (28) e (29).

$$I_{t1_s} = I_{t1_p} * a_{c1} \quad (28)$$

$$I_{t2_s} = I_{t2_p} * a_{c2} \quad (29)$$

No que tange às correntes de sequência zero no secundário do transformador, caso este seja Yn/Yn, a expressão equivalente é a (30), enquanto para as demais conexões a (31).

$$I_{t0_s} = I_{t0_p} \quad (30)$$

$$I_{t0_s} = 0 \quad (31)$$

Em se tratando das tensões:

$$V_{t1_s} = I_{t1_s} * (Z'_{c1} + Z''_{c1}) \quad (32)$$

$$V_{t2_s} = I_{t2_s} * (Z'_{c2} + Z''_{c2}) \quad (33)$$

Para as grandezas associadas com a sequência zero, para a conexão Yn/Yn a relação correspondente é a (34), enquanto que, para os demais arranjos é a (35).

$$V_{t0_s} = I_{t0_s} * (Z'_{c0} + Z''_{c0}) \quad (34)$$

$$V_{t0_s} = 0 \quad (35)$$

De acordo com os objetivos maiores deste trabalho, o processo da identificação da origem das VTCDs está baseado na correlação entre os fatores de desequilíbrio encontrados para o primário e transferidos para o secundário. Assim, a partir das expressões das tensões e correntes de sequência positiva, negativa e zero, deriva-se (36) a (47). Estas utilizam o

subíndice “p” para as expressões dos fatores de desequilíbrio do lado do primário, e “s” para o secundário.

$$FD2v_p = \frac{V_{t2_p}}{V_{t1_p}} = \frac{V_{2_falta} - I_{t2_p} * Z''_{s2}}{V_{1_falta} - I_{t1_p} * Z''_{s1}} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} FD2v_s &= \frac{V_{t2_s}}{V_{t1_s}} = \frac{I_{t2_s} * (Z'_{c2} + Z''_{c2})}{I_{t1_s} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \frac{I_{t2_p} * a_{c2} * (Z'_{c2} + Z''_{c2})}{I_{t1_p} * a_{c1} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \\ &= \frac{\frac{V_{t2_p}}{Z'_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})} * a_{c2} * (Z'_{c2} + Z''_{c2})}{\frac{V_{t1_p}}{Z'_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} * a_{c1} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \frac{\frac{(Z'_{c2} + Z''_{c2})}{Z'_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})} * a_{c2} * V_{t2_p}}{\frac{(Z'_{c1} + Z''_{c1})}{Z'_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} * a_{c1} * V_{t1_p}} \end{aligned} \quad (37)$$

Correlacionando as informações obtidas em [29], [30], [39], com o reconhecimento que as impedâncias de sequência positiva e negativa, para componentes estáticos, são praticamente iguais, isto resulta em:

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

De onde se conclui que:

$$|FD2v_s| = \left| 1 * \frac{V_{t2_p}}{V_{t1_p}} \right| = |FD2v_p| \quad (38)$$

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

$$FD0v_p = \frac{V_{t0_p}}{V_{t1_p}} = \frac{V_{0_falta} - I_{t0_p} * Z''_{s0}}{V_{1_falta} - I_{t1_p} * Z''_{s1}} \quad (39)$$

$$FD0v_s = \frac{V_{t0_s}}{V_{t1_s}} = \frac{I_{t0_s} * (Z'_{c0} + Z''_{c0})}{I_{t1_s} * (Z'_{c1} + Z''_{c1})} \quad (40)$$

Já em se tratando dos fatores acima, vale ressaltar que, conforme o tipo de conexão do transformador, exceto pelo arranjo estrela aterrada-estrela aterrada, os demais irão resultar em impedâncias equivalentes de sequência zero distintas daquela de sequência positiva ou

negativa. Além da diferença destes parâmetros, ainda poder-se-á ter, a não ser pela dita conexão acima, até mesmo a existência da corrente de sequência zero num e não noutro lado. Enfim, todos os demais tipos de transformadores distintos do acima posto, não conduzirão a uma identidade dos fatores de desequilíbrio de sequência zero, de um para o outro lado do transformador. Estas questões podem ser observadas através de uma análise de (41).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{FD0}v_s &= \frac{I_{t0_p} \cdot (Z'_{c0} + Z''_{c0})}{I_{t1_p} \cdot a_{c1} \cdot (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \\
 &= \frac{\frac{V_{t0_p}}{Z_{t0} + (Z'_{c0} + Z''_{c0})} \cdot (Z'_{c0} + Z''_{c0})}{\frac{V_{t1_p}}{Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} \cdot a_{c1} \cdot (Z'_{c1} + Z''_{c1})} = \frac{\frac{(Z'_{c0} + Z''_{c0})}{Z_{t0} + (Z'_{c0} + Z''_{c0})} \cdot V_{t0_p}}{\frac{(Z'_{c1} + Z''_{c1})}{Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} \cdot a_{c1} \cdot V_{t1_p}} \quad (41)
 \end{aligned}$$

A relação das impedâncias de sequência zero e as de sequência positiva é dada por (42)

$$\left| \frac{\frac{(Z'_{c0} + Z''_{c0})}{Z_{t0} + (Z'_{c0} + Z''_{c0})}}{\frac{(Z'_{c1} + Z''_{c1})}{Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})} \cdot a_{c1}} \right| \quad (42)$$

Além da questão das impedâncias, nos termos acima postos, como já mencionado, para as conexões outras que não a estrela aterrada-estrela aterrada, tem-se que $I_{t0_s} = 0$, o que determina que $\mathbf{FD0}v_s = \mathbf{0}$. Novamente, este fato ratifica a situação operacional para a qual $|\mathbf{FD0}v_s| \neq |\mathbf{FD0}v_p|$.

Quanto aos fatores de desequilíbrio relacionados às correntes de sequência negativa e zero, a transferência destes indicadores ocorre nos termos estabelecidos por (43) a (47).

$$\mathbf{FD2}i_p = \frac{I_{t2_p}}{I_{t1_p}} = \frac{\frac{V_{2_falta}}{Z''_{s2} + Z_{t2} + (Z'_{c2} + Z''_{c2})}}{\frac{V_{1_falta}}{Z''_{s1} + Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})}} \quad (43)$$

$$\mathbf{FD2}i_s = \frac{I_{t2_s}}{I_{t1_s}} = \frac{I_{t2_p} \cdot a_{c2}}{I_{t1_p} \cdot a_{c1}} \quad (44)$$

$$|FD2i_s| = \left| \frac{I_{t2_p} \cdot a_{c2}}{I_{t1_p} \cdot a_{c1}} \right| = \left| \frac{I_{t2_p}}{I_{t1_p}} \right| = |FD2i_p| \quad (45)$$

Enquanto que para a sequência zero:

$$FD0i_p = \frac{I_{t0_p}}{I_{t1_p}} = \frac{\frac{V_{0_falta}}{Z''_{s0} + Z_{t0} + (Z'_{c0} + Z''_{c0})}}{\frac{V_{1_falta}}{Z''_{s1} + Z_{t1} + (Z'_{c1} + Z''_{c1})}} \quad (46)$$

$$FD0i_s = \frac{I_{t0_s}}{I_{t1_s}} = \frac{I_{t0_s}}{I_{t1_p} \cdot a_{c1}} \quad (47)$$

Do exposto se que os fatores de desequilíbrio associados com a correntes de sequência positiva e negativa, novamente, resulta numa relação unitária, ou seja, são iguais em ambos os lados do transformador. Para o fator de desequilíbrio de sequência zero, as constatações anteriores continuam aplicáveis.

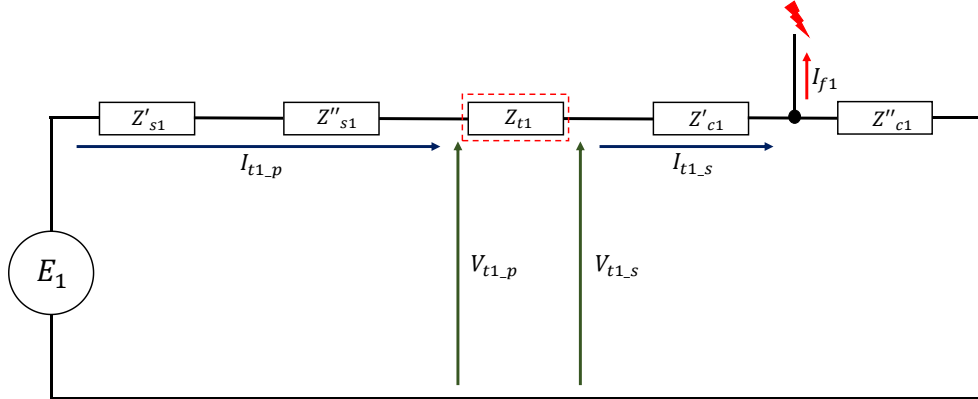
2.5.2 Transferência dos Fatores de Desequilíbrio para Eventos à Jusante do Transformador de Conexão

Seguindo a mesma estratégia para eventos advindos da rede elétrica do lado primário, apresenta-se, a seguir, os correspondentes resultados quando os distúrbios ocorrem do lado secundário do transformador de conexão.

Tendo em vista que os procedimentos são similares aos já estabelecidos, são apresentados apenas os resultados finais para as formulações atreladas com cada item de análise.

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

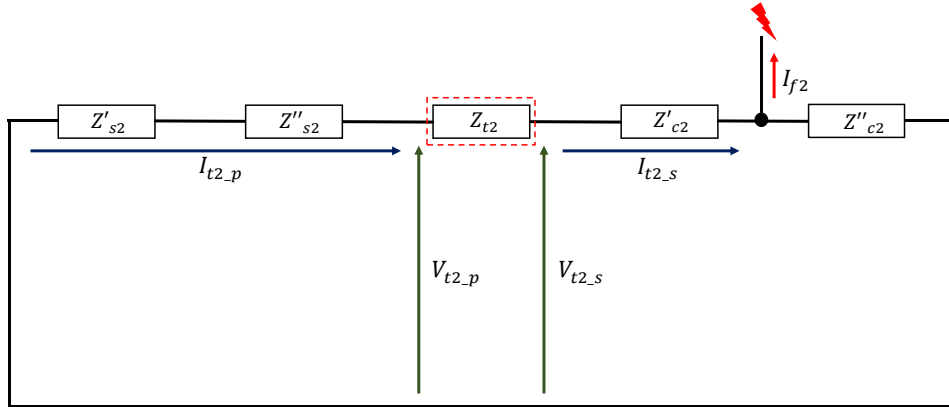
Figura 12 - Circuito elétrico para a sequência positiva (falta no lado do agente 2).



Fonte: O autor.

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

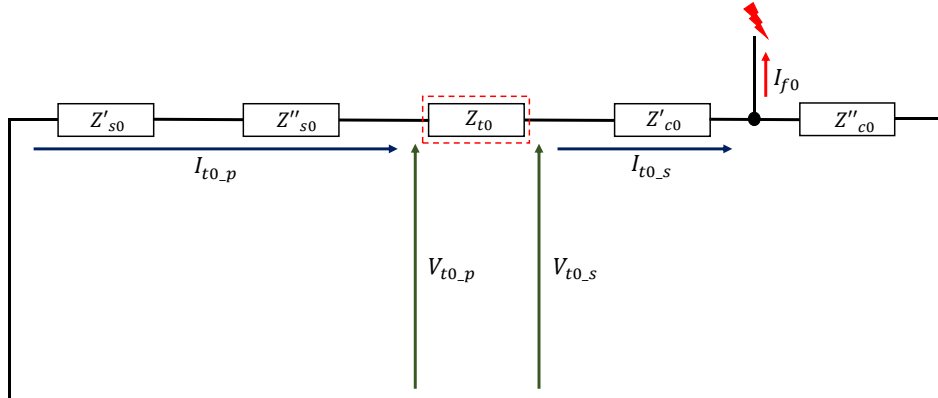
Figura 13 - Circuito elétrico para a sequência negativa (falta no lado do agente 2).



Fonte: O autor.

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

Figura 14 - Circuito elétrico para a sequência zero, representação com o transformador conectado em Yn – Yn (falta no lado do agente 2).



Fonte: O autor.

Para o caso da falta no lado do agente 2, inicialmente são analisadas as correntes do lado secundário do transformador de conexão, as quais são dadas, respectivamente, por (48) e (49).

$$I_{t1_s} = I_{f1} + \frac{V_{1_falta}}{Z'_{c1}} \quad (48)$$

$$I_{t2_s} = I_{f2} + \frac{V_{2_falta}}{Z'_{c2}} \quad (49)$$

No que tange às correntes de sequência zero do lado secundário do transformador, (50) representa as mesmas para as conexões Yn/Yn e D/Yn. Quanto aos demais arranjos tais correntes são dadas por (51).

$$I_{t0_s} = I_{f0} + \frac{V_{0_falta}}{Z'_{c0}} \quad (50)$$

$$I_{t0_s} = 0 \quad (51)$$

Para as tensões de sequência positiva e negativa, as relações são:

$$V_{t1_s} = V_{1_falta} + Z'_{c1} * I_{t1_s} \quad (52)$$

$$V_{t2_s} = V_{2_falta} + Z'_{c2} * I_{t2_s} \quad (53)$$

Examinando-se as tensões de sequência zero do lado secundário do transformador em função do tipo de conexão de seus enrolamentos, obtêm-se (54) para as conexões Yn/Yn e D/Yn, e (55) para as demais conexões.

$$V_{t0_s} = V_{0_falta} + Z'_{c0} * I_{t0_s} \quad (54)$$

$$V_{t0_s} = V_{0_falta} \quad (55)$$

As correntes de sequência positiva e negativa são transferidas para o lado primário do transformador como indicado a seguir:

$$I_{t1_p} = I_{t1_s} * a_{c1} \quad (56)$$

$$I_{t2_p} = I_{t2_s} * a_{c2} \quad (57)$$

Já para as correntes de sequência zero do lado do primário, essas são dadas por (58) para a conexão Yn/Yn e, em (59) tem-se a correlação para as demais conexões.

$$I_{t0_p} = I_{t0_s} \quad (58)$$

$$I_{t0_p} = 0 \quad (59)$$

As tensões de sequência positiva e negativa podem ser escritas de duas formas diferentes, conforme apresentadas nas expressões a seguir:

$$V_{t1_p} = E_1 * a_{c1} - (Z'_{s1} + Z''_{s1}) * I_{t1_p} \quad (60)$$

Ou:

$$V_{t1_p} = Z_{t1} * I_{t1_p} + Z'_{c1} * I_{t1_p} + V_{1_falta} * a_{c1} \quad (61)$$

E para as tensões de sequência negativa:

$$V_{t2_p} = - (Z'_{s2} + Z''_{s2}) * I_{t2_p} \quad (62)$$

Ou:

$$V_{t2_p} = Z_{t2} * I_{t2_p} + Z'_{c2} * I_{t2_p} + V_{2_falta} * a_{c2} \quad (63)$$

Para a sequência zero, se a conexão do transformador for Yn/Yn a relação é dada em (64) ou (65). Para as demais conexões (66).

$$V_{t0_p} = - (Z'_{s0} + Z''_{s0}) * I_{t0_p} \quad (64)$$

$$V_{t0_p} = Z_{t0} * I_{t0_p} + Z'_{c0} * I_{t0_p} + V_{0_falta} \quad (65)$$

$$V_{t0_p} = 0 \quad (66)$$

Após obtidas as expressões de tensão e corrente de sequência em ambos os lados do transformador, os fatores de desequilíbrio correspondentes para um evento manifestado do lado do agente 2 são:

$$FD2v_p = \frac{V_{t2_p}}{V_{t1_p}} = \frac{Z_{t2} * I_{t2_p} + Z'_{c2} * I_{t2_p} + V_{2_falta} * a_{c2}}{Z_{t1} * I_{t1_p} + Z'_{c1} * I_{t1_p} + V_{1_falta} * a_{c1}} \quad (67)$$

$$FD2v_s = \frac{V_{t2_s}}{V_{t1_s}} = \frac{Z'_{c2} * I_{t2_s} + V_{2_falta}}{Z'_{c1} * I_{t1_s} + V_{1_falta}} \quad (68)$$

Destacando o termo:

$$\frac{Z_{t2} * I_{t2_p}}{Z_{t1} * I_{t1_p}}$$

Tem-se que:

$$FD2v_s = \frac{Z'_{c2} * I_{t2_s} + V_{2_falta}}{Z'_{c1} * I_{t1_s} + V_{1_falta}} \neq \frac{Z_{t2} * I_{t2_p} + Z'_{c2} * I_{t2_p} + V_{2_falta} * a_{c2}}{Z_{t1} * I_{t1_p} + Z'_{c1} * I_{t1_p} + V_{1_falta} * a_{c1}} = FD2v_p \quad (69)$$

Correlacionando (67) e (68) constata-se que estas diferem pelo termo $Z_t * I_{t_p}$. Tendo em vista que a corrente de sequência positiva, via de regra, é maior que a de sequência negativa, mesmo em Z_t sendo igual para as duas sequências, isso resulta em um FD diferente do secundário (que se mostra com magnitude maior). Exceção poderá ser verificada quando da operação do agente 2 com cargas motrizes em grande número. Este assunto será investigado no capítulo subsequente.

Quanto aos fatores de desequilíbrio de sequência zero das tensões entre o primário e o secundário, estes são:

$$FD0v_p = \frac{Z_{t0} * I_{t0_p} + Z'_{c0} * I_{t0_p} + V_{0_falta}}{Z_{t1} * I_{t1_p} + Z'_{c1} * I_{t1_p} + V_{1_falta} * a_{c1}} \quad (70)$$

$$FD0v_s = \frac{V_{t0_s}}{V_{t1_s}} = \frac{Z'_{c0} * I_{t0_s} + V_{0_falta}}{Z'_{c1} * I_{t1_s} + V_{1_falta}} \quad (71)$$

Mais uma vez pode-se identificar um comportamento semelhante àquele já verificado anteriormente.

Em se tratando das correntes de sequência negativa:

$$FD2i_p = \frac{I_{t2_p}}{I_{t1_p}} = \frac{I_{t2_s} * a_{c2}}{I_{t1_s} * a_{c1}} \quad (72)$$

$$FD2i_s = \frac{I_{t2_s}}{I_{t1_s}} = \frac{I_{f2} + \frac{V_{2_falta}}{Z''_{c2}}}{I_{f1} + \frac{V_{1_falta}}{Z''_{c1}}} \quad (73)$$

Que resulta em:

$$|FD2i_s| = \left| \frac{I_{t2_s}}{I_{t1_s}} \right| = \left| \frac{I_{t2_s} * a_{c2}}{I_{t1_s} * a_{c1}} \right| = |FD2i_p|$$

E para as correntes de sequência zero:

$$FD0i_p = \frac{I_{t0_p}}{I_{t1_p}} = \frac{I_{t0_p}}{I_{t1_s} * a_{c1}} \quad (74)$$

$$FD0i_s = \frac{I_{t0_s}}{I_{t1_s}} = \frac{I_{f0} + \frac{V_{0_falta}}{Z''_{c0}}}{I_{f1} + \frac{V_{1_falta}}{Z''_{c1}}} \quad (75)$$

2.6 Considerações finais

Utilizando fundamentos estabelecidos a partir da formulação analítica da temática considerada nesta tese de doutorado, a qual se encontra focada no aprimoramento da estratégia para a identificação da responsabilidade de eventos e efeitos associados com a ocorrência de VTCDs, foram conduzidos, neste capítulo, desenvolvimentos matemáticos para o embasamento do processo, ainda de forma conceitual. Para a caracterização dos eventos, quanto a sua natureza e intensidades, dentre uma gama de fenômenos que poderiam produzir os efeitos aqui tratados, quais sejam, a manifestação das VTCDs, utilizou-se como fonte para os distúrbios, a ocorrência de curtos-circuitos. Estes, em suas formas mais diversas viabilizaram a manifestação de fenômenos representativos de variações de tensão nos termos requeridos pelos estudos.

A partir das expressões que regem o comportamento dos fatores de desequilíbrio, quer quanto a sequência negativa e zero, foi possível estabelecer um processo avaliativo sobre o

mecanismo de transferência destes, do primário para o secundário dos transformadores que interligam dois agentes. E assim, a identificação da origem da anomalia ocorrida.

No que se refere a questão dos agentes envolvidos na busca da responsabilidade do distúrbio, a terminologia empregada referindo-se a dois agentes, estes podem compreender um ponto de conexão entre dois sistemas transmissores, ou um transmissor e outro de distribuidor, ou um ponto de acoplamento de uma rede elétrica com um parque eólico, ou ainda, como via de regra é o caso, de um supridor e uma unidade consumidora industrial, comercial ou residencial.

Utilizando um tratamento matemático para a correlação dos fatores de desequilíbrios ocorridas no primário e secundário do equipamento de conexão, para diferentes tipos de eventos e de conexões, foi possível constatar e estabelecer uma lógica para a identificação do agente responsável pelo ocorrido.

Os estudos, ainda de cunho conceitual, realizados nesta unidade, apontaram para o fato que, quando a fonte do distúrbio é advinda do lado do agente 1 ou primário do transformador:

- Os FDs de sequência negativa se mostram iguais para os dois agentes, quer para a tensão e corrente;
- Os FDs de sequência zero, como esperado, dependem das conexões dos transformadores e se o evento envolve o terra. Assim, de forma geral, não havendo uma única relação para as transferência deste indicador, o mesmo, por si só, não se mostra conclusivo para o processo da identificação.

Por outro lado, quando a origem do distúrbio está no agente 2 conectado ao secundário do transformador, as constatações são:

- Os FDs das tensões de sequência negativa determinados do lado primário e secundário se mostram distintos;
- Já, em se tratando dos FDs das correntes dos lados primário e secundário, estes se mostram iguais;
- Quanto ao FD de sequência zero, mais uma vez, esta grandezas é fortemente dependente do tipo de ligação do transformador e do tipo de falta e não garante o estabelecimento de uma base sólida.

A Tabela 4 resume os resultados dos processos de transferência dos fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero, tanto para tensões quanto para as correntes. Também, as grandezas $FD0v$ e $FD0i$ se mostram como bases complementares visando a consistência da análise.

Tabela 4 – Resumo com a relação entre os fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero para tensões e correntes, de acordo com o tipo de transformador e a origem da VTCD.

Conexão do Transformador	Origem da VTCD	$FD2v_p\%$ x $FD2v_s\%$	$FD0v_p\%$ x $FD0v_s\%$	$FD2i_p\%$ x $FD2i_s\%$	$FD0i_p\%$ x $FD0i_s\%$
Δ -Yn	Primário	igual	diferente ou inexistente	igual	inexistente
	Secundário	diferente	diferente ou inexistente	igual	diferente ou inexistente
Y- Δ	Primário	igual	diferente ou inexistente	igual	inexistente
	Secundário	diferente ou inexistente	diferente ou inexistente	igual ou inexistente	inexistente
Yn-Yn	Primário	igual	igual, diferente ou inexistente	igual	igual, diferente ou inexistente
	Secundário	diferente	diferente ou inexistente	igual	igual, diferente ou inexistente

Fonte: O autor.

