



**ANÁLISE DO IMPACTO DE TRANSITÓRIOS DE
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS
SOBRE O DESEMPENHO DAS PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA
TD21 E PH21**

EDSON DE ASSIS CUSTÓDIO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DO IMPACTO DE TRANSITÓRIOS DE
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS
SOBRE O DESEMPENHO DAS PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA
TD21 E PH21**

Edson de Assis Custódio

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UNB
(PRESIDENTE DA COMISSÃO/ORIENTADOR)

FERNANDO CARDOSO MELO, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)

DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, Dr., UFCG
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília/DF, 29 de Novembro de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

CUSTÓDIO, EDSON DE ASSIS

Análise do Impacto de Transitórios de Transformadores de Potencial Capacitivos sobre o Desempenho das Proteções de Distância TD21 E PH21. [Distrito Federal] 2019.

xvi, 191p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado, 2019).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Faltas em Linhas de Transmissão | 2. Proteção no Domínio do Tempo |
| 3. Transformadores de Potencial Capacitivos | 4. Grandezas Incrementais |
| 5. T400L | 6. 411L |
| 7. Transitórios Eletromagnéticos | |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CUSTÓDIO, E. A. (2019). Análise do Impacto de Transitórios de Transformadores de Potencial Capacitivos sobre o Desempenho das Proteções de Distância TD21 E PH21. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-731/2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 191p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Edson de Assis Custódio

TÍTULO: Análise do Impacto de Transitórios de Transformadores de Potencial Capacitivos sobre o Desempenho das Proteções de Distância TD21 E PH21.

GRAU: Mestre ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Edson de Assis Custódio

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Eng. Elétrica (ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

*À Deus e à minha querida esposa Jessica, verdadeira companheira e amor da minha vida,
DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus pelo dom da vida e pelas possibilidades disponibilizadas gratuitamente.

À minha esposa, Jessica, pelo apoio incondicional e paciência durante o decorrer deste projeto.

Aos meus pais, Vani e Edson, por todo cuidado, carinho e dedicação dispensados desde sempre.

Às minhas irmãs, Deisi e Giovanna, por estarem ao meu lado e me apoiarem em todos os momentos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Felipe Vigolvino Lopes, pelos ensinamentos e instruções, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Aos professores Damásio e Fernando pela excelente revisão.

Aos colegas do Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos da Universidade de Brasília - LAPSE, pelas contribuições para este projeto, em especial ao amigo Tiago Honorato.

À Universidade de Brasília, professores e colaboradores, que possibilitaram, direta ou indiretamente, a realização deste trabalho.

Ao Banco do Brasil, nas figuras dos gerentes Luiz Henrique e Marcos Leles, pelo incentivo e apoio ao aprimoramento de seus funcionários.

Edson de Assis Custódio

RESUMO

Neste trabalho é avaliado o impacto dos transitórios provenientes dos transformadores de potencial capacitivos (TPC) nas funções de proteção de distância no domínio do tempo, TD21, e da frequência, PH21, por meio de ensaios em equipamentos reais. Avalia-se o desempenho destas funções de proteção frente aos transitórios provenientes dos TPC sob diversos cenários de falta e operação, como resistência de falta, relação entre a impedância da fonte e a impedância da linha (*Source-to-line Impedance Ratio-SIR*), ângulo de incidência da falta e carregamento do sistema. Para tanto, são aplicadas faltas monofásicas em uma linha de transmissão de 230 kV/60 Hz modelada no software *Alternative Transient Program* (ATP) utilizando dados de um sistema real brasileiro. São avaliados três modelos de TPC disponíveis na literatura, comparando os resultados de atuação das funções de proteção para cada modelo de TPC estudado com os obtidos quando do uso de tensões primárias do sistema elétrico. Diante dos resultados obtidos, demonstra-se por meio de ensaios em relés microprocessados reais que o uso das tensões secundárias dos diferentes TPC estudados alteram a resposta das funções de proteção de distância baseadas nas análises de fasores ou de valores instantâneos no domínio do tempo, sendo eles os tempos de operação e o alcance máximo obtido.

Palavras-chave: ATP, linhas de transmissão, proteção de distância, fasores fundamentais, proteção no domínio do tempo, TD21, PH21, transformadores de potencial capacitivos.