3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA COM CARGAS HÍBRIDAS

3.1 Considerações Iniciais

Quando do estabelecimento dos fundamentos teóricos do método proposto para a identificação da origem dos eventos associados com VTCDs, nos termos postos no Capítulo 2, estes foram conduzidos considerando que os agentes envolvidos possuíam, em sua estrutura de consumo, apenas cargas passivas. Todavia, em se tratando de instalações reais, notadamente as industriais, a predominância de cargas motrizes é marcante e, diante deste fato, não há uma correlação linear entre os níveis dos desequilíbrios das tensões e das correntes. Assim sendo, para tais complexos elétricos, constituídos por cargas híbridas, torna-se imperativa uma análise detalhada desta interação, visando conhecer o grau de influência que tais condições operacionais impõem sobre a estratégia de identificação da origem das VTCDs. Esta questão motivou os desenvolvimentos conduzidos neste capítulo, os quais exploram, sob o ponto de vista teórico/conceitual, o processo da transferência dos indicadores de desequilíbrio e os respectivos fatores de influência, quando da presença de cargas motrizes.

Neste contexto investigativo, são realizados desenvolvimentos matemáticos de cunho teórico/conceitual, embasados na representação dos motores pelas suas distintas impedâncias equivalentes de sequência positiva e negativa. Estes parâmetros, diferentemente da situação que ocorre para componentes estáticos, são bastante distintos, fato este que impacta nos fundamentos anteriormente impostos no capítulo 2.

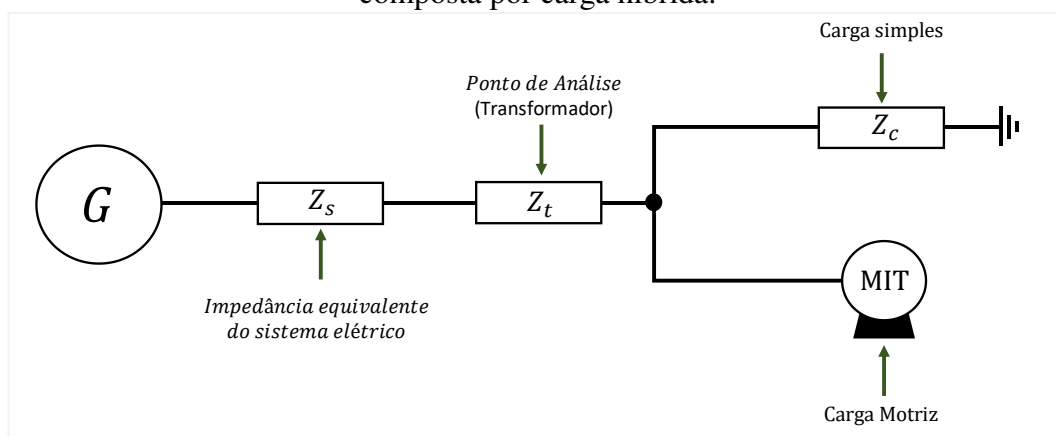
Por fim, objetivando identificar o grau de influência que a composição das cargas híbridas exerce sobre o desempenho do método, estudos computacionais envolvendo a totalidade do consumo modelada por motores, assim como, uma composição mista destes, com cargas do tipo impedância constante, são consideradas nas investigações.

Vale ressaltar que os estudos computacionais são realizados utilizando o simulador MATLAB/Simulink, o qual, em sua biblioteca de recursos, disponibiliza modelos dinâmicos de motores de indução. Assim sendo, nesta etapa, as avaliações serão feitas com base neste recurso, o qual aprimora a representação utilizada na fase teórica.

3.2 Fatores de Desequilíbrio para Instalações com Cargas Híbridas

Em consonância com os objetivos das análises a serem conduzidas para um complexo elétrico associado com 2 agentes conectados através de um determinado PAC, junto ao qual encontra-se instalado um transformador de fronteira, o qual serve como base para as medições requeridas pelo método de análise, utilizou-se o sistema apresentado na Figura 15. Este arranjo se apresenta constituído por um alimentador definido através de sua impedância equivalente, um transformador de conexão e o agente consumidor, o qual é caracterizado por uma carga mista, formada por uma impedância constante e um motor de indução equivalentes. Embora a constituição topológica do sistema seja bastante simples, o mesmo se apresenta com uma estrutura apropriada às investigações a serem conduzidas neste capítulo.

Figura 15 - Estrutura topológica do sistema simplificado utilizado com unidade consumidora composta por carga híbrida.



Fonte: O autor.

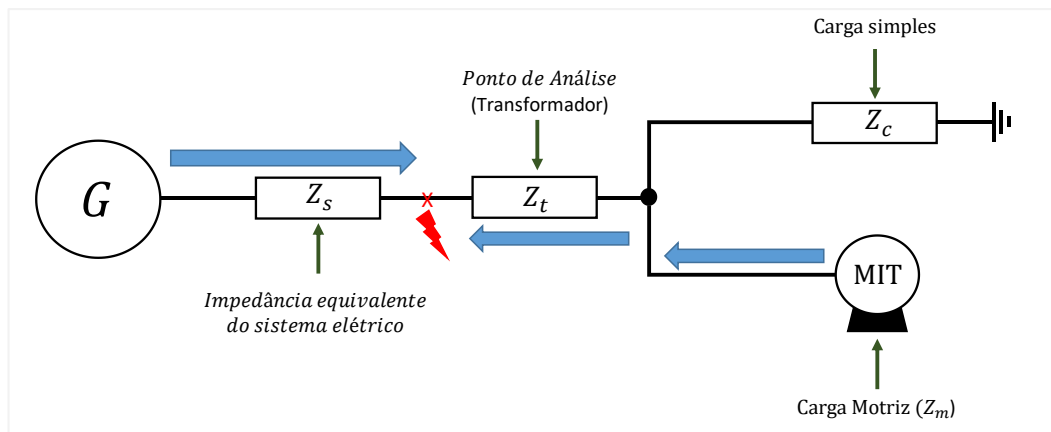
Com base no sistema acima, procede-se as análises dos fatores de desequilíbrio auferidos dos lados primário e secundário do transformador, visando a identificação da correlação entre estes indicadores para fins do emprego do método de análise em questão.

- **Evento oriundo do lado primário do transformador de conexão**

A Figura 16 apresenta as contribuições do sistema elétrico e do motor de indução diante da ocorrência de um evento originado no lado primário do transformador em estudo. A contribuição do MIT se estabelece como uma fonte de corrente que é injetada no arranjo paralelo formado pela impedância da carga passiva (muito maior que a do transformador) e a

rede propriamente dita. Já a contribuição do gerador equivalente da rede de suprimento é injetada diretamente no curto-circuito.

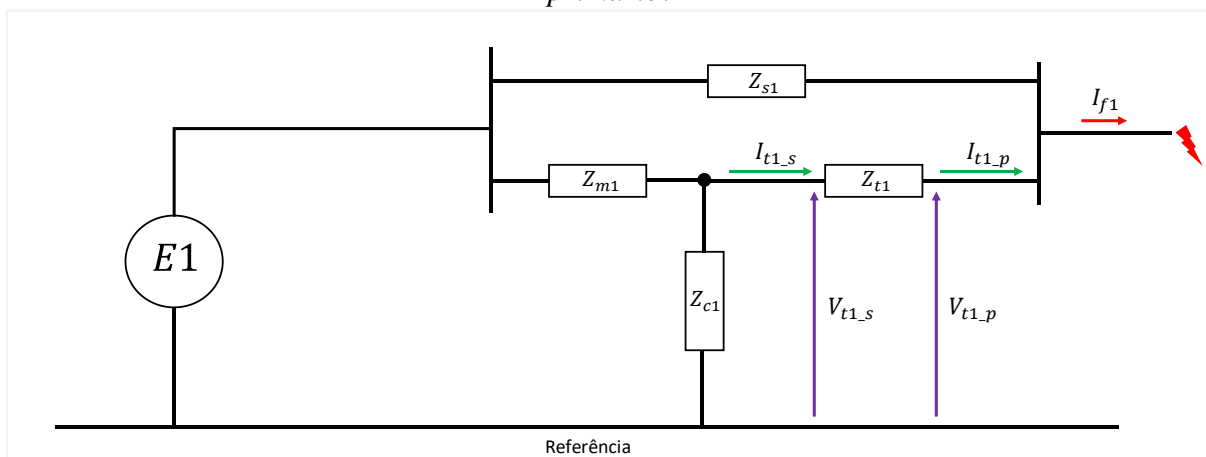
Figura 16 – Contribuições de correntes para uma falta originária no primário do transformador.



Fonte: O autor.

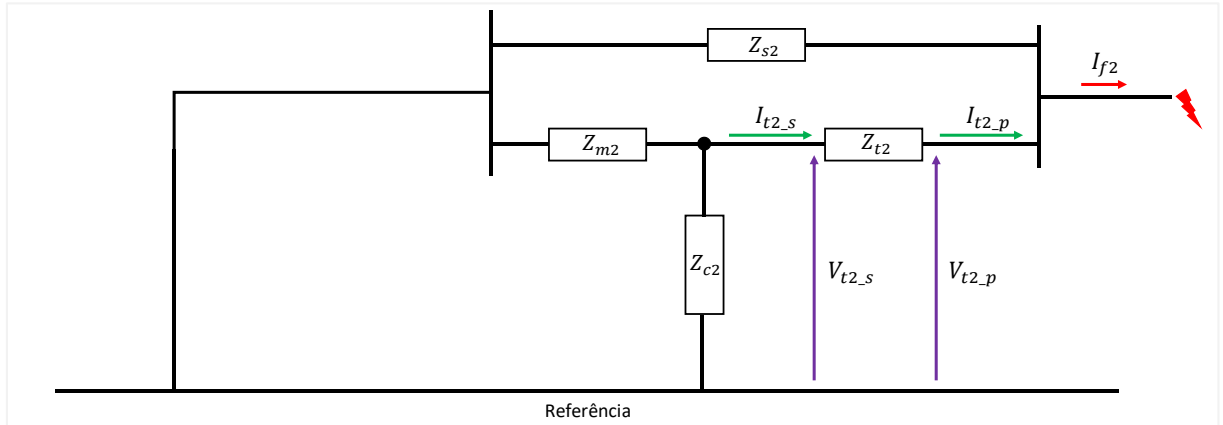
Os circuitos de sequência positiva, negativa e zero representativos do modelo equivalente do sistema são apresentados, respectivamente, nas Figura 17 a Figura 19, os circuitos foram baseados nas referências [41], [42]. Como pode ser constatado, o transformador empregado se apresenta com a conexão Yn–Yn, fato este não limitante, mas apenas ilustrativo para os desenvolvimentos das expressões matemáticas. Outras configurações quanto ao arranjo para os primários e secundários serão exploradas posteriormente através das análises computacionais.

Figura 17 – Circuito equivalente de sequência positiva para uma falta aplicada do lado primário.



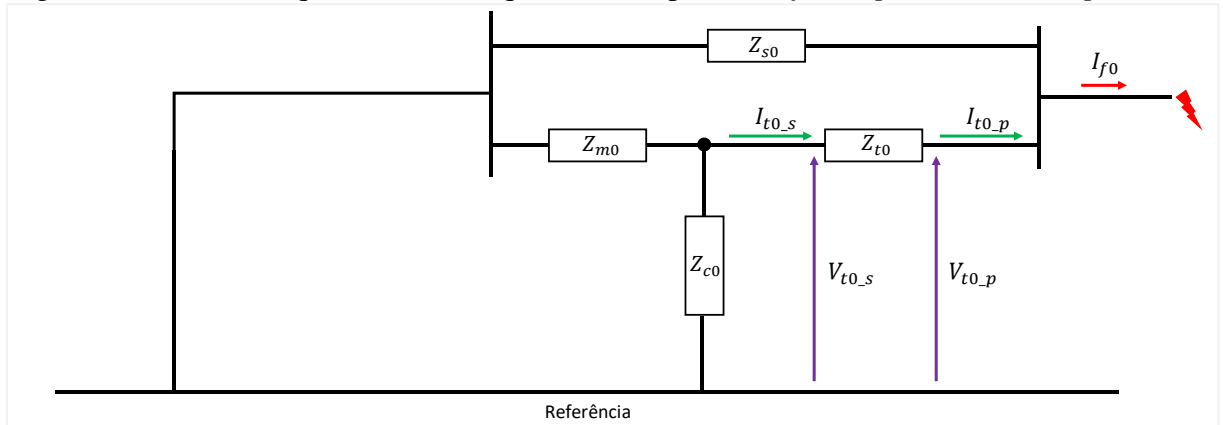
Fonte: O autor.

Figura 18 – Circuito equivalente de sequência negativa para uma *falta aplicada do lado primário*.



Fonte: O autor.

Figura 19 – Circuito equivalente de sequência zero para uma *falta aplicada do lado primário*.



Fonte: O autor.

Tomando por base os circuitos equivalentes anteriormente indicados, é possível escrever as seguintes expressões para as tensões e correntes no lado do primário do transformador:

$$V_{t1,p} = V_{1_falta} \quad (76)$$

$$V_{t2,p} = V_{2_falta} \quad (77)$$

$$V_{t0,p} = V_{0_falta} \quad (78)$$

$$I_{t1_p} = I_{f1} - \frac{E1 - V_{1_falta}}{Z_{s1}} \quad (79)$$

$$I_{t2_p} = I_{f2} * \left(\frac{Z_{s2}}{Z_{s2} + Z_{t2} + (Z_{m2} // Z_{c2})} \right) \quad (80)$$

$$I_{t0_p} = I_{f0} * \left(\frac{Z_{s0}}{Z_{s0} + Z_{t0} + (Z_{m0} // Z_{c0})} \right) \quad (81)$$

Quanto as grandezas correspondentes do lado secundário:

$$I_{t1_s} = I_{t1_p} * a_{c1} \quad (82)$$

$$I_{t2_s} = I_{t2_p} * a_{c2} \quad (83)$$

Onde: a_{c1} e a_{c2} são defasamentos angulares utilizados para incorporar os deslocamentos dos ângulos do primário para secundário.

Para a sequência zero, obtêm-se a seguinte expressão para a conexão Yn-Yn:

$$I_{t0_s} = I_{t0_p} \quad (84)$$

Para outras conexões dos transformadores, que não permitem caminhos para as componentes de corrente de sequência zero:

$$I_{t0_s} = 0 \quad (85)$$

Em relação ao lado secundário do transformador de conexão, as correspondentes grandezas são:

$$V_{t1_s} = V_{1_falta} * a_{c1} + Z_{t1} * I_{t1_s} \quad (86)$$

$$V_{t2_s} = V_{2_falta} * a_{c2} + Z_{t2} * I_{t2_s} \quad (87)$$

$$\mathbf{V}_{t0_s} = \mathbf{V}_{0_falta} + Z_{t0} * \mathbf{I}_{t0_s} \quad (88)$$

Para as demais conexões que não oferecem caminhos para a corrente de sequência zero, seu valor será, naturalmente, nulo.

A partir das expressões obtidas, torna-se possível o equacionamento dos fatores de desequilíbrio associados com o primário e o secundário do transformador que estabelece a conexão entre os agentes, como a seguir:

$$\mathbf{FD2}v_p = \frac{V_{t2_p}}{V_{t1_p}} = \frac{V_{2_falta}}{V_{1_falta}} \quad (89)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{FD2}v_s &= \frac{V_{t2_s}}{V_{t1_s}} = \frac{V_{2_falta} * a_{c2} + Z_{t2} * \mathbf{I}_{t2_s}}{V_{1_falta} * a_{c1} + Z_{t1} * \mathbf{I}_{t1_s}} = \\ &= \frac{V_{2_falta} * a_{c2} + Z_{t2} * I_{f2} * a_{c2} * \left(\frac{Z_{s2}}{Z_{s2} + Z_{t2} + (Z_{m2} // Z_{c2})} \right)}{V_{1_falta} * a_{c1} + Z_{t1} * a_{c1} * \left(I_{f1} - \frac{\mathbf{E1} - \mathbf{V}_{1_falta}}{Z_{s1}} \right)} \end{aligned} \quad (90)$$

$$\mathbf{FD0}v_p = \frac{V_{t0_p}}{V_{t1_p}} = \frac{V_{0_falta}}{V_{1_falta}} \quad (91)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{FD0}v_s &= \frac{V_{t0_s}}{V_{t1_s}} = \frac{V_{0_falta} + Z_{t0} * \mathbf{I}_{t0_s}}{V_{1_falta} + Z_{t1} * \mathbf{I}_{t1_s}} \\ &= \frac{V_{0_falta} + Z_{t0} * I_{f0} * \left(\frac{Z_{s0}}{Z_{s0} + Z_{t0} + (Z_{m0} // Z_{c0})} \right)}{V_{1_falta} * a_{c1} + Z_{t1} * a_{c1} * \left(I_{f1} - \frac{\mathbf{E1} - \mathbf{V}_{1_falta}}{Z_{s1}} \right)} \end{aligned} \quad (92)$$

Para as correntes:

$$\mathbf{FD2}i_p = \frac{I_{t2_p}}{I_{t1_p}} \quad (93)$$

$$\mathbf{FD2}i_s = \frac{I_{t2_s}}{I_{t1_s}} = \frac{I_{t2_p} * a_{c2}}{I_{t1_p} * a_{c1}} \quad (94)$$

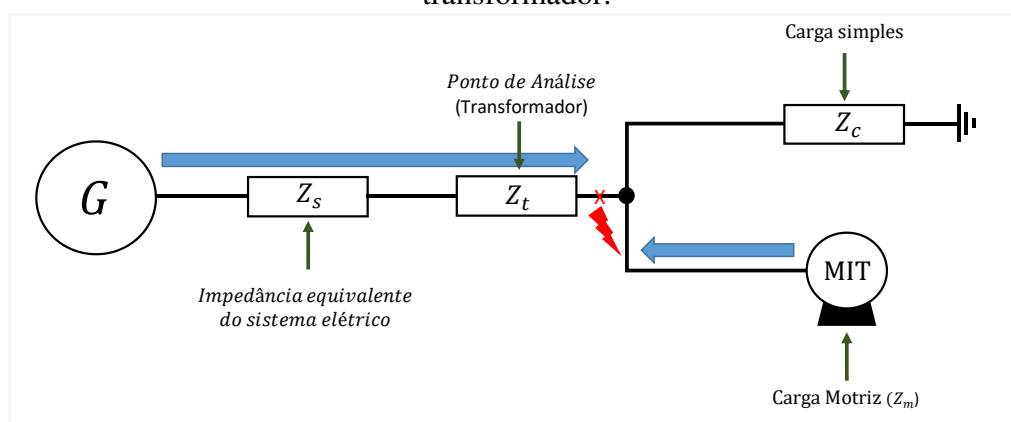
$$\mathbf{FD0}i_p = \frac{I_{t0_p}}{I_{t1_p}} \quad (95)$$

$$\mathbf{FD0}i_s = \frac{I_{t0_s}}{I_{t1_s}} \quad (96)$$

- **Evento ocorrido do lado secundário do transformador de conexão**

De forma similar ao tratamento realizado anteriormente, nesta seção são realizadas as tratativas matemáticas para o caso de um evento ocorrido no lado secundário. As contribuições de corrente dos agentes encontram-se indicadas na Figura 20. Observa-se que, nessa condição, a corrente fornecida pela rede de suprimento se estabelece pelo equivalente da rede em série com o transformador do PAC. Por outro lado, a contribuição do MIT é diretamente injetada no ponto de defeito.

Figura 20 – Contribuições de correntes para uma falta originária no secundário do transformador.

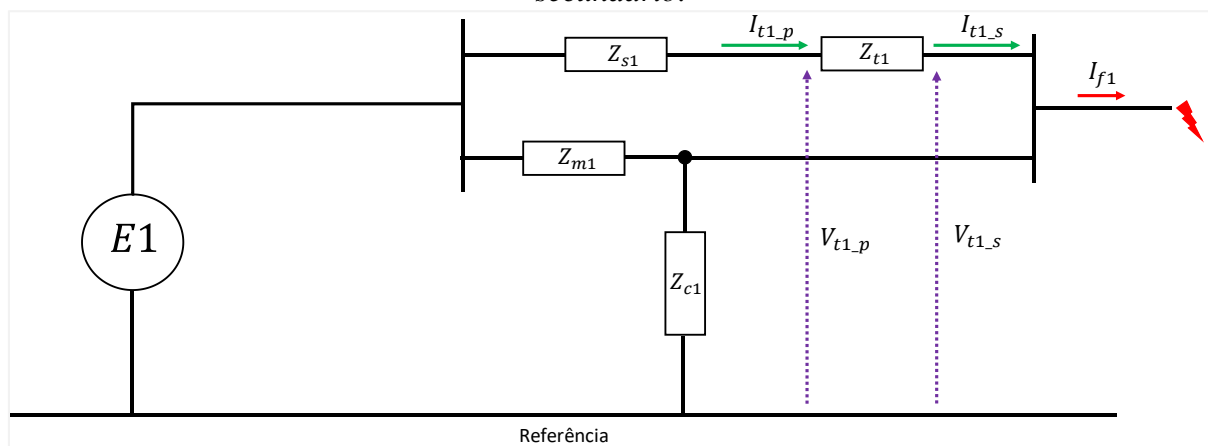


Fonte: O autor.

De forma análoga ao realizado anteriormente, foram também realizados os trabalhos analíticos de desenvolvimento das expressões que determinam os fatores de desequilíbrio de sequência negativa para as situações associadas com a ocorrência de faltas do lado secundário do transformador.

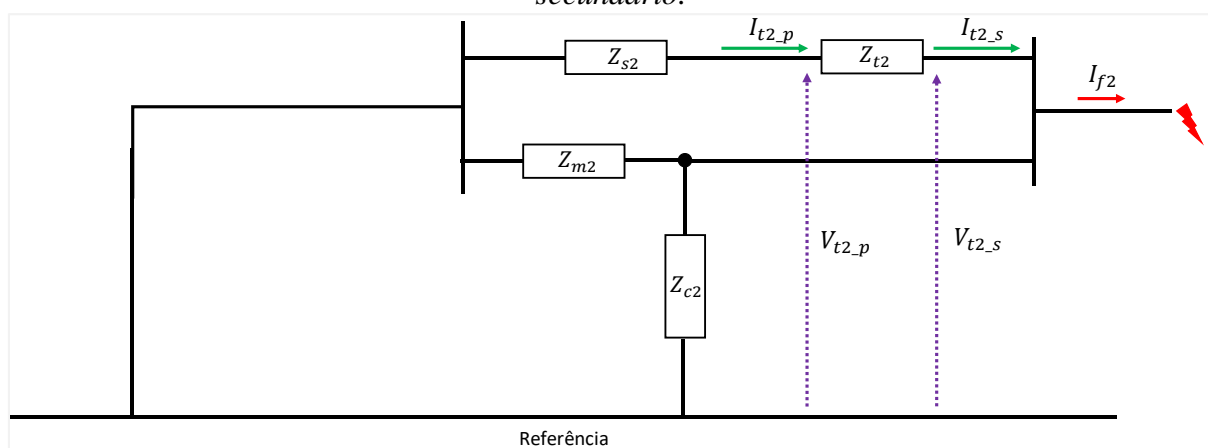
Os respectivos circuitos equivalente do arranjo topológico estabelecido na Figura 20, relativos às componentes de sequência positiva, negativa e zero, encontram-se apresentados, respectivamente, nas Figura 21 a Figura 23.

Figura 21 – Circuito equivalente de sequência positiva para uma *falta aplicada do lado secundário*.



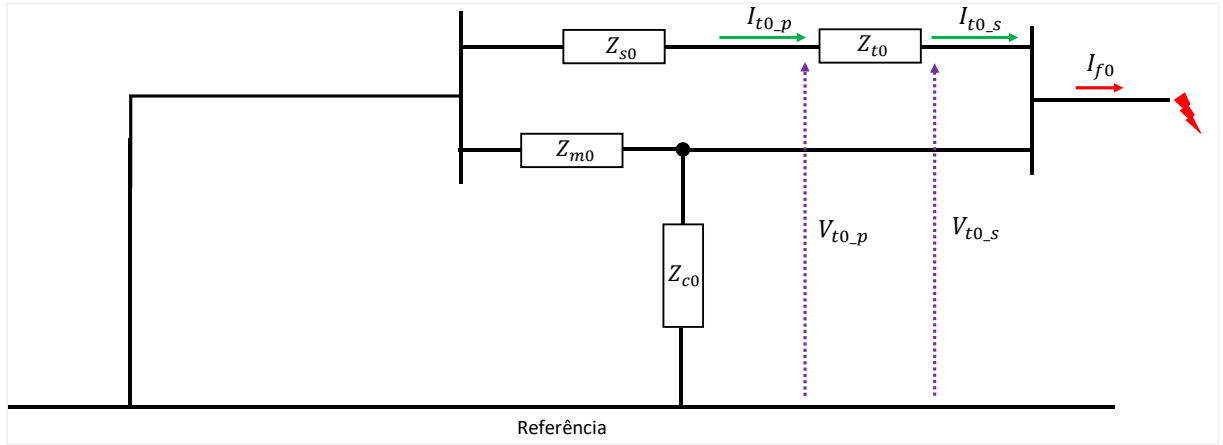
Fonte: O autor.

Figura 22 – Circuito equivalente de sequência negativa para uma *falta aplicada do lado secundário*.



Fonte: O autor.

Figura 23 – Circuito equivalente de sequência zero para uma *falta aplicada do lado secundário*.



Fonte: O autor.

As expressões que traduzem as grandezas de desempenho associadas com as tensões e corrente de sequência positiva, negativa e zero, para o caso da aplicação da falta do lado do secundário, são:

$$V_{t1_s} = V_{1_falta} \quad (97)$$

$$V_{t2_s} = V_{2_falta} \quad (98)$$

$$V_{t0_s} = V_{0_falta} \quad (99)$$

$$I_{t1_s} = \frac{E1 - V_{1_falta}}{Z_{s1} + Z_{t1}} \quad (100)$$

$$I_{t2_s} = I_{f2} * \left(\frac{(Z_{m2} // Z_{c2})}{Z_{s2} + Z_{t2} + (Z_{m2} // Z_{c2})} \right) \quad (101)$$

Para a conexão Yn-Yn:

$$I_{t0_s} = I_{f0} * \left(\frac{(Z_{m0} // Z_{c0})}{Z_{s0} + Z_{t0} + (Z_{m0} // Z_{c0})} \right) \quad (102)$$

Para as demais ligações:

$$I_{t0_s} = I_{f0} * \left(\frac{(Z_{m0} // Z_{c0})}{Z_{t0} + (Z_{m0} // Z_{c0})} \right) \quad (103)$$

Ou,

$$I_{t0_s} = 0 \quad (104)$$

Quanto as respectivas grandezas refletidas do lado primário:

$$I_{t1_p} = I_{t1_s} * a_{c1} \quad (105)$$

$$I_{t2_p} = I_{t2_s} * a_{c2} \quad (106)$$

$$I_{t0_p} = I_{t0_s} \quad (107)$$

$$V_{t1_p} = V_{1_falta} * a_{c1} + Z_{t1} * I_{t1_p} \quad (108)$$

$$V_{t2_p} = V_{2_falta} * a_{c2} + Z_{t2} * I_{t2_p} \quad (109)$$

Para a conexão Yn-Yn:

$$V_{t0_p} = V_{0_falta} + Z_{t0} * I_{t0_p} \quad (110)$$

E para as demais:

$$V_{t0_p} = 0 \quad (111)$$

Por fim, as expressões para os fatores de desequilíbrio para ambos os lados do transformador, são:

$$\begin{aligned} FD2v_p &= \frac{V_{t2_p}}{V_{t1_p}} = \frac{V_{2_falta} * a_{c2} + Z_{t2} * I_{t2_p}}{V_{1_falta} * a_{c1} + Z_{t1} * I_{t1_p}} = \\ &= \frac{V_{2_falta} * a_{c2} + Z_{t2} * \left[I_{f2} * a_{c2} * \left(\frac{(Z_{m2} // Z_{c2})}{Z_{s2} + Z_{t2} + (Z_{m2} // Z_{c2})} \right) \right]}{V_{1_falta} * a_{c1} + Z_{t1} * a_{c1} * \left(\frac{E1 - V_{1_falta}}{Z_{s1} + Z_{t1}} \right)} \end{aligned} \quad (112)$$

$$FD2v_s = \frac{V_{t2_s}}{V_{t1_s}} = \frac{V_{2_falta}}{V_{1_falta}} \quad (113)$$

Para a conexão Yn-Yn:

$$\begin{aligned} \mathbf{FD0}v_p &= \frac{V_{t0_p}}{V_{t1_p}} = \frac{V_{0_falta} + Z_{t0} * \mathbf{I}_{t0_p}}{V_{1_falta} + Z_{t1} * \mathbf{I}_{t1_p}} = \\ &= \frac{V_{0_falta} + Z_{t0} * \left[I_{f0} * \left(\frac{(Z_{m0} // Z_{c0})}{Z_{s0} + Z_{t0} + (Z_{m0} // Z_{c0})} \right) \right]}{V_{1_falta} + Z_{t1} * a_{c1} * \left(\frac{\mathbf{E1} - V_{1_falta}}{Z_{s1} + Z_{t1}} \right)} \end{aligned} \quad (114)$$

Para as demais ligações:

$$\mathbf{FD0}v_p = 0 \quad (115)$$

Para o secundário:

$$\mathbf{FD0}v_s = \frac{V_{t0_s}}{V_{t1_s}} = \frac{V_{0_falta}}{V_{1_falta}} \quad (116)$$

Quanto aos fatores de desequilíbrio de corrente:

$$\mathbf{FD2}i_p = \frac{I_{t2_p}}{I_{t1_p}} \quad (117)$$

$$\mathbf{FD2}i_s = \frac{I_{t2_s}}{I_{t1_s}} = \frac{I_{t2_p} * a_{c2}}{I_{t1_p} * a_{c1}} \quad (118)$$

$$\mathbf{FD0}i_p = \frac{I_{t0_p}}{I_{t1_p}} \quad (119)$$

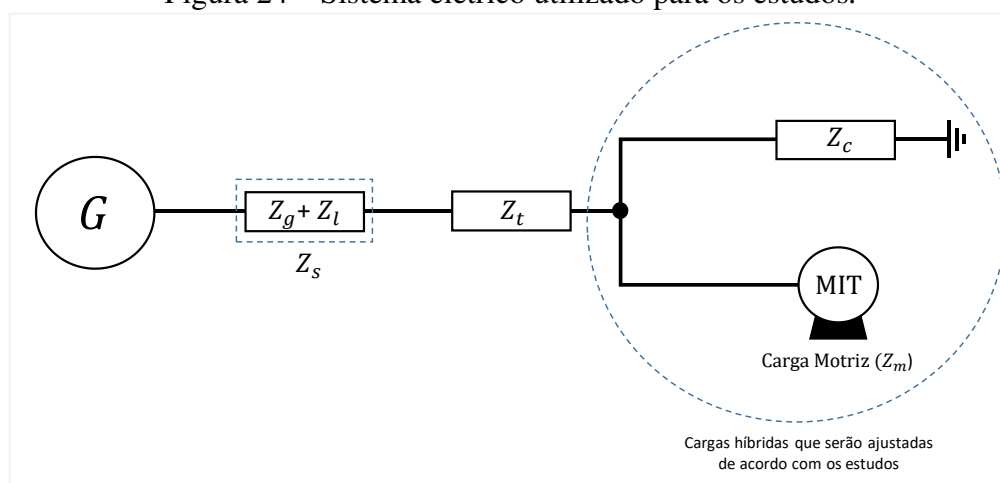
$$\mathbf{FD0}i_s = \frac{I_{t0_s}}{I_{t1_s}} \quad (120)$$

3.3 Desempenho Computacional do Processo de Transferência dos Fatores de Desequilíbrios com Cargas Híbridas

Uma vez estabelecidos os equacionamentos associados com a aplicação do método para identificação das VTCDs em sistemas constituídos por cargas híbridas, procede-se, a seguir, a uma análise de desempenho do processo utilizando recursos computacionais.

O sistema elétrico base utilizado para as investigações encontra-se indicado na Figura 24.

Figura 24 – Sistema elétrico utilizado para os estudos.



Fonte: O autor.

No que tange aos parâmetros representativos dos componentes que perfazem o arranjo, estes são indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros equivalentes do sistema elétrico à montante da carga demanda.

Sistema supridor (agente 1)
Fonte de suprimento equivalente: $Z_{g1} = j0,3 pu$; $Z_{g2} = j0,2 pu$; $Z_{g0} = j0,05 pu$.
Linha de Transmissão: $Z_{l1} = j0,15 pu$; $Z_{l2} = j0,15 pu$; $Z_{l0} = j0,3 pu$.
Transformador de conexão
$Z_{t1} = Z_{t2} = Z_{t0} = j0,12 pu$

Fonte: O autor.

Quanto a modelagem do motor, para fins dos estudos conduzidos nesta etapa dos trabalhos, estes são representados de forma simplificada, utilizando apenas suas impedâncias equivalentes de sequência negativa. Posteriormente, as máquinas motrizes aqui referidas serão consideradas através de seus modelos dinâmicos completos, conforme recursos disponibilizados pelo simulador em uso.

(a) Sistema com 100% de carga motriz

A Tabela 6 apresenta os parâmetros representativos da situação em que 100% da carga encontra-se modelada por motores de indução, tratados, simplificadamente, na forma de suas impedâncias de sequência.

Tabela 6 – Parâmetros equivalentes da carga motriz correspondente a 100% da demanda.

Carga motriz (cliente)
$Z_{m1} = j0,4 \text{ pu}; Z_{m2} = 0,2 * Z_{m1}; Z_{m0} = j0,04 \text{ pu}$

Fonte: O autor.

Uma vez definido o sistema e sua representação, os estudos realizados compreendem a imposição de VTCDs em ambos os lados do transformador, as quais estão atreladas com a aplicação de um curto circuito fase-terra dos lados primário e secundário. Para a conexão Yn-Yn do transformador de interligação, obteve-se, nos termos postos, os resultados indicados na Tabela 7 e Tabela 8. Estes representam, respectivamente, os valores obtidos para os fatores de desequilíbrio das tensões e correntes, de sequência negativa e zero, dos lados primário e secundário do transformador de conexão, quando da ocorrência de uma VTCD manifestada do lado primário do transformador.

Tabela 7 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de **tensão** – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do **primário** do transformador.

Conexão do Transformador	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD0v_p$	$FD0v_s$
Yn-Yn	0,2361	0,1165	0,7804	0,6945

Fonte: O autor.

Tabela 8 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de **corrente** – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do **primário** do transformador.

Conexão do Transformador	$FD2i_p$	$FD2i_s$	$FD0i_p$	$FD0i_s$
Yn-Yn	1,5824	1,5824	0	0

Fonte: O autor.

Em se tratando de uma VTCD advinda de uma falta fase-terra imposta do lado secundário, na Tabela 9 e Tabela 10 tem-se, respectivamente, os resultados para os fatores de desequilíbrio das tensões e correntes, de sequência negativa e zero, dos lados primário e secundário do transformador.

Tabela 9 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de **tensão** – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do **secundário** do transformador.

Conexão do Transformador	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD0v_p$	$FD0v_s$
Yn-Yn	0,1092	0,1613	0,6506	0,9612

Fonte: O autor.

Tabela 10 – Fatores de desequilíbrio (negativo e zero) de **corrente** – VTCD associada com uma falta Fase-Terra do lado do **secundário** do transformador.

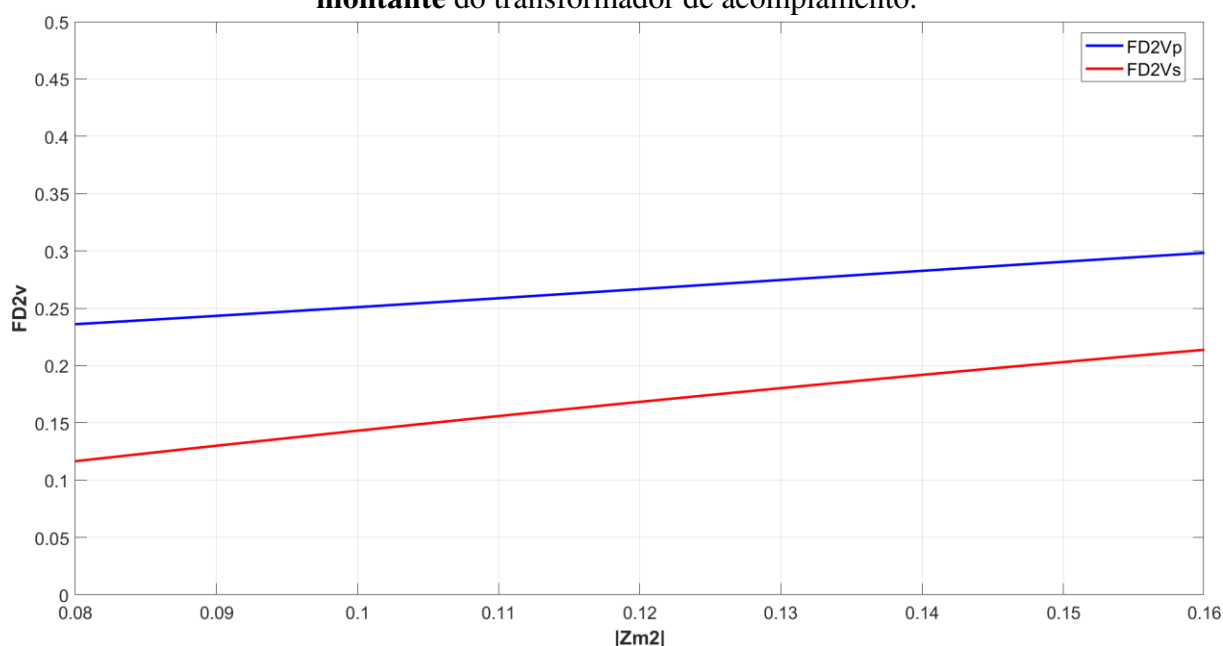
Conexão do Transformador	$FD2i_p$	$FD2i_s$	$FD0i_p$	$FD0i_s$
Yn-Yn	0,4069	0,4069	2,4250	2,4250

Fonte: O autor.

De acordo com os resultados obtidos, muito embora a igualdade entre os valores dos fatores de desequilíbrio, antes observada para o caso de cargas passivas, não seja mais verificada, o fato é que, o desempenho obtido evidencia que: “A origem da VTCD corresponde ao lado em que se registra o maior valor do fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa (FD2v)”.

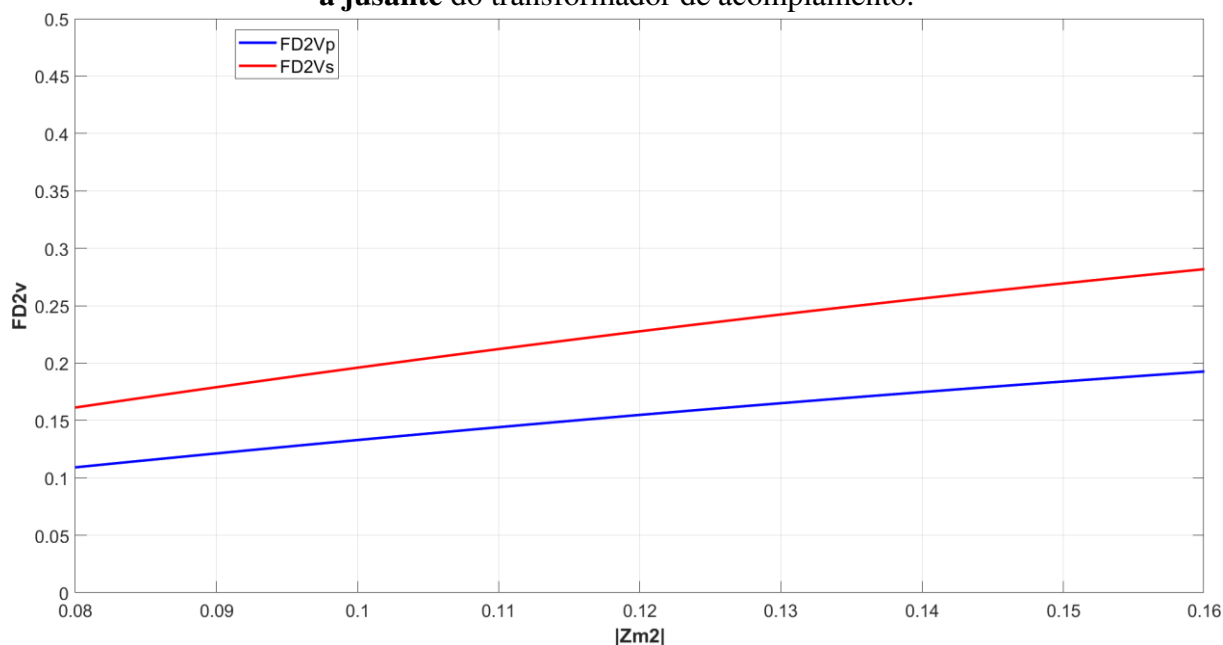
Complementando a análise do desempenho físico acima feita, uma questão adicional a ser ressaltada refere-se ao valor relativo da impedância de sequência negativa do motor em relação a correspondente impedância de sequência positiva. De fato, a relação acima empregada foi; $Z_{m1} = j0,4 pu$; $Z_{m2} = j0,08 pu$. Isto equivale a um percentual de 20% para Z-/Z+. Ainda, de acordo com [43], este número varia tipicamente entre 20 a 40% da impedância de sequência positiva. Procurando correlacionar os efeitos que diferentes percentuais típicos entre as grandezas equivalentes aqui tratadas com os resultados do processo de análise, as Figura 25 e Figura 26 mostram, em azul, os valores dos FD2v obtidos no primário, enquanto que, em vermelho as grandezas do secundário, quando de uma VTCD produzida do lado primário e secundário, respectivamente.

Figura 25 – Correlação entre os fatores de desequilíbrio de tensão de sequência negativa para distintas relações $Z-/Z+$ - domínio numérico sempre do lado primário para VTCD ocorrida à **montante** do transformador de acomplamento.



Fonte: O autor.

Figura 26 – Correlação entre os fatores de desequilíbrio de tensão de sequência negativa para distintas relações $Z-/Z+$ - domínio numérico sempre do lado secundário para VTCD ocorrida **à jusante** do transformador de acomplamento.



Fonte: O autor.

Por fim, fica mais uma vez constatado que a correlação entre os valores dos fatores de desequilíbrio permanece nos termos anteriormente verificados, ou seja, embora haja alterações

dos fatores de desequilíbrio de um e outro lado do transformador, o domínio do valor para o lado da ocorrência da VTCD permanece.

Feita a análise para a situação correspondente a 100% de carga motriz, é feita, na sequência, uma investigação sob condições tais que o consumo se apresenta formado por uma composição híbrida, com diferentes níveis de compartilhamento dos carregamentos que definem a demanda do sistema.

(b) Carga híbrida: impedância constante e motor de indução

Seguindo a mesma estratégia anterior, os estudos aqui contemplados abrangem a ocorrência do evento causador da VTCD em ambos os lados do transformador de acoplamento.

- **Falta no primário**

Em consonância com a topologia e parametrização do sistema empregado anteriormente, para esta etapa dos trabalhos as simulações foram conduzidas de acordo com as informações contidas na Tabela 11. Nesta constata-se como diferença em relação à anterior, apenas a distribuição das cargas, antes 100% motriz, agora para uma composição híbrida. Vale ressaltar que a modelagem da carga motriz continua na forma de sua correspondente impedância equivalente de sequência negativa.

Tabela 11 – Parâmetros equivalentes do sistema elétrico – carga híbrida.

Sistema supridor
Gerador principal: $Z_{g1} = j0,3 pu$; $Z_{g2} = j0,2 pu$; $Z_{g0} = j0,05 pu$.
Linha de Transmissão: $Z_{l1} = j0,15 pu$; $Z_{l2} = j0,15 pu$; $Z_{l0} = j0,3 pu$.
Transformador de conexão
$Z_{t1} = Z_{t2} = Z_{t0} = j0,12 pu$
Carga motriz (cliente)
$Z_{m1} = j5,0 pu$; $Z_{m2} = 0,2 * Z_{m1}$; $Z_{m0} = j0,04 pu$
Carga passiva (cliente)
$Z_{c1} = 4,6 + j1,96 pu$; $Z_{c2} = Z_{c1}$; $Z_{c0} = 0,08 pu$ *(Módulo 5 e fp 0,92)

Fonte: O autor.

Iniciando, são feitos estudos considerando-se que a totalidade das cargas é constituída por componentes passivos. Nestas condições, a Tabela 12 indica os valores dos fatores de

desequilíbrio de tensão de sequência negativa para ambos os lados do transformador de conexão. Como esperado, os indicadores de desequilíbrio se mostram muito próximos em seus valores, os quais seriam, teoricamente, iguais.

Tabela 12 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do primário – 100% carga passiva

Conexão do Transformador	$FD2v_p$	$FD2v_s$
Yn-Yn	0,7705	0,7569

Fonte: O autor.

Na sequência procede-se, novamente, a uma reavaliação do desempenho do processo diante da presença de uma carga totalmente constituída por máquinas motrizes. Os resultados são mostrados na Tabela 13. Como já constatado, os resultados numéricos apontam para as mesmas constatações já observadas anteriormente, que concluiu que a igualdade entre os fatores de desequilíbrio não mais ocorre, mas sim, que do lado onde se manifesta o evento indicava um valor superior ao do lado secundário.

Tabela 13 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do primário – 100% carga motriz.

Conexão do Transformador	$FD2v_p$	$FD2v_s$
Yn-Yn	0,4324	0,3801

Fonte: O autor.