ABSTRACT

In this study is evaluated the impact of the transients from coupling-capacitor voltage transformers (CCVT) on distance protection functions in time domain, TD21, and frequency domain, PH21, through real equipment tests. The performance of these protection functions, against the transients from the CCVT, is evaluated under various fault and operation scenarios, such as fault resistance, Source-to-line Impedance Ratio (SIR), fault distance, inception angle and system loading. For this purpose, single phase faults are applied to a 230 kV / 60 Hz transmission line modeled in the Alternative Transient Program (ATP) software using data from a real Brazilian system. Three CCVT models available in the literature are evaluated, comparing the performance of the protective functions for each CCVT model studied with those obtained when using scaled primary voltages of the electrical system. In regard of the obtained results, it is demonstrated, by real microprocessor relay tests, that the use of secondary voltages of the different studied CCVT influences the performance of the distance protection functions based on phasor analysis or time domain instantaneous values, by altering operating time and maximum reach.

Keywords: ATP, transmission lines, fundamental phasors, protection in time domain, TD21, PH21, coupling-capacitor voltage transformers.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Glossário	xvii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Objetivos do Trabalho	3
1.3 Contribuições da Dissertação	3
1.4 Publicações	3
1.5 Organização do Texto	4
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 Influência dos TPC em Funções de Proteção Fasoriais	7
2.2 Influência dos TPC em Funções de Proteção no Domínio do Tempo	9
2.3 Síntese do Capítulo	11
Capítulo 3 – Funções de Proteção de Distância de LT	14
3.1 Proteção de Distância Fasorial	15
3.1.1 Estimação Fasorial	15
3.1.1.1 Algoritmo de Fourier de Um Ciclo	16
3.1.1.2 Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo	17
3.1.1.3 Resposta em Frequência dos Algoritmos de Estimção Fasorial .	18
3.1.2 Malhas (<i>Loops</i>) de Falta	20
3.1.3 Diagrama R-X	20
3.1.4 Função Fasorial de Distância Mho PH21	21

3.2	Proteção de Distância no Domínio do Tempo	22
3.2.1	Grandezas Incrementais	22
3.2.2	Relação entre Correntes e Tensões no Domínio do Tempo	25
3.2.3	Considerações a Respeito dos <i>Loop</i> de Falta	27
3.2.4	Função Incremental de Distância TD21	28
3.2.5	Considerações sobre a Tensão de Restrição	33
3.3	Síntese do Capítulo	35
Capítulo 4 – Transformadores de Potencial Capacitivos		36
4.1	Estrutura dos TPC	37
4.2	Modelos Avaliados	40
4.2.1	TPC TRENCH 230 kV/60 Hz	41
4.2.2	TPC HAEFELY 230 kV/60 Hz	44
4.2.3	TPC IEEE 230 kV/60 Hz	47
4.2.4	Síntese do Capítulo	49
Capítulo 5 – Análise dos Resultados		50
5.1	Sistema Testado e Metodologia dos Testes	50
5.2	Considerações sobre o Relé T400L	54
5.3	Variação da Resistência de Falta	55
5.3.1	Resultados T400L	61
5.3.1.1	Alcance da Função TD21	61
5.3.1.2	Subalcance Devido às Tensões do TPC HAEFELY	62
5.3.1.3	Sobrealcance Devido às Tensões do TPC IEEE	66
5.3.1.4	Subalcance Devido às Tensões do TPC IEEE	69
5.3.1.5	Tempo de Atuação da Função TD21	73
5.3.2	Resultados 411L	75
5.3.2.1	Alcance da Função PH21	76
5.3.2.2	Tempo de Atuação da Função PH21	77
5.4	Variação do <i>Source-to-line Impedance Ratio</i> (SIR)	79
5.4.1	Resultados T400L	93
5.4.1.1	Alcance da Função TD21	93
5.4.1.2	Sobrealcance Devido às Tensões do TPC TRENCH	95
5.4.1.3	Subalcance Devido às Tensões do TPC TRENCH	98
5.4.1.4	Sobrealcance Devido às Tensões do TPC HAEFELY	101
5.4.1.5	Subalcance Devido às Tensões do TPC HAEFELY	105
5.4.1.6	Subalcance Devido às Tensões do TPC IEEE	108