Até este ponto, conforme apresentado nas tabelas anteriores, foram analisados os resultados considerando que 100% de carga fosse exclusivamente passiva ou composta por carga motriz. Assim, estudos complementares foram feitos no sentido de avaliar o desempenho do método diante de diferentes níveis de composição das cargas. As situações analisadas estão apresentadas na Tabela 14, a qual destaca que o campo de variação empregado para os percentuais da participação de cada uma das cargas compreendeu uma varredura de 20% a 80%, ou seja, sendo para uma dada situação a motriz correspondente a 40%, a associada a impedância constante foi de 60%, e assim por diante. Destaca-se que a adoção de $Z_m=1$ pu refere-se a 80% de motores para a composição da demanda total, enquanto que $Z_m=4$ determina que os motores equivalentes correspondem a 20% do consumo total. É importante destacar que a referida tabela apresenta apenas os valores inteiros, contudo, para a construção do gráfico mostrado na Figura 27, foram utilizados intervalos de 0,1 pu nas diferentes variações de carga. Na figura, o perfil em azul representa o fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa do lado primário e

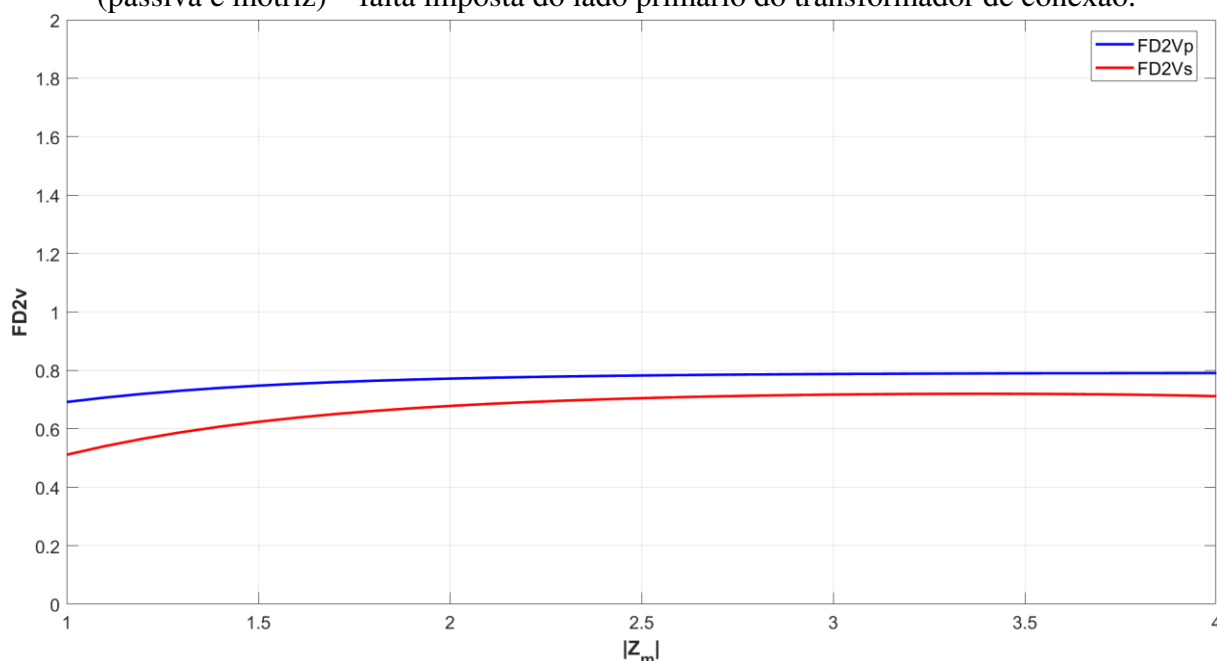
em vermelho do lado secundário. Mais uma vez, os eventos responsáveis pelas VTCDs foram os mesmos anteriormente utilizados nos estudos conduzidos para os estudos identificados no item (a).

Tabela 14 – *Variações de carga para análise.*

1ª situação	$ Z_{m1} = 1 \text{ pu}$	$ Z_{c1} = 4 \text{ pu}$
2ª situação	$ Z_{m1} = 2 \text{ pu}$	$ Z_{c1} = 3 \text{ pu}$
3ª situação	$ Z_{m1} = 3 \text{ pu}$	$ Z_{c1} = 2 \text{ pu}$
4ª situação	$ Z_{m1} = 4 \text{ pu}$	$ Z_{c1} = 1 \text{ pu}$

Fonte: O autor.

Figura 27 – Fatores de desequilíbrio para diferentes composições percentuais da carga híbrida (passiva e motriz) – falta imposta do lado primário do transformador de conexão.



Fonte: O autor.

Como pode ser observado, para todas as condições analisadas, o fator de desequilíbrio de sequência negativa da tensão do primário ($FD2V_p$ mostrado na curva em azul) apresentou valores superiores aos observados no secundário (curva em vermelho), indicando, mais uma vez, que o evento responsável pela VTCD teve origem no lado primário do transformador

- **Falta no secundário**

Utilizando os mesmos parâmetros representativos dos componentes do sistema elétrico estabelecido para fins do processo avaliativo deste capítulo, tal como foi realizado para o caso

de eventos advindos do primário, num primeiro momento, as expressões foram aplicadas para situações tais que a carga se apresenta totalmente constituída por componentes passivos. Assim procedendo foram obtidos os valores dos indicadores de desequilíbrio de sequência negativa indicados na Tabela 15. Estes evidenciam, como já se havia constatado, que o valor da grandeza em foco, verificada do lado secundário do transformador é distinta, e também, superior àquele encontrado do lado primário, ratificando, assim, o critério da identificação já explorado nesta tese para a situação correspondente a 100% da carga atrelada com impedância constante.

Tabela 15 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do secundário – 100% carga passiva

Conexão do Transformador	$FD2v_p$	$FD2v_s$
Yn-Yn	0,5687	0,9445

Fonte: O autor.

Também, empregando-se, alternativamente, uma situação tal que a totalidade da carga se apresenta como constituída por motores de indução, os resultados assim obtidos correspondem aos apresentados na Tabela 16. Observa-se que os valores do fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa (FD2v), como havia sido concluído nos desenvolvimentos realizados no início do capítulo, são maiores do lado do secundário.

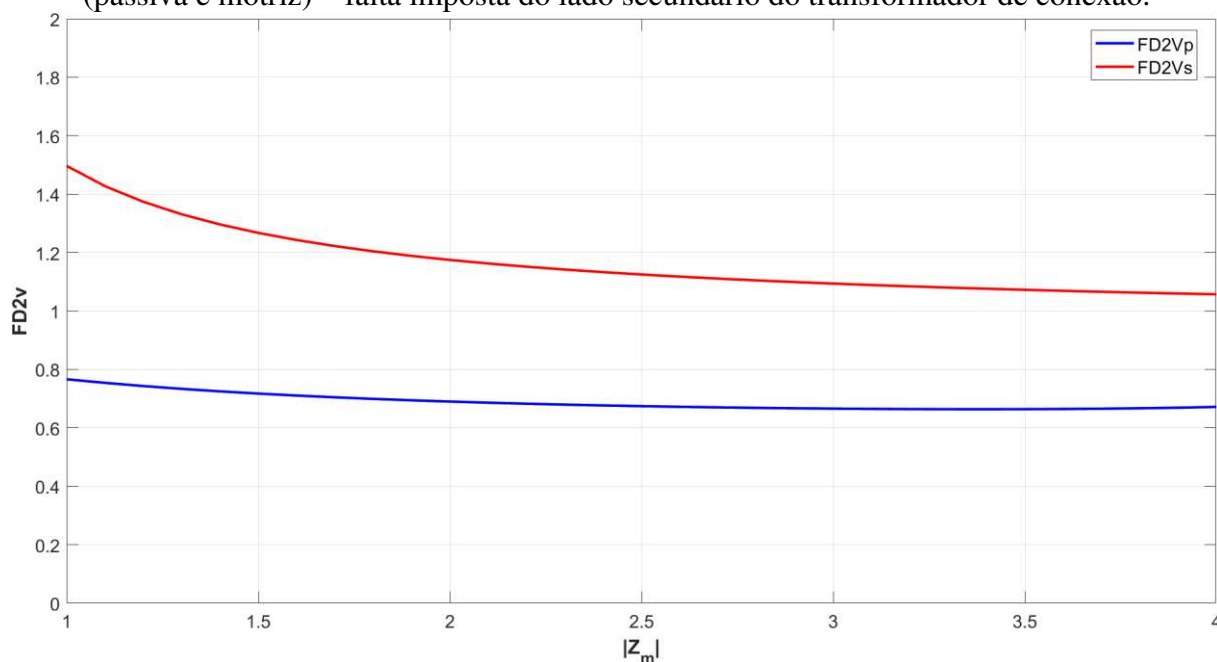
Tabela 16 – FD2v para uma falta fase-terra aplicada no lado do secundário – 100% carga motriz

Conexão do Transformador	$FD2v_p$	$FD2v_s$
Yn-Yn	0,2653	0,4049

Fonte: O autor.

Feita a validação das expressões para as duas condições extremas acima, procede-se, na sequência, a uma varredura da parcela de participação das cargas passivas e motrizes na composição da demanda total de 100%. Variando-se as parcelas de uma e outra, nos mesmos termos anteriormente empregados, obteve-se os perfis para os fatores de desequilíbrio mostrados na Figura 28. Como pode ser verificado, os maiores valores para estas grandezas ocorrem do lado secundário (curva em vermelho) do transformador, observando-se, como anteriormente, que a proporção muda com a alteração da composição porcentual dos dois tipos de cargas presentes na instalação.

Figura 28 – Fatores de desequilíbrio para diferentes composições percentuais da carga híbrida (passiva e motriz) – falta imposta do lado secundário do transformador de conexão.



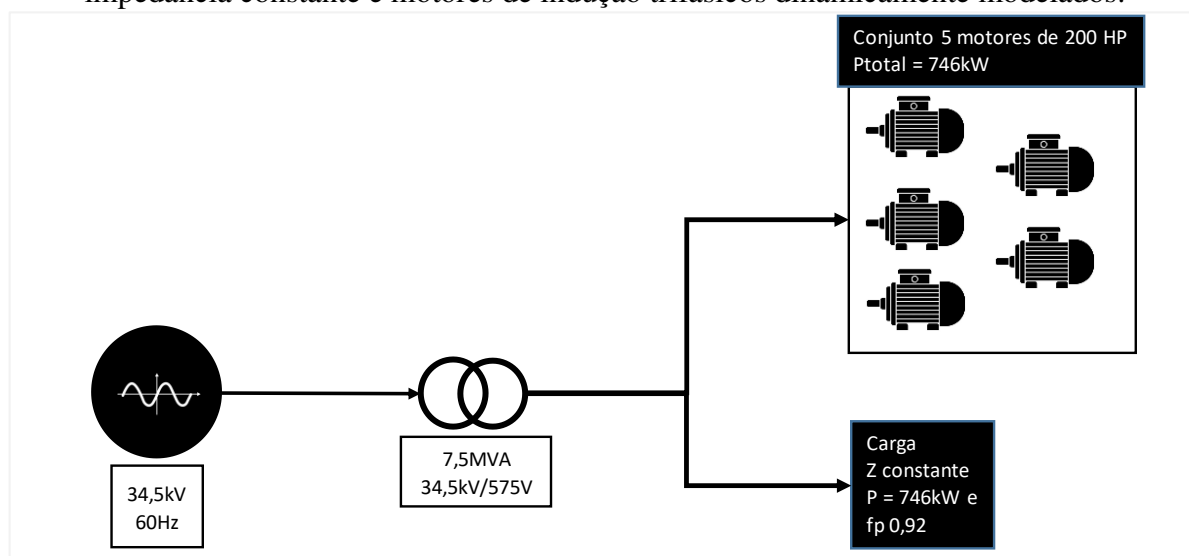
Fonte: O autor.

3.4 Estudos Envolvendo a Impedância Constante e Motor de Indução Representado por Modelos Dinâmicos no MATLAB/Simulink

Objetivando uma maior identidade com as situações reais quanto ao comportamento das cargas motrizes, as avaliações aqui realizadas avançam no sentido de promover um estudo de desempenho da instalação diante da modelagem dos motores através de modelos dinâmicos de motores disponibilizados no software MATLAB/Simulink. Assim, os estudos aqui feitos complementam os anteriores, os quais contemplaram a presença do motor de indução apenas pela utilização de suas impedâncias equivalentes de sequência positiva e negativa.

A Figura 29 ilustra a estrutura do sistema elétrico utilizado nesta etapa, a qual visa a modelagem do motor de forma mais completa.

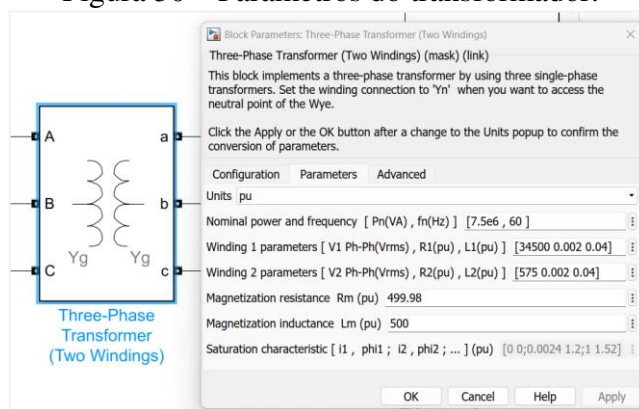
Figura 29 – Rede elétrica empregada para os estudos analíticos – carga híbrida formada por impedância constante e motores de indução trifásicos dinamicamente modelados.



Fonte: O autor.

Na Figura 30 são indicados os parâmetros representativos do transformador que constitui o sistema sob análise.

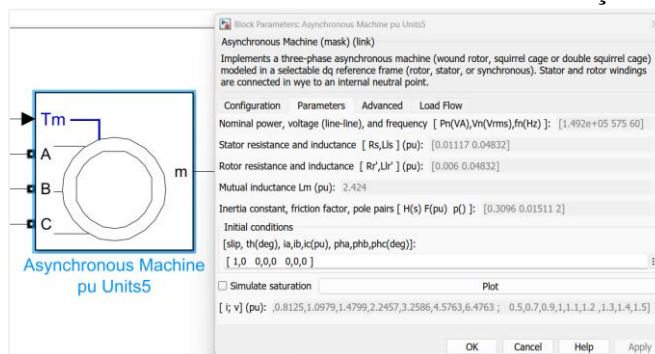
Figura 30 – Parâmetros do transformador.



Fonte: O autor.

Quanto as cargas motrizes, cada um dos 5 motores empregados possui os parâmetros representativos mostrados na Figura 31.

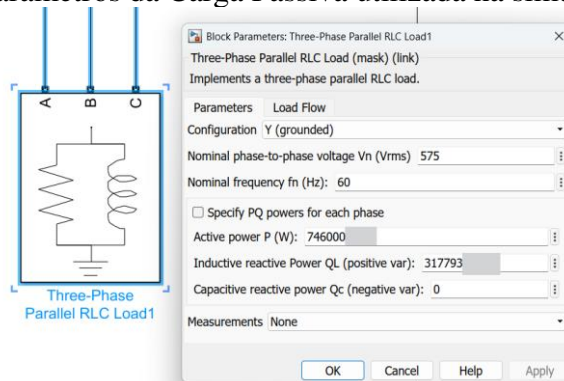
Figura 31 – Parâmetros do MIT utilizado na simulação.



Fonte: O autor.

Em se tratando da parcela da composição híbrida da carga, as parcelas de distribuição da demanda entre as duas modelagens foram variadas, mantida a potência máxima. Na Figura 32 é indicada a representação da parcela passiva através de componentes R e L.

Figura 32 – Parâmetros da Carga Passiva utilizada na simulação.



Fonte: O autor.

Objetivando uma varredura das distribuições das parcelas ativa e passiva das cargas, os estudos de desempenho computacional da instalação contemplaram alterações do percentual de participação do consumo motriz e impedância constante em incrementos de 20%, conforme indicado na Tabela 17. Nesta constata-se que, pode ser constatado a constância da demanda total, enquanto que o percentual do consumo total é dividido nos termos impostos.

Na mesma tabela são mostrados os resultados para os fatores de desequilíbrios obtidos para a instalação. Como se observa, a tendência da correlação numérica entre os fatores de desequilíbrio de sequência negativa foi mantida. Mais uma vez, a diferença entre os seus valores determinados entre o primário e secundário aumentam com uma maior participação das cargas motrizes. Destaque é feito ao fato que, os estudos aqui relatados compreendem não apenas a conexão Yn-Yn, mas também a Δ -Yn. Novamente, os indicativos já estabelecidos como

princípios para a identificação da origem do distúrbio, se mostram consistentes para a nova conexão estabelecida para o transformador.

Tabela 17 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma **falta fase-terra** ocorrida no **primário** do transformador de conexão.

Tipo de ligação	MIT	Impedância constante	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD0v_p$	$FD0v_s$
Yn-Yn	0%	100%	33,69%	33,69%	33,69%	33,69%
	20%	80%	33,36%	32,86%	33,85%	33,90%
	40%	60%	33,05%	32,07%	34,01%	34,10%
	60%	40%	32,75%	31,33%	34,17%	34,30%
	80%	20%	32,46%	30,61%	34,32%	34,49%
	100%	0%	32,19%	29,93%	34,46%	34,67%
D-Yn	0%	100%	33,70%	33,70%	33,85%	0,00%
	20%	80%	33,37%	32,87%	33,98%	0,00%
	40%	60%	33,05%	32,08%	34,11%	0,00%
	60%	40%	32,75%	31,33%	34,24%	0,00%
	80%	20%	32,46%	30,61%	34,35%	0,00%
	100%	0%	32,19%	29,93%	34,46%	0,00%

Fonte: O autor.

Seguindo a mesma estratégia, na Tabela 18 tem-se os resultados correspondentes quando da origem da VTCD do lado secundário do transformador. De um modo geral, foram mantidas as constatações, com destaque ao fato que as diferenças entre os valores, que apontam para a identificação do lado causador se mostram mais pronunciadas, contribuindo, assim para maior assertividade da análise. Também, a alteração da conexão para Δ -Yn não alterou o comportamento físico da análise.

Tabela 18 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma **falta fase-terra** ocorrida no **secundário** do transformador de conexão.

Tipo de ligação	MIT	Impedância constante	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD0v_p$	$FD0v_s$
Yn-Yn	0%	100%	15,51%	37,48%	15,51%	37,48%
	20%	80%	15,18%	36,75%	15,66%	37,91%
	40%	60%	14,87%	36,04%	15,80%	38,32%
	60%	40%	14,56%	35,36%	15,94%	38,71%
	80%	20%	14,27%	34,70%	16,08%	39,10%
	100%	0%	13,99%	34,06%	16,21%	39,47%
D-Yn	0%	100%	17,96%	43,91%	0,01%	22,91%
	20%	80%	17,59%	43,08%	0,00%	23,17%
	40%	60%	17,24%	42,28%	0,01%	23,41%
	60%	40%	16,90%	41,51%	0,02%	23,65%
	80%	20%	16,57%	40,75%	0,00%	23,88%
	100%	0%	16,25%	40,02%	0,01%	24,10%

Fonte: O autor.

Em consonância com as condições operacionais postas, foram então conduzidas as simulações no sentido de investigar o comportamento do método de análise diante de um evento associado com um curto-circuito fase-fase, ocorrido no sistema sob análise. Dentro do exposto, a Tabela 19 mostra os resultados para o evento manifestado do lado primário do transformador. Como indicado, as conclusões já estabelecidas são repetidas para a situação em que 100% do consumo é representado por uma impedância constante. De fato, para esta situação, os $FD2v$ em ambos os lados são iguais. Por outro lado, diante da presença dos motores de indução, o $FD2v$ vai discretamente diferindo, com um valor maior do lado em que ocorre o evento. Os critérios se mantêm, quer para o transformador Yn-Yn, como também para a conexão Δ -Yn.

Tabela 19 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma **falta fase-fase** ocorrida no **primário** do transformador de conexão.

Tipo de ligação	MIT	Impedância constante	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD0v_p$	$FD0v_s$
Yn-Yn	0%	100%	100,00%	100,00%	0%	0%
	20%	80%	100,00%	98,92%	0%	0%
	40%	60%	100,00%	97,92%	0%	0%
	60%	40%	100,00%	97,02%	0%	0%
	80%	20%	100,00%	96,20%	0%	0%
	100%	0%	100,00%	95,46%	0%	0%
D-Yn	0%	100%	100,00%	100,00%	0%	0%
	20%	80%	100,00%	98,92%	0%	0%
	40%	60%	100,00%	97,92%	0%	0%
	60%	40%	100,00%	97,02%	0%	0%
	80%	20%	100,00%	96,20%	0%	0%
	100%	0%	100,00%	95,46%	0%	0%

Fonte: O autor.

Ainda associado ao mesmo tipo de falta, todavia, manifestada do lado secundário, a Tabela 20 apresenta os valores obtidos para os fatores de desequilíbrio, de um para o outro lado do transformador. As diferenças entre os valores dos fatores de desequilíbrio, desta feita, se apresentam mais acentuados, sendo, como já verificado, o maior valor do $FD2v$ manifestado do lado do secundário, indicando, assim, que este é o lado de ocorrência do distúrbio ocorrido.

Tabela 20 – Resultados para os Fatores de Desequilíbrio (Negativo e Zero) - Influência da distribuição da demanda total entre Z constante e Motor equivalente – VTCD oriunda de uma falta fase-fase ocorrida no **secundário** do transformador de conexão.

Tipo de ligação	MIT	Impedância constante	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD0v_p$	$FD0v_s$
Yn-Yn	0 %	100 %	31,50%	99,81%	0%	0%
	20 %	80 %	31,08%	99,81%	0%	0%
	40 %	60 %	30,66%	99,81%	0%	0%
	60 %	40 %	30,22%	99,81%	0%	0%
	80 %	20 %	29,77%	99,80%	0%	0%
	100 %	0 %	29,32%	99,80%	0%	0%
D-Yn	0 %	100 %	31,50%	99,81%	0%	0%
	20 %	80 %	31,08%	99,81%	0%	0%
	40 %	60 %	30,66%	99,81%	0%	0%
	60 %	40 %	30,22%	99,81%	0%	0%
	80 %	20 %	29,78%	99,80%	0%	0%
	100 %	0 %	29,32%	99,80%	0%	0%

Fonte: O autor.

De uma forma geral, as simulações feitas com o modelo dinâmico dos motores de indução indicaram que:

- Os resultados obtidos para os estudos de desempenho da metodologia proposta para a identificação da origem das VTCDs, diante da ocorrência dos fenômenos expostos, e considerando uma composição híbrida envolvendo cargas passivas e motrizes, indicaram solidez para o processo de análise utilizando o $FD2v$, se mostrando eficaz;
- Em se tratando dos indicadores de sequência zero, quando há eventos envolvendo o terra, para cargas constituídas apenas por componentes passivos, estes fatores podem auxiliar a análise, oferecendo um suporte para melhoria da assertividade da identificação da origem do fenômeno. Tomando por base o emprego de um transformador Yn–Yn, para o caso da VTCD advinda do seu lado primário, os valores de $FD0v$ se mostram semelhantes em ambos os lados do transformador de conexão. Contudo, se a origem é no secundário, os $FD0v$ tornam-se distintos entre os dois lados. Por outro lado, diante da presença de cargas motrizes na composição da carga, para o mesmo tipo de conexão do transformador acima (Yn–Yn), observa-se que, para uma falta no primário, os $FD0v$ medidos em ambos os lados são próximos, podendo, em alguns casos, apresentar valores significativamente maiores no lado do primário. Já para a ocorrência de um evento do lado secundário, o $FD0v$ medido neste ponto físico da instalação, se apresenta substancialmente superior ao observado no lado do primário;

- Para os demais tipos de conexão dos transformadores (D-Yn), os valores dos fatores de desequilíbrio de sequência zero assumem valores diferentes de zero apenas no lado em que ocorre a falta, sendo nulo no lado oposto;
- Assim, somado a correlação entre os fatores de desequilíbrio de sequência negativa, uma análise dos respectivos indicadores de sequência zero (FD0v), ainda se apresenta como um indicador que oferece um complemento para melhoria da segurança do método de análise.

3.5 Considerações Finais

O presente capítulo teve como propósito investigar, de forma mais detalhada, questões associadas à composição das cargas que integram o sistema elétrico, e seus efeitos sobre a metodologia focada nesta tese visando a identificação da origem das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs). Inicialmente, foram desenvolvidas expressões matemáticas completas, estabelecendo as bases analíticas da metodologia proposta, as quais passaram a contemplar a composição híbrida das cargas, englobando unidades passivas e motrizes. De forma análoga, embora não tratado diretamente neste trabalho, destaca-se que as expressões desenvolvidas para o MIT também podem se aplicar para geração diretamente conectada ao lado do secundário do transformador de análise. Assim, os desenvolvimentos de cunho analítico conferem maior flexibilidade ao processo de análise e amplia o potencial de aplicação da ferramenta desenvolvida aos propósitos da pesquisa, tornando as expressões para a determinação dos fatores de desequilíbrio mais aderentes à realidade das instalações elétricas em campo.

No contexto analítico, os resultados indicaram que, quando o consumo é representado integralmente por uma impedância constante, os valores do Fator de Desequilíbrio de Tensão de Sequência Negativa (FD2v) se mantêm idênticos em ambos os lados do transformador, quando os eventos são oriundos do agente supridor, conforme já verificado nos estudos computacionais. Por outro lado, quando a VTCD tem origem no secundário, os valores dos fatores de desequilíbrio se apresentam distintos entre os lados do transformador.

Na sequência, foram consideradas situações nas quais a composição das cargas inclui cargas motrizes conectadas do lado secundário do transformador de interligação entre os agentes. Nessa condição, ainda sob o ponto de vista analítico, observou-se que os fatores de desequilíbrio de sequência negativa passaram a apresentar valores distintos, com

predominância numérica para aquele determinado do lado em que se manifesta o evento causador da VTCD. Complementarmente, a análise do fator de desequilíbrio de sequência zero revelou-se como um indicador adicional que pode auxiliar a análise, sobretudo nos casos de distúrbios associados a faltas envolvendo a terra, cuja resposta está diretamente relacionada ao tipo de conexão do transformador.

Prosseguindo, estudos de desempenho computacional foram conduzidos utilizando o ambiente MATLAB/Simulink. Para tal, foi estabelecido um sistema elétrico radial simplificado, ao qual foram impostas diversas situações operativas relacionadas à composição híbrida das cargas. Esse procedimento possibilitou a avaliação do desempenho da metodologia para diferentes percentuais de compartilhamento das parcelas de consumo representadas por impedância constante e por motores. Os resultados ratificaram a correlação entre os fatores de desequilíbrio de sequência negativa já apontada analiticamente, contando, quando necessário, com a ajuda dos indicadores de desequilíbrio de sequência zero.

Sintetizando o desempenho físico do processo de análise em pauta, muito embora a simplicidade do arranjo físico empregado, foi possível verificar que, quando o evento responsável pela VTCD ocorre no primário do transformador de conexão, o FD2v medido no primário é igual ou superior ao valor obtido no secundário. A igualdade ocorre quando a carga do cliente é exclusivamente passiva. Também, ficou evidenciado que, as diferenças entre os fatores de desequilíbrio aumentam à medida que cresce a participação das cargas motrizes na composição da demanda. De modo inverso, quando a origem do distúrbio se encontra no secundário do transformador, o comportamento dos FD2v também se inverte, sendo a maior magnitude observada no lado secundário.

Por fim, destaca-se que a utilização do FD2v pode ser interpretada como uma grandeza de análise recomendada do ponto de vista prático, uma vez que seus valores podem ser obtidos com facilidade em campo, contando com medições conduzidas para as tensões de linha, grandezas estas usualmente disponibilizadas pelos medidores já existentes nos sistemas elétricos. E ainda, os estudos apresentados neste capítulo forneceram subsídios teóricos e computacionais sólidos, evidenciando que a metodologia proposta se mostra robusta e aplicável sob diferentes cenários de carga.

4 DESEMPENHO COMPUTACIONAL DA METODOLOGIA E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA ESTRATÉGIA DE ANÁLISE

4.1 Considerações Iniciais

Como visto, os desenvolvimentos feitos anteriormente evidenciaram as bases de uma estratégia para a identificação da origem do fenômeno focado nesta pesquisa, as quais, essencialmente, se apoiam no processo comparativo da transferência dos fatores de desequilíbrio das tensões no primário e secundário do transformador de conexão entre os agentes. Todavia, as avaliações da efetividade do processo de identificação foram feitas, tendo sob o ponto de vista conceitual, como também computacional, através de arranjos elétricos com uma constituição topológica bastante simplificada visto os arranjos radiais empregados.

Objetivando a aplicação do método para instalações que se apresentam com configurações mais próprias aos sistemas elétricos reais, neste capítulo são realizados estudos complementares envolvendo 4 (quatro) diferentes configurações topológicas, cada qual com suas particularidades e identificação com situações passíveis de ocorrência em campo. Para cada uma delas são impostos eventos associados com diferentes tipos de VTCDs advindos de ocorrências nas redes elétricas à montante e à jusante do transformador de interligação, seguido da aplicação dos princípios do processo estabelecido.

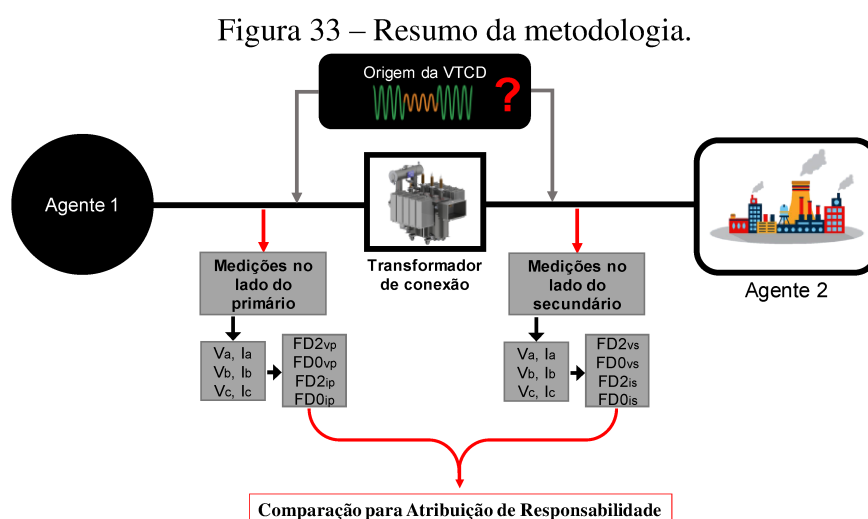
Ainda, visando uma avaliação do processo sob distintas configurações das cargas que constituem as demandas dos sistemas, suas representações nos trabalhos computacionais são realizadas através de modelos equivalentes constituídos por: impedância constante, potência constante, motores dinamicamente representados e ainda conversores eletrônicos. Quanto aos motores, como já destacado no capítulo precedente, estes são pré-disponibilizados no simulador Matlab/Simulink, o qual, já oferece representações completas para diferentes níveis de potência. Em relação aos conversores de frequência/retificadores, estes componentes também já se encontram com modelos base prontos para utilização na biblioteca do simulador.

Por fim, visando uma base complementar para a avaliação da efetividade do processo, é estabelecida uma estrutura experimental constituída por uma fonte programável de eventos, a qual, em conjunto com um arranjo elétrico em escala reduzida montada no Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica da UFU (LabQEE-UFU), se apresenta como um complemento

prático para fins da comprovação dos fundamentos que norteiam a metodologia focada na pesquisa.

4.2 Estratégia para os Estudos de Casos

A Figura 33 ilustra a estrutura da interligação elétrica dos agentes, nos termos requeridos para o emprego da metodologia. Nesta podem ser identificadas as partes conectadas pelo transformador de interligação e as grandezas requeridas para a aplicação do processo de análise focado nesta tese. Vale destacar que as variáveis mostradas correspondem a informações prontamente disponibilizadas por registradores de tensão inseridos em ambos os lados do transformador.



Fonte: O autor.

Para a realização dos estudos computacionais, como mencionado, foram empregadas 4 (quatro) configurações de sistemas elétricos, cada qual com sua particularidade representativa de situações passíveis de ocorrência em campo. São elas:

- Caso 1 – Sistema elétrico associado com uma rede de distribuição alimentando consumidores industriais/comerciais/residenciais típicos, constituídos por cargas estáticas, motrizes e potências constantes;
- Caso 2 – Sistema padrão conhecido por IEEE-BTS, o qual possui múltiplas unidades de consumo com transformadores de conexão específicos, permitindo,

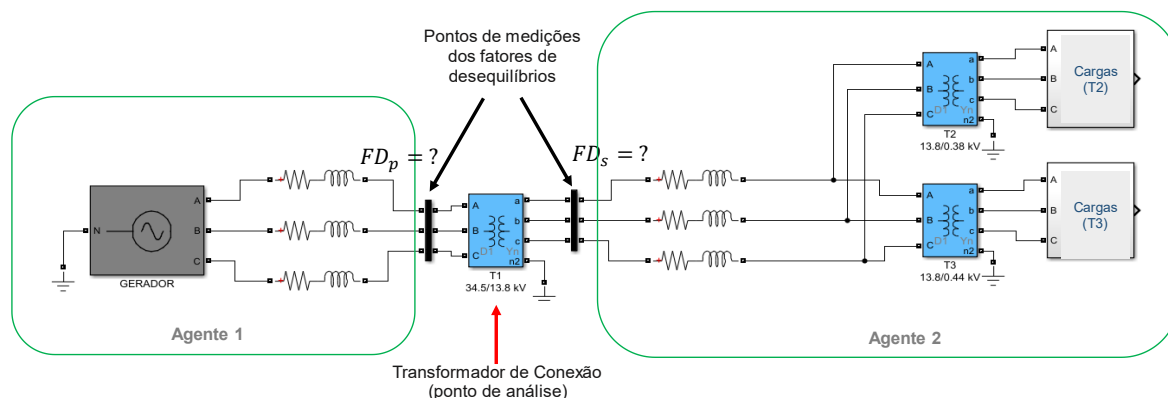
assim, avaliar questões interativas entre as instalações quando da análise individual de cada consumidor diante da composição topológica utilizada;

- Caso 3 – Conexão de dois agentes transmissores, envolvendo uma rede de suprimento convencional HVAC interligada a um complexo de interligação em HVDC, com conexão feita através de transformadores de 3 enrolamentos;
- Caso 4 – Sistema elétrico com a presença de uma Usina Fotovoltaica (UFV) instalada no lado da unidade consumidora, representando estruturas de redes elétricas de distribuição que crescem em relevância na atualidade.

4.3 Estudos de Desempenho - Caso 1

Este caso se apresenta com uma composição estrutural similar a utilizada em [28]. Todavia, para os estudos em pauta, o agente 2 se apresenta constituído por uma instalação consumidora constituída por dois transformadores alimentando cargas definidas através da composição de 3 tipos de consumos (motrizes, impedância constante, e potência constante), supridas pelos transformadores T2 e T3 da Figura 34. O arranjo apresentado indica que o ponto de análise corresponde ao da instalação do transformador de conexão T1.

Figura 34 – Sistema elétrico empregado - Caso 1.



Fonte: O autor.

A Tabela 21 sintetiza os parâmetros dos principais componentes que perfazem o sistema empregado [17], [28], [44], [45].

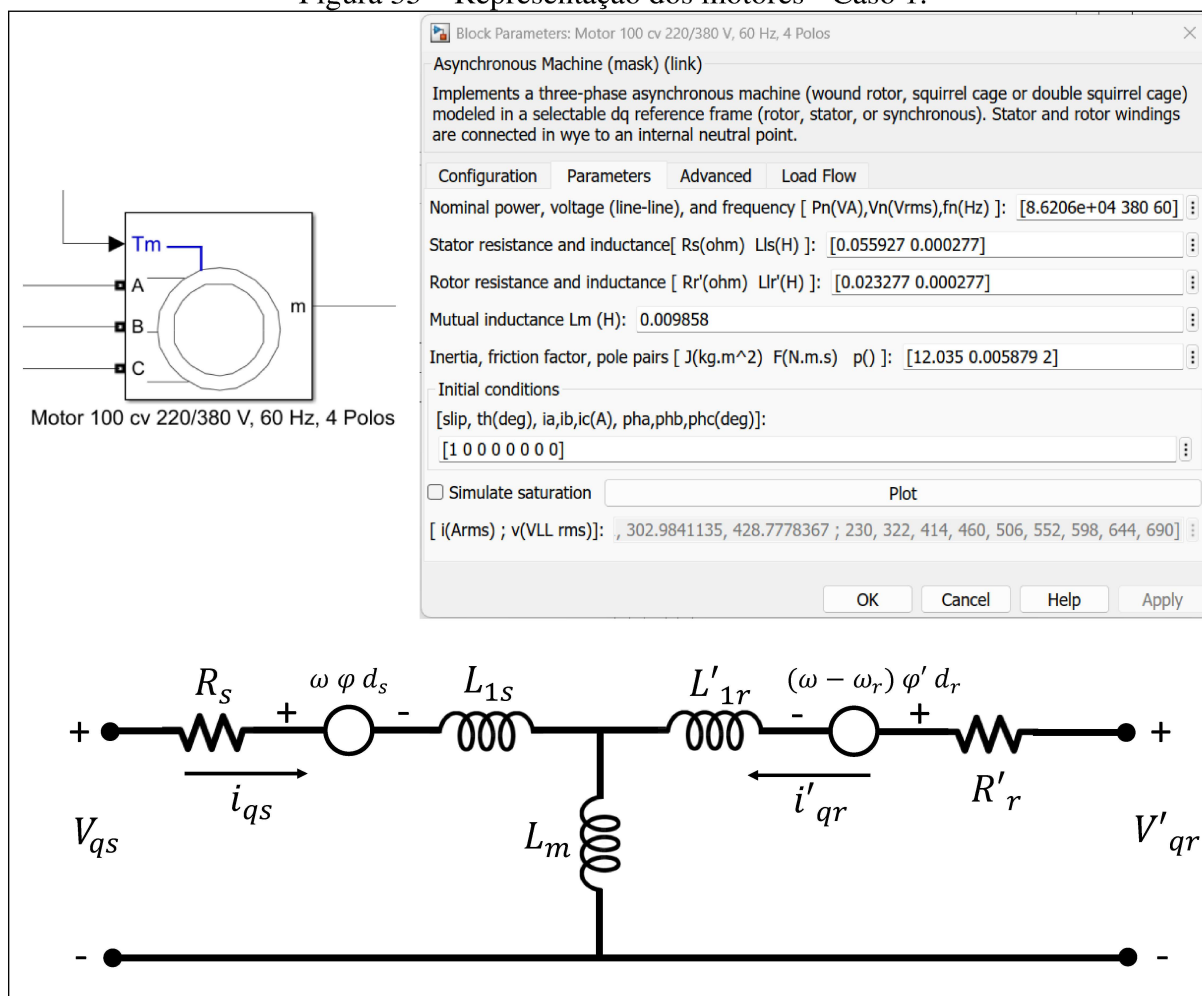
Tabela 21 - Parâmetros do sistema elétrico - Caso 1.

Equivalente da Concessionária – Agente 1	
Tensão de Alimentação	34,5 kV
Nível de Curto Circuito (Scc)	102 MVA
X/R	7
Ponto de Análise	
Transformador T1	Relação de Transformação:
	34,5kV/13,8kV
	Potência: 7,5 MVA
	X: 3 % e R: 0,5 % (D/Yn)
Cargas do Agente 2	
Cabos	R: 2,6 Ω
	L: 0,4 mH
Transformador T2	Relação de Transformação:
	13,8kV/0,38kV
	Potência: 1,5 MVA
	X: 3,5 % e R: 0,7 % (D/Yn)
Cargas ligadas a T2	Conjunto de 3 Motores: 250 kVA;
	Carga de Potência Constante: 800 kVA
Transformador T3	Relação de Transformação:
	13,8kV/0,44kV
	Potência: 5 MVA
	X: 3,5 % e R: 0,5 % (D/Yn)
Cargas ligadas a T3	Carga de Potência Constante: 2 MVA
	Carga de Impedância Constante: 2 MVA

Fonte: O autor.

Quanto aos motores, estes foram representados por modelos provenientes da plataforma *MATLAB/Simulink*, como já referido anteriormente. A título de ilustração, a Figura 35 indica o recurso utilizado para este fim.

Figura 35 – Representação dos motores - Caso 1.

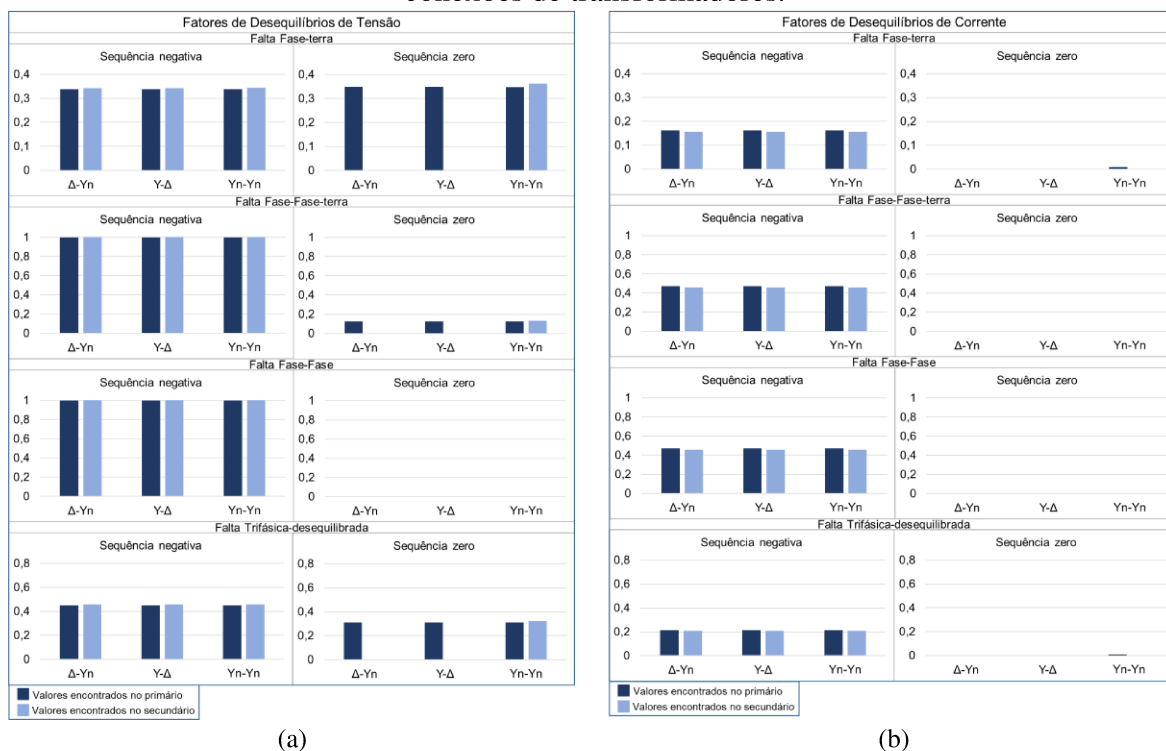


Fonte: Matlab/Simulink.

4.3.1 Resultados para Eventos do Lado da Rede Supridora (agente 1)

Uma vez implementado o sistema no simulador *Matlab-Simulink*, foram realizados os testes de desempenho cujos resultados encontram-se indicados na Figura 36. 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. Os fenômenos estudados correspondem a diferentes tipos de VTCDs (fase-terra, fase-fase terra, fase-fase e trifásicas desequilibradas), e os eventos impostos conduziram às tensões das fases com defeito para níveis de 0,5 pu, as quais permaneceram por 0,3 s.

Figura 36 - Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) – Valores para as FDs de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do agente 1 (supridor) – Diferentes conexões de transformadores.



Fonte: O autor.

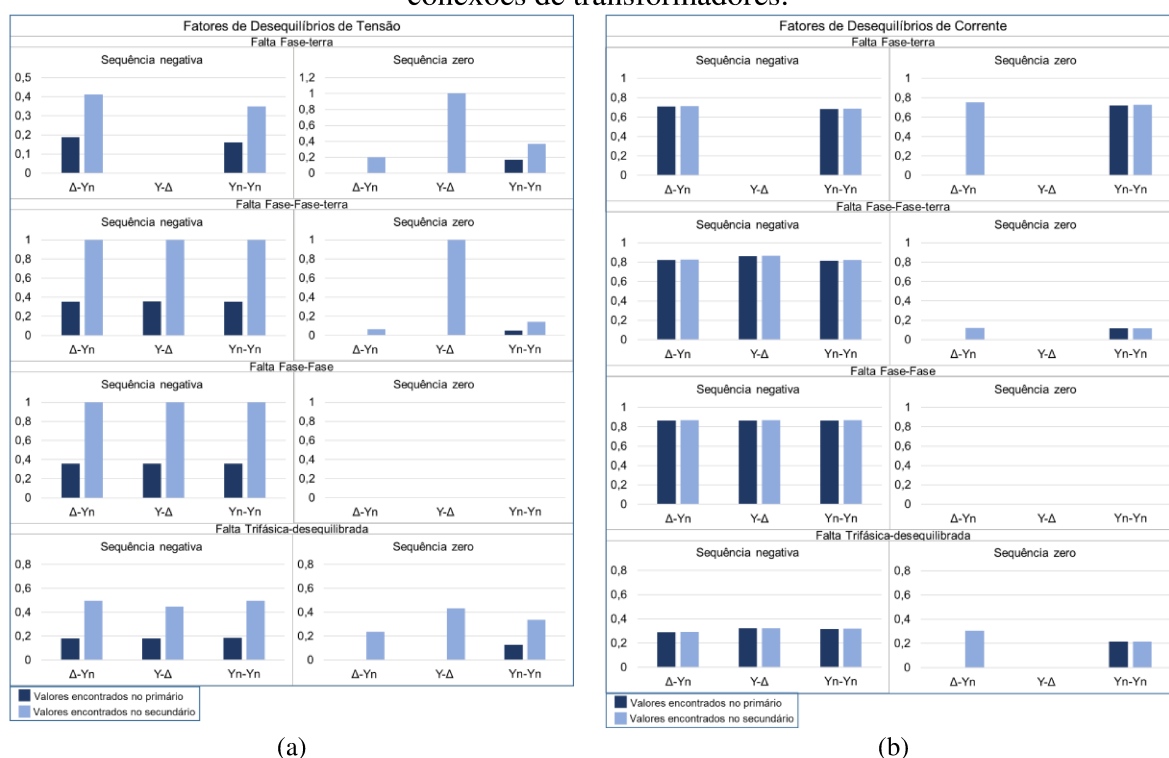
Os resultados apresentados na Figura 36 evidenciam que:

- Apesar de serem empregadas diferentes configurações para as ligações dos transformadores, os FD2v verificados tanto do lado primário como secundário são iguais, ratificando as premissas do processo de identificação do fenômeno quanto a sua origem. É importante destacar que, a configuração de ligação do transformador também não influenciou na magnitude dos FD2v encontrados. Em relação aos FD2i, estes também são idênticos no primário e secundário do transformador;
- Analisando-se a grandeza FD0v, destaca-se que a mesma se mostra, como previsto, fortemente influenciada pelo tipo de falta, envolvendo ou não o solo. Para o caso de um evento advindo do agente 1, para as ligações, Δ -Yn e Y- Δ , não há transferência do conteúdo de tensão de sequência zero para o secundário. Contudo, para a ligação Yn-Yn, há transferência para o secundário. Observando-se os FD0i, nota-se que, devido a configuração do sistema, seu valor é muito pequeno, até mesmo para a ligação Yn-Yn.

4.3.2 Resultados para Eventos do Lado das Unidades Consumidoras (agente 2)

A Figura 37 apresenta os resultados das simulações para as situações atreladas com as VTCDs oriundas no lado das unidades consumidoras (agente 2).

Figura 37 - Fatores de desequilíbrios de Tensão (a) e Corrente (b) – Valores para as FDs de sequência negativa e zero – VTCD produzida do lado do agente 2 (consumidor) – Diferentes conexões de transformadores.



Fonte: O autor.