5.4.1.7	Tempo de Atuação da Função TD21	112
5.4.2	Resultados 411L	115
5.4.2.1	Alcance da Função PH21	116
5.4.2.2	Tempo de Atuação da Função PH21	117
5.5	Variação do Ângulo de Incidência	120
5.5.1	Resultados T400L	124
5.5.1.1	Alcance da Função TD21	124
5.5.1.2	Sobrealcance Devido às Tensões do TPC TRENCH	126
5.5.1.3	Subalcance Devido às Tensões do TPC HAEFELY	127
5.5.1.4	Subalcance Devido às Tensões do TPC IEEE	129
5.5.1.5	Tempo de Atuação da Função TD21	133
5.5.2	Resultados 411L	136
5.5.2.1	Alcance da Função PH21	136
5.5.2.2	Tempo de Atuação da Função PH21	137
5.6	Variação do Carregamento	139
5.6.1	Resultados T400L	144
5.6.1.1	Alcance da Função TD21	144
5.6.1.2	Sobrealcance Devido às Tensões do TPC TRENCH	144
5.6.1.3	Sobrealcance Devido às Tensões do TPC HAEFELY	146
5.6.1.4	Sobrealcance Devido às Tensões do TPC IEEE	147
5.6.1.5	Subalcance Devido às Tensões do TPC IEEE	147
5.6.1.6	Tempo de Atuação da Função TD21	148
5.6.2	Resultados 411L	151
5.6.2.1	Alcance da Função PH21	151
5.6.2.2	Tempo de Atuação da Função PH21	152
5.7	Avaliação Geral dos Resultados Obtidos	154
5.8	Síntese do Capítulo	158
Capítulo 6 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros		159
Referências Bibliográficas		164

LISTA DE FIGURAS

3.1	Princípio de janelamento.	16
3.2	Resposta em frequência dos filtros H_{RE} e H_{IM} referentes ao algoritmo de Fourier de um ciclo.	19
3.3	Resposta em frequência dos filtros H_{RE} e H_{IM} referentes ao algoritmo de Fourier de meio ciclo.	19
3.4	Diagrama R-X.	21
3.5	Ilustração do princípio da superposição para análise de um curto-circuito.	23
3.6	Corrente de um sistema sob falta, de pré-falta e de falta para um curto-circuito da fase A à terra em 5% de uma linha de 200 km e 230 kV.	24
3.7	Sistema fictício com duas fontes e uma linha para análise de falta no ponto F.	25
3.8	Sistema de falta para análise das grandezas incrementais.	25
3.9	Sistema elétrico fictício.	29
3.10	Diagrama de tensão para falta dentro da zona de proteção.	29
3.11	Diagrama de tensão para falta fora da zona de proteção.	30
3.12	Região de operação da função TD21: (a) Falta legítima, e (b) Evento de chaveamento.	31
3.13	Diagrama lógico simplificado da função TD21 para o <i>loop</i> de falta AG.	32
3.14	Operação do elemento de distância TD21 conforme (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2016).	33
3.15	Operação do elemento de distância TD21 conforme SHARMA & MYNAM (2018).	34
3.16	Operação do elemento de distância TD21 conforme SHARMA & MYNAM (2018).	34
3.17	Operação do elemento de distância TD21 conforme METZGER <i>et al.</i> (2018).	35