Os resultados apresentados conduzem às seguintes constatações:

- De um modo geral, os FD2v foram significativamente diferentes para os lados do transformador, conforme esperado pelo método proposto. Um ponto de destaque está na falta Fase-terra sob a presença de um transformador com ligação Y- Δ . Para esse caso, o valor do FD2v foi nulo para ambos os lados. Esse comportamento ocorre em virtude da configuração do circuito utilizado, em que os transformadores responsáveis pela alimentação dos consumidores se apresentam com conexão delta para o primário. Isso determina que não há circulação de corrente de sequência negativa quando da ocorrência de uma falta Fase-terra. Portanto, ocorre o efeito do deslocamento do neutro, resultando

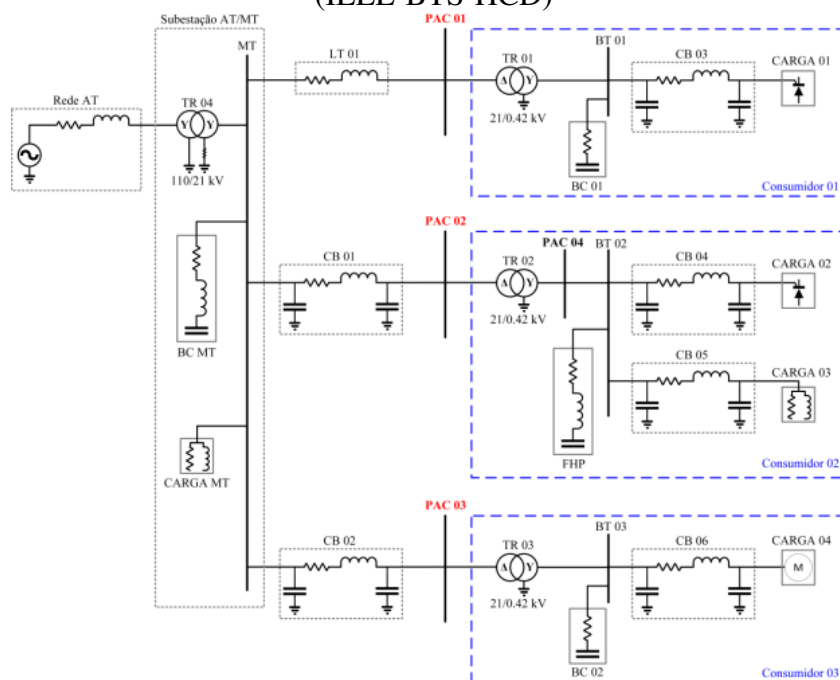
no fato que o desequilíbrio de tensão não mais se apresenta como sendo de sequência negativa, mas sim, de sequência zero.

- Analisando-se os FD2i, estes são iguais no primário e secundário do transformador, independentemente da configuração analisada.
- No tocante a análise das componentes de sequência zero, para as faltas que envolvem o solo, observa-se a presença do conteúdo de tensão de sequência zero somente no lado em que ocorre o distúrbio, exceto para a ligação Yn-Yn. Neste há presença do conteúdo de sequência zero em ambos os lados. Em relação a corrente de sequência zero, tal componente existe apenas do lado Yn.

4.4 Estudos de Desempenho - Caso 2

O segundo caso se apresenta como um sistema de grande porte contendo múltiplos alimentadores e unidades consumidoras. Para tanto foi empregado o arranjo topológico e paramétrico conhecido por *IEEE Benchmark Test System for Harmonic Contribution Determination Studies* (IEEE-BTS-HCD), o qual foi, originalmente, concebido para estudos sobre as contribuições harmônicas. Este se mostra constituído por 3 centros de consumo, fato este que determina um complexo com múltiplos PACs, cada qual correspondente ao ponto de conexão de suas correspondentes cargas, como mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Sistema elétrico empregado para o estudo de caso 2 - (IEEE-BTS-HCD)



Fonte: Adaptado de [46].

Como mostrado no diagrama unifilar, O *IEEE-BTS-HCD* representa uma rede elétrica com distintos níveis de tensão formados por barramentos de alta tensão (AT), média tensão (MT) e baixa tensão (BT), os quais alimentam três consumidores, cada qual com seu ponto de acoplamento com o complexo através de transformadores individuais. Os consumidores são compostos por cargas lineares e não lineares, bancos de capacitores e filtros harmônicos passivos. Além das unidades de consumo, encontram-se também conectados na subestação um banco de capacitores e uma carga trifásica RL. Os parâmetros representativos do sistema em pauta podem ser encontrados em [15], enquanto que suas condições operativas estão sintetizadas na Tabela 22.

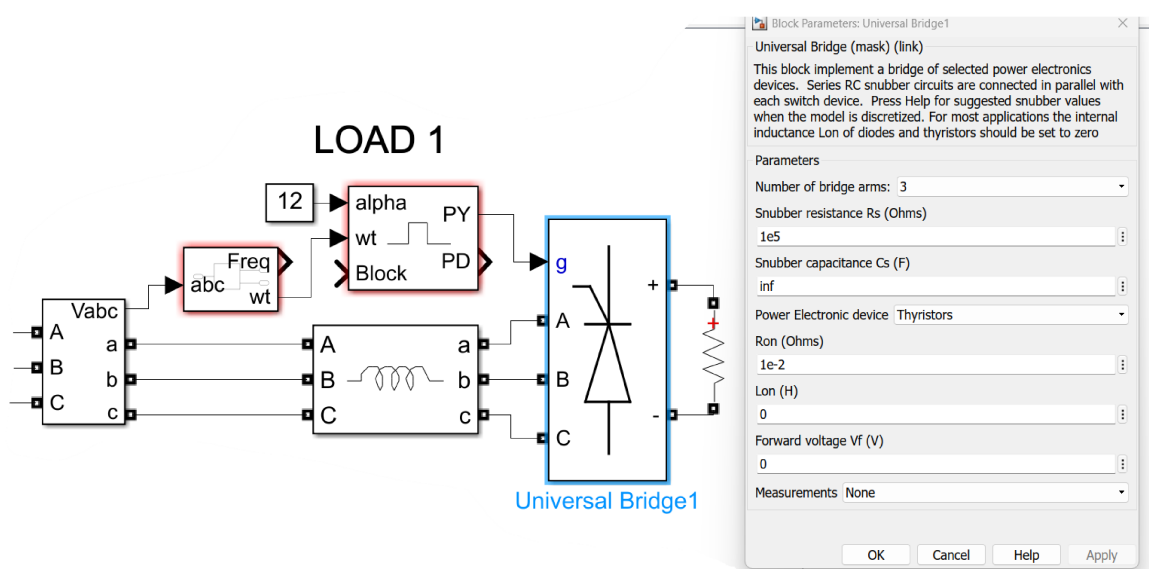
Tabela 22 – Condição operativa imposta ao sistema IEEE-BTS-HCD.

Elementos do Sistema	Condição de operação
Consumidor 01	
Retificador a tiristor (CARGA 01)	ligado
Banco de capacitores (BC 01)	ligado
Consumidor 02	
Retificador a tiristor (CARGA 02)	ligado
Carga linear (CARGA 03)	ligada
Filtro harmônico passivo (FHP)	ligado
Consumidor 03	
Motor de indução (CARGA 04)	Potência reduzida (200 kW, fp 0,9)
Banco de capacitores (BC 02)	ligado (50 kVAr)
Carga MT	
(CARGA MT)	ligada
Banco de capacitores MT	
(BC MT)	ligado

Fonte: Adaptado de [15].

Quanto a representação do retificador que compõe parte da carga, a Figura 39 apresenta o recurso disponibilizado pelo simulador. Os principais parâmetros aplicados nesta representação podem ser encontrados em [15].

Figura 39 – Modelo de Retificador utilizado na simulação.



Fonte: [15].

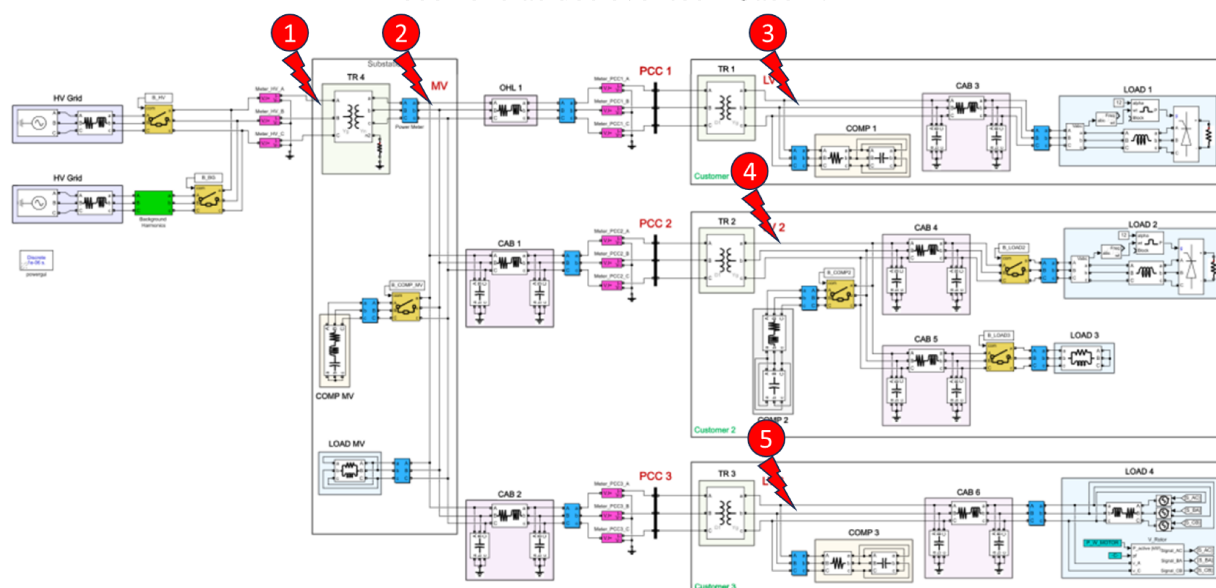
Para a realização dos estudos avaliativos, cada um dos 4 pontos de acoplamento foi considerado individualmente. Em relação as características das faltas aplicadas para promover as VTCDs, como anteriormente, estas foram: fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra, as quais conduziram a tensões residuais de 0,5 pu para a fase submetida à falta, durante um intervalo de tempo de 0,3 s. Uma observação a ser feita está no fato que, para o Caso 1, foi também empregada uma situação operacional associada a um fenômeno trifásico desequilibrado, todavia, para este caso, devido à similaridade da performance da metodologia, esta condição não é explorada, sem qualquer prejuízo aos entendimentos e constatações. Também, é relevante observar que as investigações de ocorrências nos primários de T1, T2 e T3 se fazem dispensadas, visto que os distúrbios já teriam sido considerados quando da aplicação de faltas no secundário do T4.

Os subcasos analisados foram:

- Falta Fase-Terra no primário de T4 – subcaso 2.1.1;
- Falta Fase-Terra no secundário de T4 – subcaso 2.1.2;
- Falta Fase-Terra no secundário de T1 – subcaso 2.1.3;
- Falta Fase-Terra no secundário de T2 – subcaso 2.1.4;
- Falta Fase-Terra no secundário de T3 – subcaso 2.1.5.

A Figura 40 ilustra o sistema implementado no Matlab/Simulink e também os pontos de incidência das ocorrências.

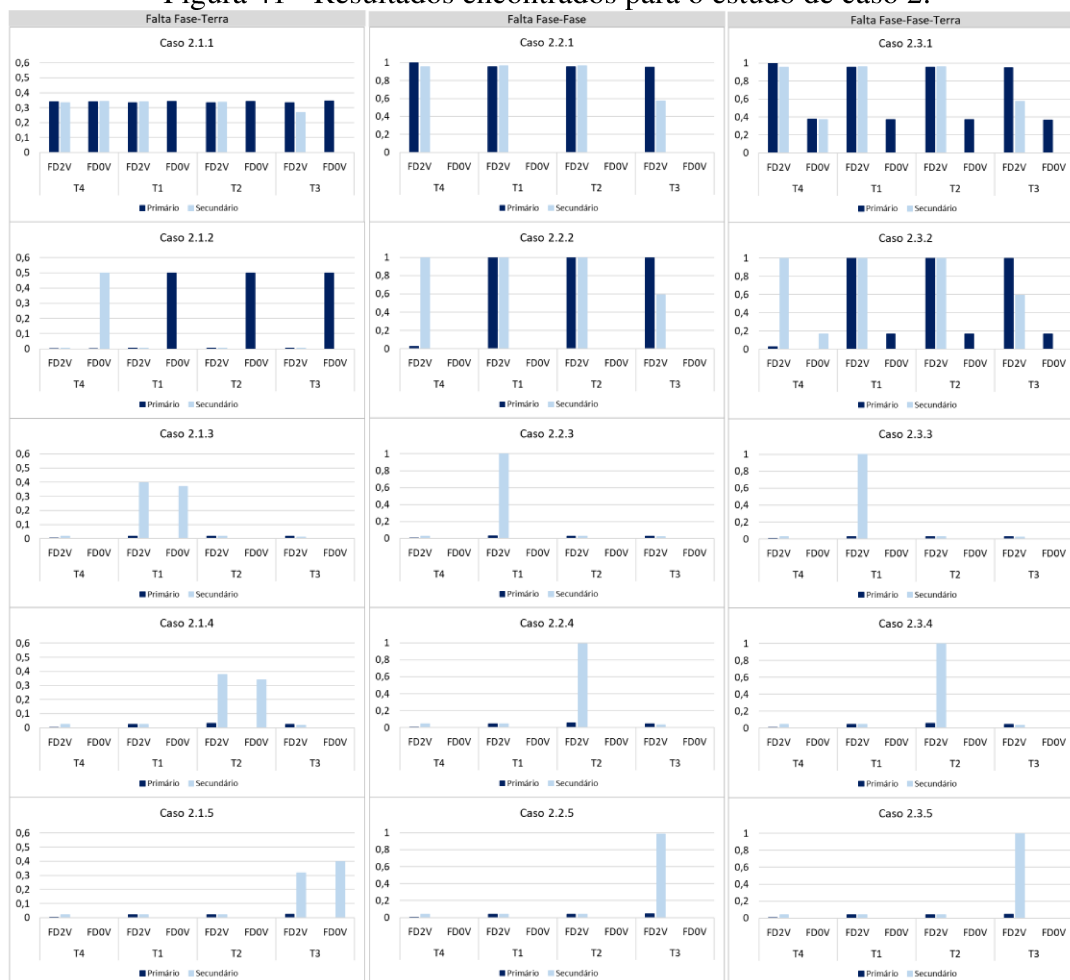
Figura 40 – Sistema elétrico implementado no simulador e indicação dos pontos de ocorrência dos eventos - Caso 2.



Fonte: O autor.

Os resultados encontrados para os fatores de desequilíbrio associados com a análise em pauta estão apresentados na Figura 41.

Figura 41 - Resultados encontrados para o estudo de caso 2.



Fonte: O autor.

Os desempenhos obtidos revelam que:

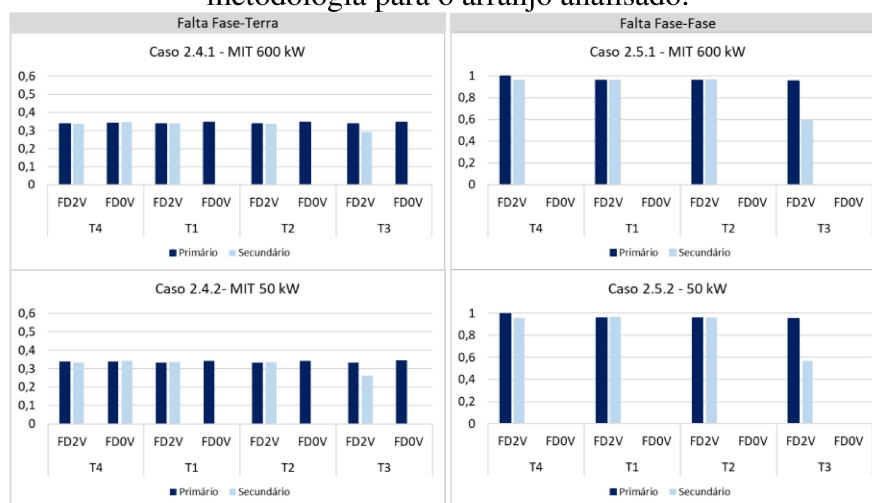
- Para faltas aplicadas no primário do T4, os valores dos fatores FD2v são o mesmo em ambos os lados do transformador, indicando que o evento que originou a VTCD é advindo do agente 1. Analisando-se os transformadores T1 e T2, estes também indicam desempenhos atrelados com uma falta oriunda do lado de seus respectivos primários (T4 é comum a todos eles);
- Para o caso da incidência das faltas no secundário do T4, os fatores de desequilíbrio entre o primário e secundário desta unidade se mostram distintos. Analisando-se T1 e T2, percebe-se que FD2v se apresenta igual para ambos os lados destes transformadores, fato este que determina que o evento ocorreu a montante destes;

- Para a situação que a fonte do distúrbio se faz presente no secundário do T2, sem maiores detalhes de considerações, mais uma vez fica ratificada a proposta de identificação da origem do fenômeno;
- Para as faltas nos secundários dos transformadores T3 e T4, os resultados foram similares ao acima, assim como a identificação da origem dos distúrbios;
- Destaca-se, especificamente, para o transformador T3, que possui um motor diretamente conectado ao seu secundário, o lado indicativo da origem do evento causador da VTCD é aquele que apresenta o maior valor do FD2v;
- De um modo geral, os FD0v serviram como um complemento as análises realizadas. As componentes de sequência zero se fizeram presentes quando a ligação do transformador permitia.

Outro fator analisado foi o efeito de distintos níveis de potência dos motores sobre os resultados obtidos. Para isso, as situações identificadas como casos 2.1.1 e 2.2.1 foram modificadas de modo a contemplar esse aspecto, por meio de alterações na carga motriz do consumidor suprido pelo transformador T3. Esse procedimento deu origem aos subcasos 2.4.1 e 2.4.2, referentes a faltas fase-terra, e aos subcasos 2.5.1 e 2.5.2, relativos a faltas fase-fase. As potências dos motores consideradas nas análises foram de 50 kW e 600 kW.

Os resultados obtidos para a análise do fator de influência exercido pelas máquinas motrizes encontram-se apresentados na Figura 42, onde é possível notar que a alteração da potência do MIT alterou pouco os resultados apresentados anteriormente para o arranjo estudado.

Figura 42 – Avaliação do fator de influência das cargas motrizes sobre o desempenho da metodologia para o arranjo analisado.



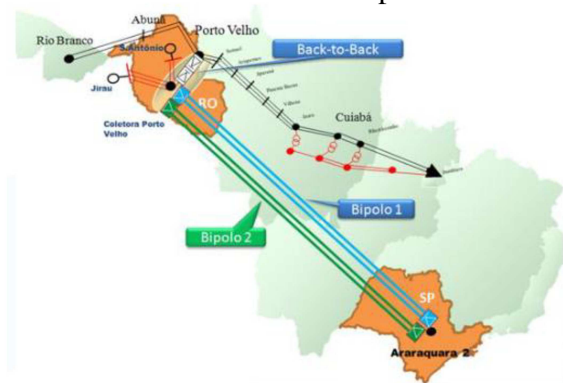
Fonte: O autor.

4.5 Estudos de Desempenho – Caso 3

O estudo em questão está associado com a interconexão de dois agentes transmissores. Um definido por uma rede CA convencional, e outro, constituído por uma interligação através de um sistema HVDC. Esta opção quanto ao arranjo físico se justifica pelo fato que, o sistema selecionado possui um expressivo montante de componentes com estrutura e operação associada com grandes conversores eletrônicos.

O complexo de transmissão HVDC corresponde ao sistema do Rio Madeira, indicado na Figura 43. Este tem uma capacidade de conversão (AC/DC/AC) de até 7100 MW de potência ativa, advindas das UHE's de Jirau e Santo Antônio, das quais 6300 MW têm por destinação a Região Sudeste do País e 800 MW são para abastecer a região Norte.

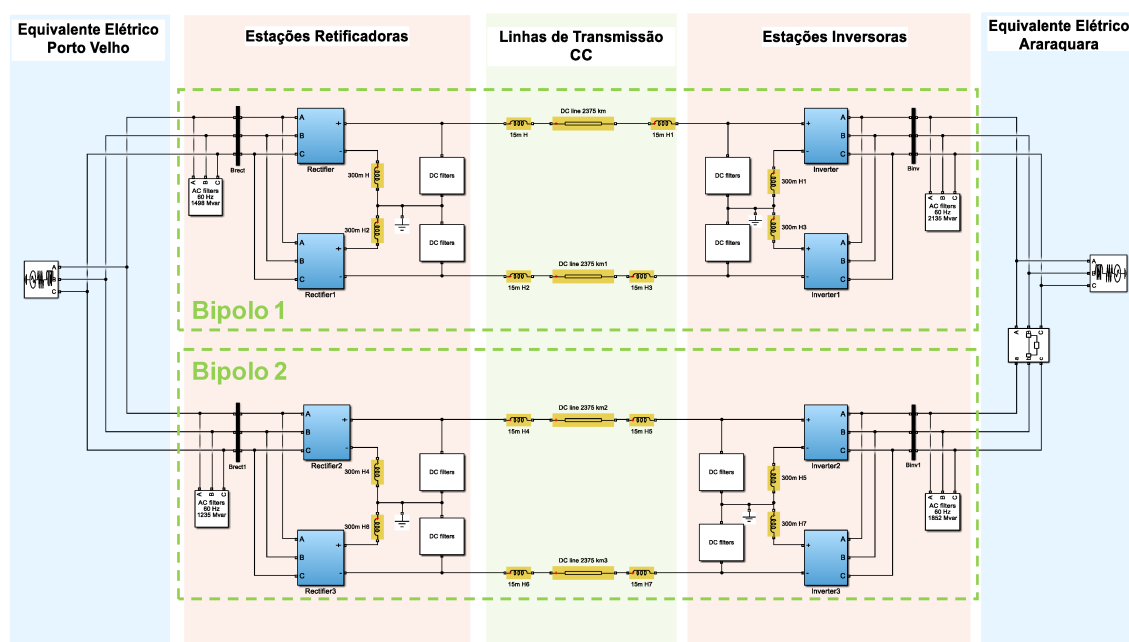
Figura 43 - Sistema de transmissão do Complexo do Rio Madeira.



Fonte: [47].

Para a aplicação da metodologia de atribuição de responsabilidade, o arranjo foi implementado na plataforma MATLAB/Simulink [48], resultando no equivalente indicado na Figura 44. Os parâmetros que definem o sistema podem ser encontrados nesta mesma referência.

Figura 44 - Modelo do Sistema HVDC-Rio Madeira na plataforma MATLAB/Simulink.



Fonte: O autor.