4.1	Custo de Transformadores de Potencial em Função da Tensão Nominal.	37
4.2	Sistema de Transmissão Brasileiro - Horizonte 2019.	38
4.3	Esquemático do (a) TPI, e (b) TPC.	38
4.4	Esquema Simplificado do TPC.	39
4.5	Circuito equivalente do TPC Trench TEM230H.	41
4.6	Resposta em frequência do TPC TRENCH.	42
4.7	Resposta dinâmica do TPC para uma falta no ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90°	43
4.8	Resposta dinâmica do TPC para uma falta em uma LT 20 km a frente do ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90°	44
4.9	Circuito equivalente do TPC Haefely CVE230.	44
4.10	Resposta em frequência do TPC HAEFELY.	45
4.11	Resposta dinâmica do TPC para uma falta no ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90°	46
4.12	Resposta dinâmica do TPC para uma falta em uma LT 20 km a frente do ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90°	46
4.13	Circuito equivalente do TPC IEEE.	47
4.14	Resposta em frequência do TPC IEEE.	48
4.15	Resposta dinâmica do TPC para uma falta no ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90°	48
4.16	Resposta dinâmica do TPC para uma falta em uma LT 20 km a frente do ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90°	49
5.1	Esquema simplificado da bancada de testes	51
5.2	Esquema simplificado da bancada de testes.	53
5.3	Tensão medida pelo relé sem o uso de TPC, para diferentes valores de resistência de falta.	57

5.4	Tensão medida pelo relé com o uso do TPC TRENCH, para diferentes valores de resistência de falta.	57
5.5	Tensão medida pelo relé com o uso do TPC HAEFELY, para diferentes valores de resistência de falta.	58
5.6	Tensão medida pelo relé com o uso do TPC IEEE, para diferentes valores de resistência de falta.	58
5.7	Corrente medida pelo relé para diferentes valores de resistência de falta.	59
5.8	Comparação das tensões utilizadas nos ensaios, para uma falta em 50% da LT com resistência de falta de 10 Ω	60
5.9	Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.8.	60
5.10	Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.	62
5.11	Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 15 Ω	63
5.12	Comparação entre as tensões de restrição estimada para uma falta em 55% da LT para resistência de falta de 15 Ω	63
5.13	Comparação para uma falta em 55% da linha e um valor de resistência de falta de 15 Ω . (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.	65
5.14	Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 45 Ω	65
5.15	Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 25 Ω	66
5.16	Diferença entre os módulos da tensão de operação para o caso de tensões primárias e do TPC IEEE, para falta com resistência de falta de 25 Ω	67
5.17	Comparação entre as tensões de restrição estimada para uma falta em 50% da LT para resistência de falta de 25 Ω	69
5.18	Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 0 Ω	70
5.19	Diferença entre os módulos da tensão de operação para o caso de tensões primárias e IEEE, para falta em 60% da LT e resistência de falta de 0 Ω	71

5.20	Comparação entre as tensões de operação para diferentes valores de resistência e locais de falta.	72
5.21	Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.	73
5.22	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.	74
5.23	Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.	76
5.24	Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.	77
5.25	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.	78
5.26	Sistema fictício.	80
5.27	Sistema fictício no domínio de sequência para um curto-circuito AT.	81
5.28	Sistema fictício.	82
5.29	Valor da corrente I_A para uma falta em 50% da LT, com SIR_1 variando e o SIR_2 fixo.	83
5.30	Valor da corrente \hat{I}_A para uma falta em 50% da LT, com SIR_2 variando e o SIR_1 fixo.	84
5.31	Tensão medida sem o uso de TPC pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.	85
5.32	Tensão medida com o uso do TPC TRENCH pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.	85
5.33	Tensão medida com o uso do TPC HAEFELY pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.	86
5.34	Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.	86
5.35	Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 2,0.	87

5.36	Tensão medida sem o uso de TPC pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.	88
5.37	Tensão medida com o uso do TPC TRENCH pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.	88
5.38	Tensão medida com o uso do TPC HAEFELY pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.	89
5.39	Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.	89
5.40	Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 2,0.	90
5.41	Corrente medida pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.	91
5.42	Corrente medida pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.	91
5.43	Comparação das tensões utilizadas nos ensaios, para uma falta em 50% da linha com o SIR da fonte 1 e 2 iguais a 0,1.	92
5.44	Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.43.	93
5.45	Alcance obtido para diferentes valores de SIR	94
5.46	Tensão de operação para uma falta em 50% da LT para diferentes valores de SIR_1 e SIR_2 igual à 2,0.	95
5.47	Comparação entre as tensões de operação para um SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente.	96
5.48	Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 40% da linha e um SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente.	97
5.49	Comparação para uma falta em 40% da linha e um SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso TRENCH e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso TRENCH e sem TPC.	98

5.50	Comparação entre as tensões de operação para um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.	99
5.51	Comparação para uma falta em 60% da linha e um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso TRENCH e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso TRENCH e sem TPC.	100
5.52	Comparação para uma falta em 50% da linha e um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 para ambos os casos: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso TRENCH e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso TRENCH e sem TPC.	101
5.53	Comparação entre as tensões de operação para um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente.	102
5.54	Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente.	103
5.55	Comparação para uma falta em 55% da linha e um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.	104
5.56	Comparação para uma falta em 45% da linha e um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.	105
5.57	Comparação entre as tensões de operação para um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0, respectivamente.	106
5.58	Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um <i>SIR</i> da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0, respectivamente.	107

5.59	Comparação para uma falta em 60% da linha e um SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.	108
5.60	Comparação entre as tensões de operação para um SIR da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.	109
5.61	Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.	110
5.62	Comparação entre as tensões de operação para um SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.	111
5.63	Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.	111
5.64	Tempos de atuação para diferentes valores de SIR	112
5.65	Tempos de atuação para diferentes valores de SIR	113
5.66	Tensões de operação para diferentes valores de SIR_1	114
5.67	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de SIR	115
5.68	Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.	117
5.69	Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.	118
5.70	Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.	118
5.71	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.	119
5.72	Circuito RL.	121
5.73	Tensões e correntes para diferentes valores de ângulo de incidência θ	122
5.74	Comparação das tensões utilizadas nos ensaios para diferentes valores de ângulo de incidência θ	123
5.75	Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.74.	124

5.76	Alcance obtido para diferentes valores de ângulo de incidência.	125
5.77	Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 120^\circ$	126
5.78	Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\theta = 120^\circ$	127
5.79	Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 0^\circ$	128
5.80	Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\theta = 0^\circ$	129
5.81	Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 45^\circ$	130
5.82	Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 0^\circ$	131
5.83	Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\theta = 0^\circ$	131
5.84	Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 60^\circ$	132
5.85	Tempos de atuação para diferentes valores de ângulo de incidência.	133
5.86	Tempos de atuação para diferentes valores de ângulo de incidência.	134
5.87	Comparação entre as tensões de operação para diferentes valores do ângulo de incidência da falta.	135
5.88	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de ângulo de incidência.	135
5.89	Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.	137
5.90	Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.	138
5.91	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.	138
5.92	Tensão medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência indo da barra Local para a Remota.	140
5.93	Tensão medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência vindo da barra Remota para a Local.	141
5.94	Corrente medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência indo da barra Local para a Remota.	142
5.95	Corrente medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência vindo da barra Remota para a Local.	142

5.96	Comparação das tensões utilizadas nos ensaios, para uma falta em 50% da LT com $\delta = -5^\circ$	143
5.97	Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.96.	143
5.98	Alcance obtido para diferentes valores de ângulo de incidência.	145
5.99	Comparação entre as tensões de operação para $\delta = -25^\circ$	145
5.100	Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\delta = -25^\circ$	146
5.101	Comparação entre as tensões de operação para diferentes valores de δ , para uma falta em 55% da LT e uso das tensões do TPC IEEE.	148
5.102	Comparação entre as tensões de restrição estimada para diferentes valores de δ , para uma falta em 55% da LT e uso das tensões do TPC IEEE.	149
5.103	Comparação entre as tensões de restrição estimada para diferentes valores de δ , para uma falta em 55% da LT e uso das tensões do TPC IEEE.	149
5.104	Tempos de atuação para diferentes valores de carregamento.	150
5.105	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de carregamento.	150
5.106	Alcance obtido para diferentes valores de carregamento.	152
5.107	Tempos de atuação para diferentes valores de carregamento.	153
5.108	Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de carregamento.	153
5.109	Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de resistência de falta.	154
5.110	Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de SIR das fontes 1 e 2.	155
5.111	Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de ângulo de incidência θ	156
5.112	Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes condições de carregamento.	157

LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros da LT.	11
2.2	Parâmetros da LT.	12
3.1	Valores de tensão e corrente utilizados nos cálculos das unidades de impedância.	20
3.2	Valores de tensão e corrente utilizados nos cálculos das unidades de impedância.	28
5.1	Parâmetros da LT.	51
5.2	Dados do circuito equivalente de Thévenin.	51
5.3	Resumo dos casos analisados.	54