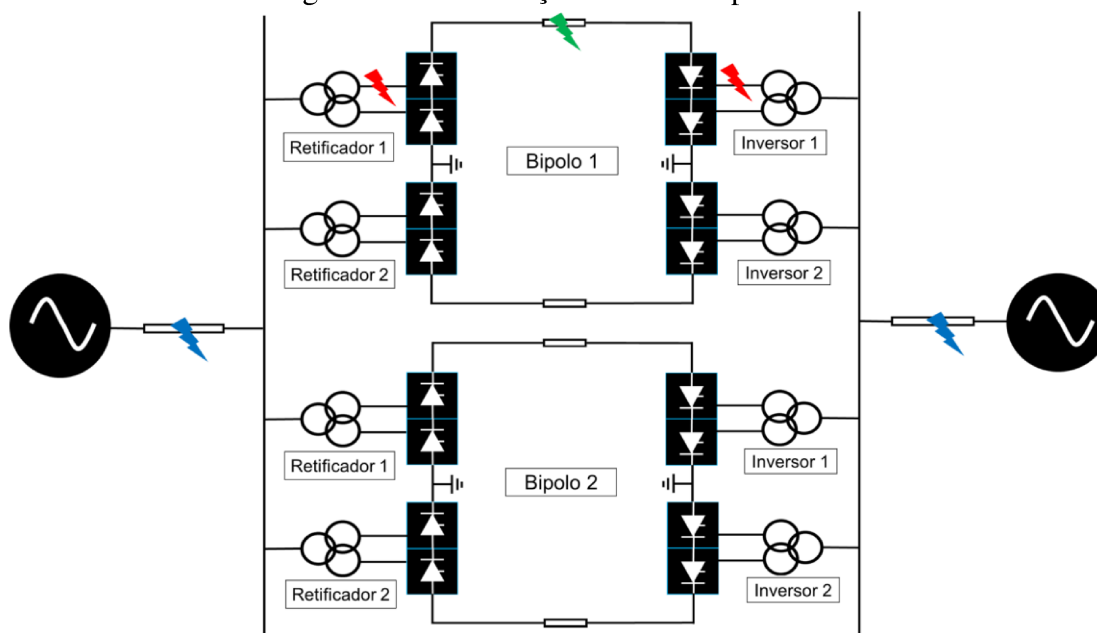
No arranjo indicado, constata-se a presença de um transformador de acoplamento de três enrolamentos, sendo seus enrolamentos secundário e terciário conectados diretamente às unidades de retificação ou inversão. Estes transformadores se apresentam como o ponto de análise para os diversos casos de estudo a serem realizados. Portanto, as faltas aplicadas e responsáveis pelas ocorrências das VTCDs serão impostas, ora do lado primário, ora no lado secundário de cada transformador.

As situações operacionais estabelecidas para os estudos foram:

- Caso 3.1: Falta Fase-terra no lado do primário da estação retificadora (caso 3.1.1) e inversora (caso 3.1.2). Para ambos a tensão residual na fase sob falta foi de 0,8 p.u. O ponto de incidência da falta para este caso está indicado em azul na Figura 45;

- Caso 3.2: Falta Fase-Fase no secundário do retificador 1 (caso 3.2.1), bem como, falta no secundário do inversor 1 (caso 3.2.2). Para ambas as situações as faltas foram aplicadas no Bipolo 1, e nos dois casos utilizou-se uma resistência de falta que conduziu a uma tensão residual das fases sob falta de 0,5 p.u. O ponto de incidência da falta para este caso está indicado em vermelho na Figura 45;
- Caso 3.3: Falta de alta impedância na linha CC do polo 1 do Bipolo 1. Para tanto, foram aplicadas faltas com resistências de 800Ω (caso 3.3.1) e 1000Ω (caso 3.3.2), objetivando representar eventuais fugas, por exemplo, nos isoladores. O ponto de incidência da falta para este caso está indicado em verde na Figura 45.

Figura 45 - Localização das faltas aplicadas.



Fonte: O autor.

Para os casos simulados, a duração das faltas foi tal a produzir VTCDs com durações de 0,7s. Somado a esta observação, vale destacar que cada caso foi ainda subdividido em dois estudos, um relacionado com a falta do lado do retificador e outro do lado inversor. Isto originou, os casos 3.1.1, 3.1.2, etc.

A Tabela 23 resume os resultados encontrados para os fatores de desequilíbrio para cada situação analisada. É importante destacar que os fatores de desequilíbrio de tensão de sequência negativa no primário, secundário e terciário, foram identificados por FD2Vp, FD2Vs e FD2Vt, respectivamente.

Tabela 23 - Resultados dos estudos – fatores de desequilíbrio de sequência negativa do lado primário, secundário e terciário.

Caso analisado	Local das Medições	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD2v_t$
3.1.1	Retificador 1 (bipolo 1)	0,22	0,23	0,23
	Retificador 1 (bipolo 2)	0,22	0,23	0,23
3.1.2	Inversor 1 (bipolo 1)	0,26	0,27	0,27
	Inversor 1 (bipolo 2)	0,26	0,26	0,26
3.2.1	Retificador 1 (bipolo 1)	0,16	1	1
	Retificador 1 (bipolo 2)	0,16	0,16	0,16
3.2.2	Inversor 1 (bipolo 1)	0,11	1	0,43
	Inversor 1 (bipolo 2)	0,11	0,11	0,11
3.3.1	Retificador 1 (bipolo 1)	0,03	0,03	0,03
	Inversor 1 (bipolo 1)	0,03	0,03	0,03
3.3.2	Retificador 1 (bipolo 1)	0	0	0
	Inversor 1 (bipolo 1)	0	0	0

Fonte: O autor.

Observando os desempenhos obtidos é possível estabelecer as seguintes constatações:

- Para os casos 3.1.1 e 3.1.2, envolvendo uma falta no primário do transformador, é possível observar que os $FD2v$ são aproximadamente os mesmos do lado primário, secundário e terciário do transformador sob análise. A igualdade do processo de transferência do fator de desequilíbrio para o enrolamento terciário consolidou as premissas estabelecidas quando da presença de apenas dois enrolamentos para a unidade transformadora;
- Para os casos 3.2.1 e 3.2.2, nota-se que o $FD2v_p$ é bastante distinto do $FD2v_s$ e $FD2v_t$, indicando que o evento é proveniente do complexo HVDC do lado de suas unidades de conversão. Para o caso 3.2.1, as grandezas do Retificador 1 (bipolo 2) indicam que a falta que gerou a VTCD é advinda da rede CA de conexão do complexo CC. Isto seria esperado pelo fato da falta ter sido aplicada no secundário do Retificador 1 (bipolo 1). Para o caso 3.2.2 verifica-se o mesmo, todavia, observando que os registros são feitos nos inversores e não nos retificadores;
- Para os casos 3.3.1 e 3.3.2 observa-se que o $FD2v_p$ é distinto do $FD2v_s$ e $FD2v_t$, indicando que a falta é proveniente do complexo HVDC, do lado das unidades de conversão, visto que tais estudos contemplaram ocorrências na linha CC. Destaca-se

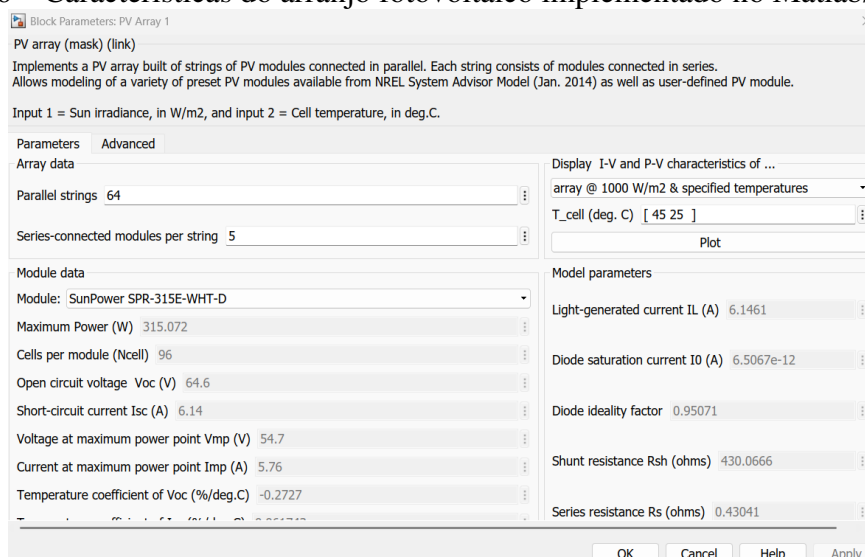
que, para o caso 3.3.2 os FDs foram muito pequenos. Neste caso, os valores atingidos pelas tensões não se apresentam dentro das classificações definidas por VTCDs. Mas, mesmo assim, a metodologia mostrou-se adequada para a identificação da localização do distúrbio;

- Focando a questão do transformador de 3 enrolamentos, percebe-se que os desempenhos se mantiveram análogos aos estudos de 2 enrolamentos. Desse modo, quando a falta ocorre no primário, o $FD2v$ é o mesmo tanto no primário quanto para o secundário e terciário, no entanto, se a falta ocorrer no secundário ou terciário, os $FD2v$ são distintos em relação ao primário.

4.6 Estudos de Desempenho - Caso 4

O caso 4 tem por objetivo representar um cenário crescente em relevância, caracterizado pela presença de unidades fotovoltaicas nas instalações elétricas que perfazem redes de transmissão/distribuição contendo unidades de geração não convencionais. Para tanto foi estabelecido um arranjo representativo de uma fazenda fotovoltaica composta por 4 centros de geração UFV, cada qual de potência máxima instalada de 100 kW. As principais características elétricas e operacionais de cada arranjo encontram-se apresentadas na Figura 46.

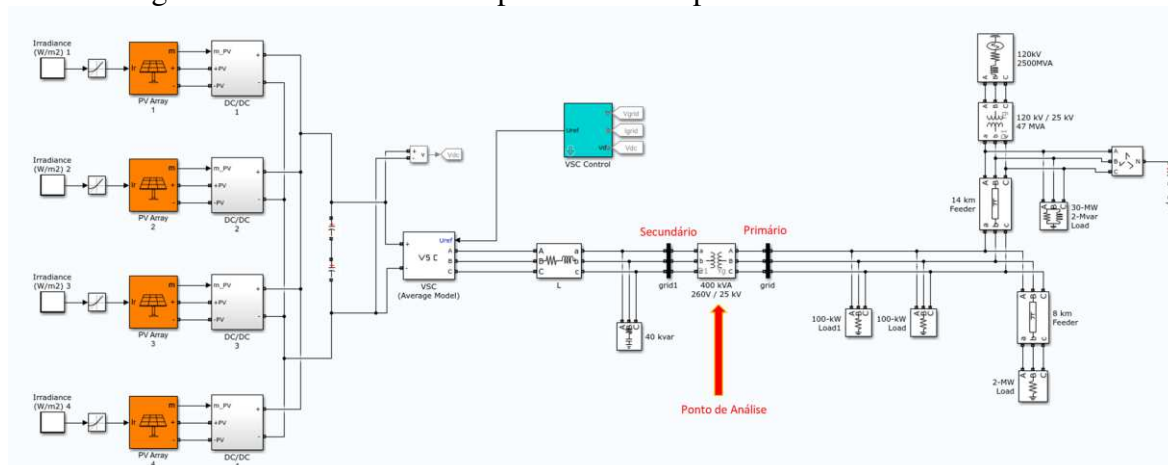
Figura 46 – Características do arranjo fotovoltaico implementado no Matlab/Simulink.



Fonte: O autor.

O sistema completo é apresentado na Figura 47, na qual se destaca o barramento em análise, junto ao qual tem-se a conexão das UFVs. Observa-se que o transformador de 400 kVA possui configuração com o primário em estrela aterrada (Y_n) e secundário em delta (Δ).

Figura 47 – Sistema UFV Implementado na plataforma Matlab/Simulink.



Fonte: O autor.

Quanto às VTCDs, novamente, estas encontram-se associadas com faltas dos tipos FT, FFT e FF, ocorridas dos lados primário e secundário do transformador em análise. Para todos os cenários, adotou-se como premissa o fato que a fase sob falta conduziu a uma tensão de 0,5 pu.

Assim procedendo, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 24. Como mostrado, novamente fica evidenciado que, para uma VTCD originada no lado primário, os valores de $FD2v$ são aproximadamente equivalentes em ambos os lados do transformador. Por outro lado, para uma VTCD originada no secundário, os valores de $FD2v$ tornam-se distintos entre os lados primário e secundário.

Quanto à componente de sequência zero, nota-se sua presença apenas no lado em que a falta ocorre. Essa componente não é transferida para o lado oposto devido ao tipo de conexão do transformador, que impede a circulação de correntes de sequência zero entre os enrolamentos.

Também é importante destacar que, no Caso 2, como mostrado na Tabela 24, observa-se novamente a ocorrência do deslocamento do neutro, e o desequilíbrio da tensão, como já mencionado, se apresenta na forma da componente de sequência zero.

Tabela 24 - Resultados do estudo de caso 4.

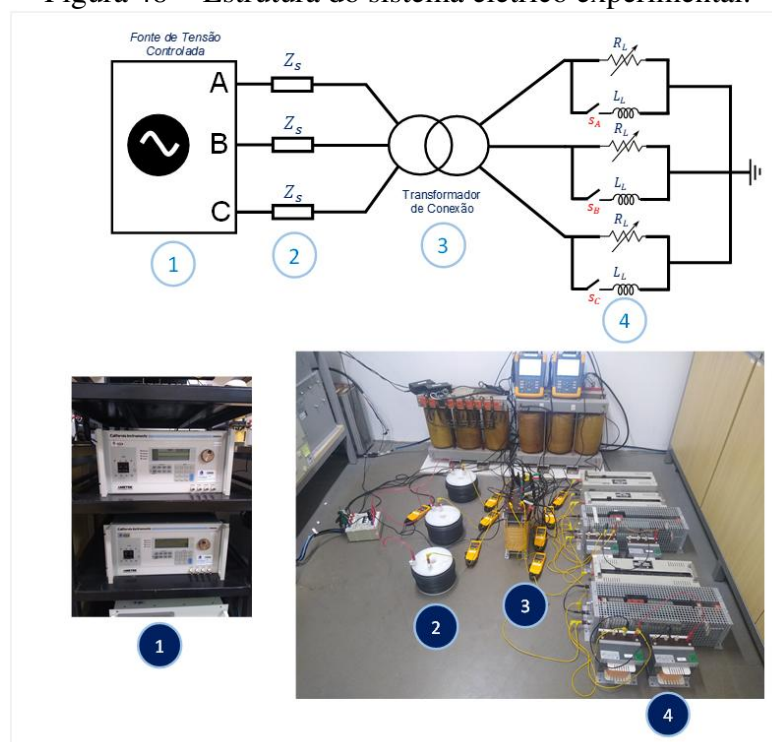
Casos	Origem da falta	Tipo de Falta	$FD2v_p$	$FD2v_s$	$FD0v_p$	$FD0v_s$
Caso 1	Primário	FT	0,19	0,19	0,44	0
Caso 2	Secundário	FT	0	0	0	0,81
Caso 3	Primário	FFT	1,00	1,00	0,15	0
Caso 4	Secundário	FFT	0,05	1,00	0	0,49
Caso 5	Primário	FF	1,00	1,00	0	0
Caso 6	Secundário	FF	0,04	0,93	0	0

Fonte: O autor.

4.7 Avaliação do Desempenho da Metodologia em Ambiente laboratorial

Diante dos resultados promissores indicados nos estudos computacionais, o avanço para a experimentação representa uma etapa importante para consolidação do processo de análise contemplado nesta tese. Para tanto, foi estabelecida uma estrutura laboratorial, constituída por um arranjo experimental em ambiente controlado, em escala reduzida, a qual viabilizou estudos experimentais utilizando uma fonte geradora dos distúrbios, um transformador de acoplamento interligando uma carga consumidora RL e uma indutância representativa da impedância do supridor, como mostrado na Figura 48.

Figura 48 - Estrutura do sistema elétrico experimental.



Fonte: O autor.

A fonte de tensão controlada corresponde ao equipamento produzido pela *California Instruments*, o transformador de conexão é caracterizado por uma unidade trifásica com três possibilidades de conexões das bobinas (Δ -Yn, Y- Δ e Yn-Yn) e a carga composta pelos indutores e resistências. Cabe destacar que os níveis de desequilíbrio obtidos experimentalmente foram significativamente inferiores àqueles utilizados nos estudos computacionais. Tais limitações foram impostas em função de que níveis mais elevados de desequilíbrio demandariam correntes acima da capacidade de suportabilidade dos equipamentos empregados na estrutura laboratorial.

Nas imagens a seguir, é possível observar os componentes utilizados no circuito montado no Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica (LabQEE-UFU). Nestas constata-se: indutores representando a impedância do sistema elétrico; qualímetros classe A; cargas diversas; e a fonte de tensão controlada. Esta última representa o recurso experimental para a geração das VTCDs oriundas do primário. No que tange a produção destes fenômenos do lado secundário, estas foram obtidas através do chaveamento das indutâncias em paralelo com a carga.

Um outro aspecto relacionado com a avaliação experimental refere-se ao emprego de dois medidores de qualidade da energia, requisito este consonante com a estratégia de identificação da responsabilidade proposto nesta tese.

Figura 49 - (a) Fonte de tensão controlada e (b) Qualímetros utilizados para detecção das VTCDs.



Fonte: O autor.

Figura 50 - (a) Indutância representando a impedância do sistema elétrico e (b) Transformador de análise.



Fonte: O autor.

Figura 51 - (a) Cargas resistivas e (b) Indutâncias que foram chaveadas juntamente com os reostatos para gerarem as VTCDs do lado do secundário.



Fonte: O autor.

Na Tabela 25 são indicados os parâmetros dos componentes que perfazem o arranjo experimental.

Tabela 25 - Parâmetros do Sistema Elétrico Experimental.

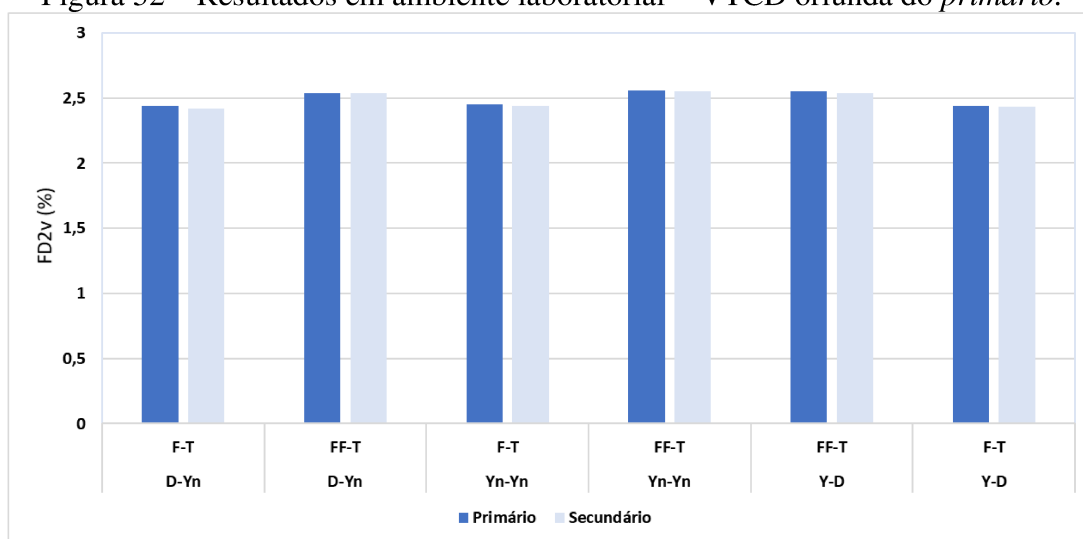
Fonte de tensão controlada	220V (fase-fase) – valor nominal
Impedância do Sistema (Z_S)	$L_S=2.5\text{mH}$ e $R_S=0.15\Omega$
Transformador de Conexão	5kVA Tipos de conexão: Δ -Yn, Y- Δ , o Yn-Yn
Cargas	$R_L=125\Omega$ - valor nominal $L_L=40\text{mH}$

Fonte: O autor.

Os estudos foram conduzidos através da reprodução de VTCDs Fase-Terra (F-T) e Fase-Fase-Terra (FF-T), considerando as três conexões de transformadores citadas anteriormente.

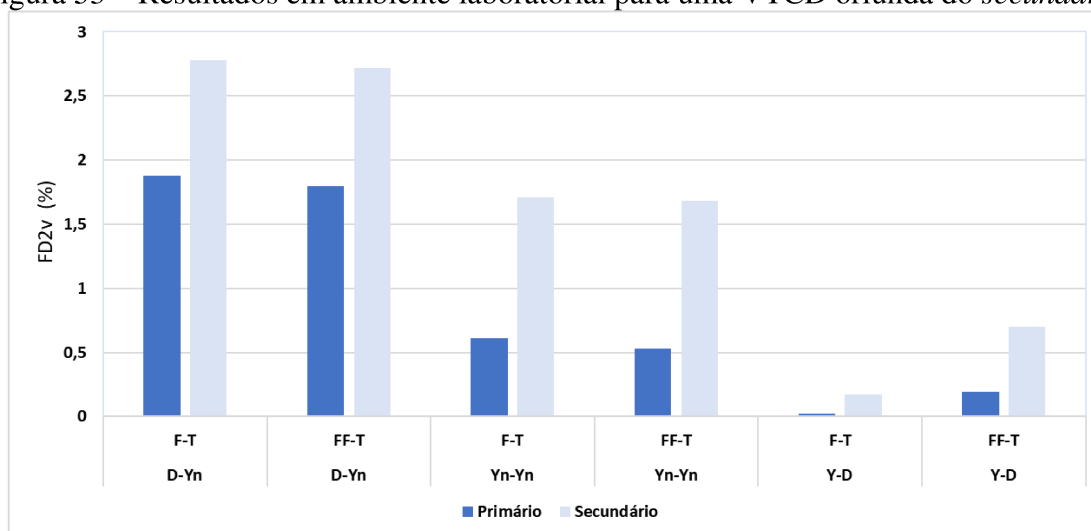
Iniciando pela imposição de eventos do lado primário do transformador, os resultados obtidos para os indicadores de desequilíbrio de sequência negativa para o primário e secundário encontram-se mostrados na Figura 52.

Figura 52 – Resultados em ambiente laboratorial - VTCD oriunda do *primário*.



Fonte: O autor.

Para eventos originários do secundário do transformador, os resultados são apresentados na Figura 53.

Figura 53 – Resultados em ambiente laboratorial para uma VTCD oriunda do *secundário*.

Fonte: O autor.

Analisando-se as figuras anteriores, constata-se que os níveis e correlação referentes ao Fator de Desequilíbrio de Tensão de Sequência Negativa (FD2v) se mostram consonantes com os desempenhos esperados. Assim, no contexto experimental, fica novamente consolidada a estratégia que, se a VTCD ocorre no lado primário, esta situação produz o mesmo FD2v em ambos os lados do transformador de conexão (cargas passivas). Por outro lado, quando a VTCD é produzida no lado secundário, os valores de FD2v se mostram diferentes para os dois lados.

4.8 Considerações Finais

Os resultados obtidos ao longo deste capítulo, a partir da condução de estudos computacionais e experimentais, permitem consolidar a efetividade da metodologia proposta para a identificação da origem das VTCDs. A análise contemplou diferentes arranjos representativos de sistemas elétricos reais, abrangendo desde configurações simplificadas com dois agentes até estruturas topologicamente mais complexas, incluindo sistemas com múltiplos barramentos, arranjos híbridos CA-CC e interligações envolvendo conversores HVDC.

Nos estudos computacionais, a aplicação da metodologia para quatro casos distintos evidenciou plena aderência aos princípios teóricos estabelecidos, baseados na correlação entre os fatores de desequilíbrio medidos à montante e à jusante do transformador de conexão entre os agentes. Em todos os cenários analisados, os resultados obtidos para a atribuição de responsabilidade mostraram-se consistentes com o esperado, independentemente da complexidade topológica, da natureza das cargas ou da presença de transformadores de

múltiplos enrolamentos. Destaca-se, nesse contexto, a robustez do FD2v, o qual se mostrou o indicador mais adequado aos propósitos da metodologia, sendo os demais parâmetros utilizados como elementos complementares para reforçar a confiabilidade do processo decisório.

A etapa experimental, conduzida em ambiente laboratorial controlado, constituiu-se em um passo importante para a validação prática do método. A montagem de uma estrutura experimental em escala reduzida, dotado de elevada flexibilidade operacional, possibilitou a reprodução sistemática de diferentes cenários de ocorrência de VTCDs, contemplando diferentes tipos de faltas, configurações de conexão do transformador e composições de carga. Os ensaios realizados, alinhados à estrutura dos estudos computacionais, confirmaram as tendências previamente observadas, evidenciando que o FD2v mantém seu desempenho diante de sistemas físicos reais.

Dessa forma, os resultados obtidos ao longo deste capítulo demonstram que a metodologia proposta apresenta elevada consistência teórica, robustez frente a diferentes configurações de sistema e viabilidade prática para aplicação em campo. A simplicidade do processo avaliativo, que requer apenas registros de tensão e corrente, usualmente disponíveis nas instalações elétricas modernas, reforça o seu potencial de utilização em ambientes reais de transmissão, distribuição e unidades consumidoras. Assim, ficam consolidadas as perspectivas promissoras para a adoção do método como uma ferramenta confiável para a atribuição de responsabilidade em eventos de VTCDs, contribuindo de maneira significativa para o aprimoramento dos processos de análise da qualidade da energia elétrica.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Não obstante o fato que, ao longo do texto, tenham sido apresentadas as principais constatações relacionadas com os fundamentos do método de análise, efetividade dos resultados diante das expectativas físicas e as principais conclusões das etapas dos trabalhos desenvolvidos, procede-se, neste capítulo final, uma síntese geral sobre os desenvolvimentos, estudos de desempenho, efetividade do processo de análise, dentre outros aspectos.

O Capítulo 1 foi dedicado a uma contextualização do tema da pesquisa, iniciando por uma visão sobre as consequências das variações de tensão, através das quais ficou evidenciado a relevância da busca por meios para a atribuição da responsabilidade dos eventos. Também, ficou destacado que, dentre os indicadores de qualidade, as VTCDs se apresentam como fenômeno de maior importância, visto que o número de reclamações das unidades consumidoras encontra-se, majoritariamente, centradas neste efeito. Somado a esta visão técnica, foram também apresentadas e sintetizados as principais publicações atinentes à matéria, identificando-as e resumindo seus fundamentos aplicativos. Diante desta exposição, a constatação final foi que, até o momento, não se reconhece um procedimento sistematizado que se mostre efetivo aos fins aqui almejados. À luz desta realidade, foram então estabelecidas as diretrizes motivadoras para a busca de uma metodologia consistente e factível de implementação em campo. Esta proposta, de fato, foi estabelecida, ainda de forma inicial, no desenvolvimento de uma dissertação conduzido pelo próprio autor desta tese de doutorado. Os resultados iniciais da pesquisa realizada se mostraram promissores, visto os desempenhos computacionais obtidos. Todavia, os trabalhos foram conduzidos de forma embrionária, não tendo sido feitas explorações mais profundas dos fundamentos matemáticos norteadores do processo de análise considerado. Isto conduziu a continuidade das atividades, buscando meios teóricos sólidos que demonstrassem a exequibilidade através de modelagens matemáticas iniciais, evidenciando, assim, a efetividade, a estratégia no contexto de sua fundamentação conceitual. Adicionalmente, a avaliação da performance da proposta foi realizada utilizando configurações simplificadas para os arranjos elétricos utilizados considerando tão apenas modelos de unidades consumidoras à base de impedância constante. Diante do reconhecimento da necessidade maiores avanços sobre o tema, foram então estabelecidos novos horizontes de desafio que determinaram as diretrizes para esta pesquisa, como detalhado nesta unidade inicial da tese.

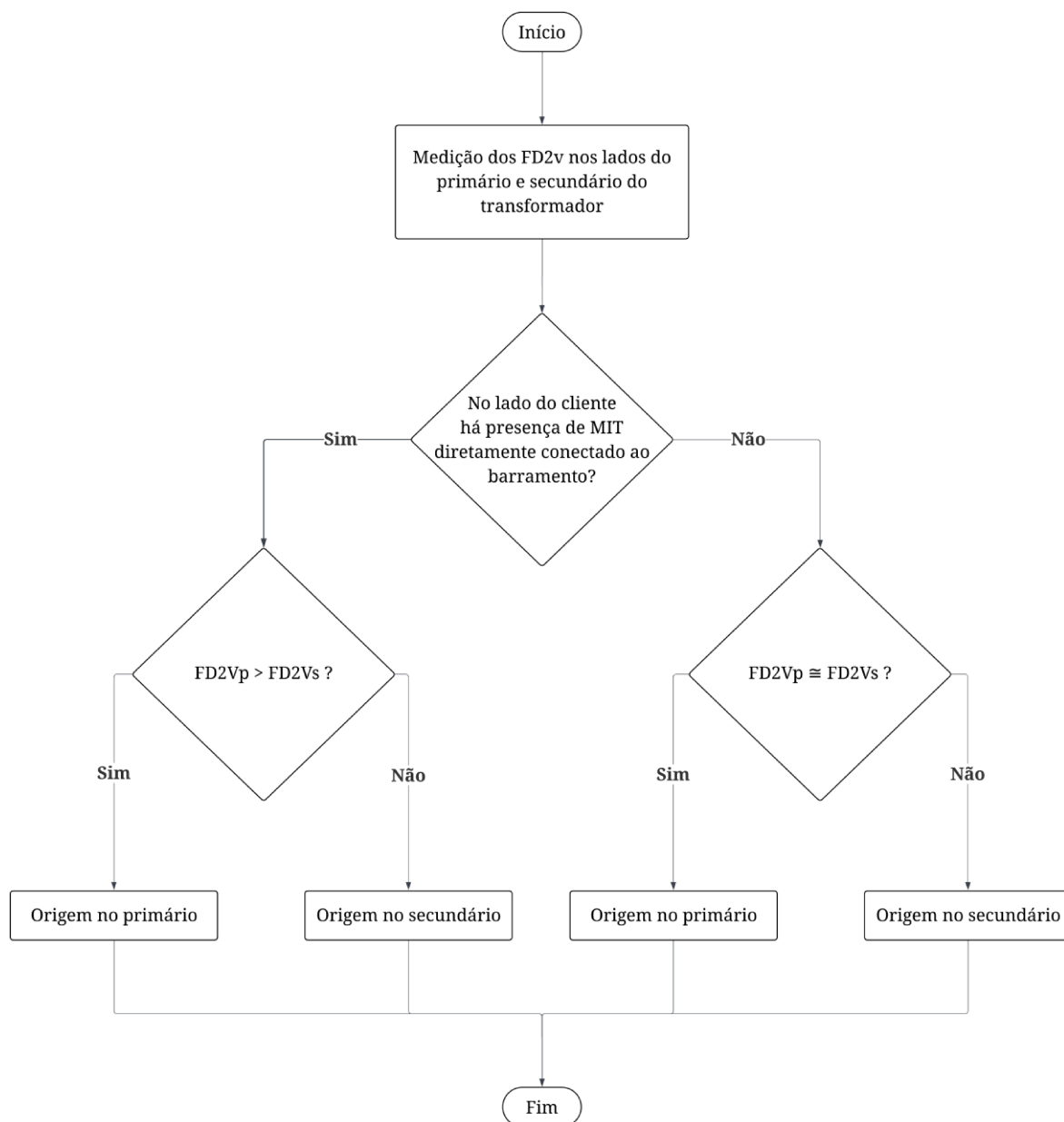
Procurando, pois, preencher aspectos relacionados com o embasamento teórico do processo, o Capítulo 2 realizou contribuições no contexto das formulações matemáticas visando contemplar a estratégia para a identificação da responsabilidade das VTCDs. Neste contexto, foram estabelecidos os fundamentos conceituais e aprofundamento das formulações matemáticas que evidenciaram, de forma técnica e científica, as bases do processo de atribuição da responsabilidade utilizando o mecanismo da transferência dos fatores de desequilíbrio, do primário para o secundário dos transformadores de conexão entre dois agentes. Vale ressaltar que, para os desenvolvimentos teóricos, a caracterização dos eventos, quanto a sua natureza e intensidades, dentre uma gama de fenômenos que poderiam produzir os eventos em pauta, a escolha recaiu sobre a ocorrência de curtos-circuitos. Estes representam, efetivamente, uma fonte expressiva para a geração das variações de tensão em foco. Assim, com base num tratamento matemático para a correlação dos fatores de desequilíbrios manifestadas de um e outro lado do transformador de interligação entre os agentes, considerando ainda, distintos tipos de falta e conexões, foi possível constatar e ratificar a lógica para a identificação do agente responsável pelo ocorrido.

Avançando, o Capítulo 3 dedicou-se à apresentação das expressões mais completas da metodologia, nas quais foram considerados consumidores com cargas híbridas, as quais, antes constituídas por elementos passivos, passou a contemplar também a presença de cargas motrizes supridas pelos agentes envolvidos no processo. Essa abordagem ampliou a abordagem da metodologia original, e representou avanços significativos, tornando-a mais abrangente e representativa das condições reais de operação dos sistemas elétricos.

No capítulo 4, a efetividade do processo foi avaliada através de estudos computacionais feitos para 4 complexos elétricos com características topológicas e paramétricas mais condizentes com os sistemas reais. Para cada arranjo, estudos diversos foram realizados culminando por constatar a aderência do método em relação às expectativas físicas esperadas em função da imposição dos pontos de incidência das ocorrências. Dentro do exposto, ficou consolidada as perspectivas promissoras para atribuir responsabilidade através do fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa. Os demais fatores, como o de sequência zero, se mostraram como indicativos complementares para assegurar a assertividade da análise. Prosseguindo, foram estabelecidas as diretrizes para a validação experimental, empregando-se, para tanto, um arranjo laboratorial em escala reduzida. Os resultados, como apresentados, mais uma vez demonstraram a aderência do desempenho do método de análise aos propósitos da pesquisa.

De forma resumida, o fluxograma apresentado na Figura 54 sintetiza as etapas a serem seguidas para a aplicação do método de identificação baseado no processo da transferência dos indicadores do fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa (FD2v). É importante destacar que, muito embora tenha sido utilizada a palavra cliente para o agente do lado secundário, este pode ser qualquer outro agente do sistema elétrico que esteja conectado à jusante do transformador em análise.

Figura 54 – Fluxograma resumo da metodologia para atribuição da responsabilidade das VTCDs através dos FD2v.



Fonte: O autor.

Do exposto segue que o objetivo desta tese foi plenamente alcançado através de uma estratégia simples e de fácil aplicação em campo, congregando facilidade para implementação através de algoritmos a serem implementados nos analisadores de qualidade da energia elétrica. De fato, em consonância com os desenvolvimentos, as formulações estabelecidas encontram-se fundamentadas, primordialmente, nas medições do fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa (FD2v), grandeza esta advinda dos registros das tensões eficazes de linha, mediante a aplicação do método do CIGRÉ para a determinação dos indicadores requeridos.

Naturalmente, a exemplo de outras pesquisas, as conquistas obtidas não significam um esgotamento das investigações próprias à temática explorada nesta tese. De fato, para a consolidação da técnica de análise, ainda se fazem necessários esforços complementares, a exemplo de:

- Avaliação da metodologia para a localização de VTCDs e de curto-circuitos em sistemas elétricos de grande porte, envolvendo ambientes industriais, comerciais, data centers, entre outros;
- Contribuições para o avanço de perspectivas regulatórias a partir dos resultados obtidos nesta tese;
- Extensão da modelagem para a incorporação de novas tecnologias envolvendo sistemas de geração e de consumo com forte predominância de cargas eletrônicas;
- Influência dos sistemas de aterramento associados com a proteção e determinações quanto as conexões de neutro a terra;
- Análise da metodologia em sistemas onde há diferentes tipos de conexões de cargas.

6 REFERÊNCIAS

- [1] L. Sathish Kumar, M. Ramanan, J. A. Alzubi, P. Jayarajan, and S. Thenmozhi, “Smart Metering Using IoT and ICT for Sustainable Seller Consumer in Smart City,” 2021, pp. 75–89. doi: 10.1007/978-3-030-70183-3_4.
- [2] P. Li, “Introductory Chapter: New Trends in Industrial Automation,” in *New Trends in Industrial Automation*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.84772.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST: MÓDULO 8 – QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA,” 2022. [Online]. Available: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf
- [4] ONS, “Submódulo 2.9: Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica,” 2022.
- [5] ONS, “Submódulo 9.7: Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica,” 2020.
- [6] M. Koli and V. Bhuriya, “Survey on Voltage Stability,” *J. Electron. Des. Technol.*, vol. 7, 2016, doi: <https://doi.org/10.37591/joedt.v7i3.4813>.
- [7] F. Sibarani, “Innovative Solution for grid-sourced power quality issues,” 2020. [Online]. Available: https://new.abb.com/docs/librariesprovider71/el-library/presentation_power-protection---indonesia-smart-grid-initiative-%2816-9%29.pdf?sfvrsn=c2f40517_4
- [8] S. Electric, “Dirty power: What it is and why you need to clean it up,” 2023. <https://blog.se.com/infrastructure-and-grid/power-management-metering-monitoring-power-quality/2023/11/30/dirty-power-what-it-is-and-why-you-need-to-clean-it-up/>
- [9] M. Khaleel, Z. Yusupov, M. Elmnifi, T. Elmenfy, Z. Rajab, and M. Elbar, “Assessing the Financial Impact and Mitigation Methods for Voltage Sag in Power Grid,” *Int. J. Electr. Eng. Sustain.*, vol. 1, pp. 10–26, 2023, doi: <https://doi.org/10.65998/ijeess.v1i3.40>.
- [10] P. K. Lim and D. S. Dorr, “Understanding and resolving voltage sag related problems for sensitive industrial customers,” in *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, vol. 4, pp. 2886–2890. doi: 10.1109/PESW.2000.847343.
- [11] N. K. Medora, A. Kusko, and M. Thompson, “Impact of line voltage sag on switch mode power supply operation,” in *2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and*

- Applications*, Jun. 2008, pp. 2178–2183. doi: 10.1109/ICIEA.2008.4582904.
- [12] Chunhong He, Feng Li, and V. K. Sood, “Static transfer switch (STS) model in EMTPWorks RV,” in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No.04CH37513)*, pp. 111–116. doi: 10.1109/CCECE.2004.1344969.
- [13] M. M. Khaleel, Z. Yusupov, M. T. Güneşer, A. A. Abulifa, A. A. Ahmed, and A. Alsharif, “The Effect of PEMFC on Power Grid Using Advanced Equilibrium Optimizer and Particle Swarm Optimisation for Voltage Sag Mitigation,” in *2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, May 2023, pp. 755–760. doi: <https://doi.org/10.65998/ijeess.v1i3.40>.
- [14] A. Sharma, B. S. Rajpurohit, and S. N. Singh, “A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, pp. 363–372, May 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.011.
- [15] B. Ganesini, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias,” Universidade Federal de Uberlândia, 2020. doi: 10.14393/ufu.di.2020.619.
- [16] A. Santos, “Uma contribuição ao processo do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas via chaveamento de unidades capacitivas,” Universidade Federal de Uberlândia, 2015. doi: 10.14393/ufu.di.2015.18.
- [17] A. Santos, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições,” Universidade Federal de Uberlândia, 2019. doi: 10.14393/ufu.te.2019.2445.
- [18] R. Gregory, “Propostas de metodologias para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos,” Universidade Federal de Uberlândia, 2020. doi: 10.14393/ufu.te.2020.725.
- [19] M. Moraes, “Uma proposta para a atribuição de responsabilidades sobre desequilíbrios de tensão através da análise de componentes independentes,” Universidade Federal de Uberlândia, 2022. doi: 10.14393/ufu.te.2022.5040.
- [20] M. De Santis, C. Noce, P. Varilone, and P. Verde, “Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, pp. 391–400, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.09.008.
- [21] V. Barrera Nunez, X. Berjaga Moliner, J. Melendez Frigola, S. Herraiz Jaramillo, J. Sanchez, and M. Castro, “Two methods for voltage sag source location,” in *2008 13th*

- International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Sep. 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICHQP.2008.4668849.
- [22] G. W. Chang, Ju-Peng Chao, H. M. Huang, Cheng-I Chen, and Shou-Yung Chu, “On Tracking the Source Location of Voltage Sags and Utility Shunt Capacitor Switching Transients,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 2124–2131, Oct. 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.923143.
- [23] S.-J. Ahn, D.-J. Won, I.-Y. Chung, and S.-I. Moon, “A New Approach to Determine the Direction and Cause of Voltage Sag,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 300–307, Sep. 2008, doi: 10.5370/JEET.2008.3.3.300.
- [24] H. Shareef, A. Mohamed, and A. A. Ibrahim, “Identification of voltage sag source location using S and TT transformed disturbance power,” *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, no. 1, pp. 83–97, Jan. 2013, doi: 10.1007/s11771-013-1463-5.
- [25] F. O. Passos, J. M. de Carvalho Filho, R. C. Leborgne, P. M. da Silveira, and P. F. Ribeiro, “An Alternative Approach to Locating Voltage Sag Source Side at the Point of Common Coupling Based on Power-Flow Information,” *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 26, no. 5, pp. 579–587, Oct. 2015, doi: 10.1007/s40313-015-0199-x.
- [26] Y. Mohammadi, R. C. Leborgne, and B. Polajžer, “Modified methods for voltage-sag source detection using transient periods,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 207, p. 107857, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107857.
- [27] L. F. B. M. DE CARVALHO, “MÉTODO BASEADO NA SIMILARIDADE DE COSSENO PARA ATRIBUIÇÃO DA DIRECIONALIDADE DAS QUEDAS DE TENSÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS,” Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/e00de5f5-d3eb-44f7-a610-1560a3c24f7f/content>
- [28] A. Ferreira, “Uma proposta metodológica para a atribuição da responsabilidade das VTCDs baseada na correlação dos fatores de desequilíbrio,” Universidade Federal de Uberlândia, 2021. doi: 10.14393/ufu.di.2021.377.
- [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. doi: <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] P. H. O. Rezende and MILTON ITSUO SAMESIMA, “EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES DE SUPRIMENTOS NOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO,” *Horiz. Científico*, vol. 6, 2013, [Online]. Available: <https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/4473>
- [33] Fluke, *Fluke 434-II/435-II/437-II: Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos - Manual do Usuário*. 2012.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] L. C. Zanetta, *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. Brasil: Livraria da Física, 2008.
- [38] N. Kagan, *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência: Componentes Simétricas*, 2nd ed. Brasil: Blucher, 2000.
- [39] J. W. Resende, *Apostila: Análise de Sistemas de Energia Elétrica*. Uberlândia - Brasil.
- [40] ANEEL, “Base de Dados Geográfica da Distribuidora - BDGD,” 2025. <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/base-de-dados-geografica-da-distribuidora-bdgd> (accessed Dec. 01, 2025).
- [41] J. M. Filho, *Instalações Elétricas Industriais*, 9ª. LTC, 2017.
- [42] C. Mardegan, “Curto-Circuito para a Seletividade,” in *O Setor Elétrico*, p. 7.
- [43] M. D. Teixeira, “Materiais de Aula sobre o Tema: TE 991 Tópicos em Qualidade de Energia - Cap. 6 – Desequilíbrio de tensão e corrente.” UFPR, p. 30.
- [44] J. Rubens, “Alimentador real de média tensão,” 2021. <http://www.jrubens.eng.br/download/AMT1.pdf> (accessed Feb. 15, 2023).
- [45] USP, “Conteúdo: Modelagem de Sistemas Elétricos.” [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4374278/mod_resource/content/1/Aula Carlos](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4374278/mod_resource/content/1/Aula%20Carlos)

- Modelagem regime.pdf (accessed Feb. 15, 2024).
- [46] I. Papic *et al.*, “A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 1, pp. 23–31, Feb. 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2817542.
- [47] Á. C. P. Pacheco, A. R. Ferreira, J. J. C. Tavares, I. N. Santos, J. C. De Oliveira, and P. H. O. Rezende, “Um estudo de caso associado com a aplicação da metodologia para atribuição da responsabilidade das VTCDS em um complexo de transmissão em HVDC,” *Obs. LA Econ. Latinoam.*, vol. 21, no. 9, pp. 14410–14424, Sep. 2023, doi: 10.55905/oelv21n9-209.
- [48] G. T. Silva, C. R. A. Junior, J. C. Oliveira, A. C. Souza, and I. N. Santos, “Computational implementation of the Rio madeira HVDC System,” in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, May 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395770.

Anexo I – Produtos Gerados

A pesquisa realizada gerou os seguintes produtos diretos e indiretos:

- Trabalho publicado em periódico internacional:
 1. **FERREIRA, ADRIAN RIBEIRO**; GIANESINI, BARBARA MORAIS; OLIVEIRA, JOSE CARLOS DE; REZENDE, PAULO HENRIQUE OLIVEIRA. An Approach for Assigning Responsibilities of Short-Term Voltage Variations in Electrical Power Systems. IEEE Access Citações: 3 |, v. 11, p. 7751-7758, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237921>.
- Trabalhos publicados em eventos científicos e periódicos nacionais:
 2. **FERREIRA, A. R.**; REZENDE, P. H. O. ; OLIVEIRA, J. C. . Avaliação da Metodologia para Atribuição de Responsabilidade das VTCDs baseada na Análise dos Fatores de Desequilíbrio: Aplicação no Arranjo IEEE-BTS HCD. In: XVI Conferência Brasileira sobre a Qualidade da Energia Elétrica, 2025, Uberlândia - MG. Anais da XVI Conferência Brasileira sobre a Qualidade da Energia Elétrica, 2025. DOI: 10.5224/00.2025.3715406
 3. PACHECO, ÁBNER CÉZAR PERES ; **FERREIRA, ADRIAN RIBEIRO** ; TAVARES, JOSÉ JORGE CORRÊA ; SANTOS, IVAN NUNES ; DE OLIVEIRA, JOSÉ CARLOS ; REZENDE, PAULO HENRIQUE OLIVEIRA . Um estudo de caso associado com a aplicação da metodologia para atribuição da responsabilidade das VTCDs em um complexo de transmissão em HVDC. OBSERVATORIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, v. 21, p. 14410-14424, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-209>.
 4. Pacheco, A. C. P. ; **FERREIRA, A. R.** ; TAVARES, J. J. C. ; SANTOS, I. N. ; OLIVEIRA, J. C. ; REZENDE, P. H. O. . Estudo de Caso Associado com a Metodologia para Atribuição da Responsabilidade das VTCDs baseada no Fator de Desequilíbrio de Tensão. In: IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE 2022, 2022, Santa Maria-RS. IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2022, 2022. <https://doi.org/10.20906/sbse.v2i1.3105>.
 5. **FERREIRA, A. R.**; OLIVEIRA, J. C. ; REZENDE, P. H. O. . Uma Proposta para a Identificação da Responsabilidade das VTCDs Através da Transferência dos Indicadores de Desequilíbrios nos Transformadores de Conexão. In: CBQEE 2021 - XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2021, Foz do Iguaçu-PR, Brasil. CBQEE 2021 - XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2021. DOI: 10.17648/cbqee-2021-130566.
 6. **FERREIRA, Adrian Ribeiro**; OLIVEIRA, José Carlos De; REZENDE, Paulo Henrique Oliveira. Perspectivas de estratégias para a identificação da origem das Variações de Tensão de Curta Duração. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/perspectivas-de-estrategias-para-a-identificacao-da-origem-das-variacoes-de-tensao-de-curta-duracao/>>. Acesso em: 25 jan 2026.