LISTA DE SÍMBOLOS

\mathbf{A}	Número complexo qualquer.
\mathbf{A}^*	Conjugado de um número complexo qualquer.
$Im(A)$	Parte imaginária de \mathbf{A} .
$Re(A)$	Parte real de \mathbf{A} .
m	Distância em p.u. entre a falta e o terminal local.
F	Ponto de falta.
$x(t)$	Sinal no domínio do tempo contínuo.
f	Frequência fundamental do sinal.
T	Período fundamental do sinal.
ω	Frequência angular fundamental do sinal.
n	Ordem da componente harmônica do sinal.
Y_{cn}	Parte real da n-ésima harmônica do sinal.
Y_{sn}	Parte imaginária da n-ésima harmônica do sinal.
A_n	Amplitude do fasor da n-ésima harmônica do sinal.
φ_n	Fase do fasor da n-ésima harmônica do sinal.
x_k	k-ésima amostra do sinal $x(t)$ no domínio do tempo discreto.
N	Número de amostras em um ciclo da frequência fundamental do sinal.
h_c	Filtro relacionado à parte real do fasor.
h_{ck}	k-ésimo coeficiente do filtro h_c relacionado à parte real do fasor.

h_s	Filtro relacionado à parte imaginária do fasor.
h_{sk}	k-ésimo coeficiente do filtro h_s relacionado a parte imaginária do fasor.
H_{RE}	Parte real do filtro de estimação fasorial.
H_{IM}	Parte imaginária do filtro de estimação fasorial.
K_0	Fator compensação de sequência zero.
V_a	Fasor da tensão na fase A.
V_b	Fasor da tensão na fase B.
V_c	Fasor da tensão na fase C.
I_a	Fasor da corrente na fase A.
I_b	Fasor da corrente na fase B.
I_c	Fasor da corrente na fase C.
Z_R	Impedância aparente vista pelo relé.
r_R	Parte real da impedância aparente vista pelo relé.
x_R	Parte imaginária da impedância aparente vista pelo relé.
θ_R	Ângulo da impedância aparente vista pelo relé.
V_{LOOP}	Fasor da tensão de loop dos comparadores que implementam a característica de operação do relé.
V_{pol}	Fasor da tensão de polarização dos comparadores que implementam a característica de operação do relé.
I_{LOOP}	Fasor da corrente de loop dos comparadores que implementam a característica de operação do relé.
Z_{L1}	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
S_{pol}	Valor de polarização utilizado pelos comparadores que implementam a característica de operação do relé.
$\Delta S(t)$	Grandeza incremental de um sinal.
R	Resistência.
L	Indutância.

C	Capacitância.
X	Reatância.
f_{IZ}	Função réplica utilizada para cálculo da corrente réplica.
V_{PRE}	Tensão de pré-falta.
V_{OP}	Tensão de operação da função TD21.
V_{RT}	Tensão de restrição da função TD21.
PR	Para-raios.
Z_b	Carga (burden).
E_S	Fonte do circuito equivalente de Thévenin local.
E_L	Fonte do circuito equivalente de Thévenin remoto.
θ	Ângulo de incidência da falta.
δ	Ângulo de carregamento da LT.
R_F	Resistência de falta.

GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BGE	<i>Baltimore Gas and Electric Company</i>
CSF	Circuito Supressor de Ferroressonância
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PLC	<i>Power Line Carrier</i>
p.u.	Por unidade
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SIR	<i>Source-to-line Impedance Ratio</i>
TC	Transformador de Corrente
TDR	<i>Time-Domain Record</i>
TI	Transformadores para Instrumentos
TP	Transformador de Potencial
TPC	Transformadores de Potencial Capacitivos
TPI	Transformador de Potencial Indutivo
TPR	Transformador de Potencial Resistivo
UnB	Universidade de Brasília

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Vê-se atualmente um aumento na demanda por energia elétrica bem como no nível de exigência dos consumidores e dos órgãos reguladores. Em casos nos quais os centros geradores se encontram afastados dos centros consumidores e considerando a crescente demanda por parte da sociedade, tem sido necessária a transmissão de grandes quantidades de energia elétrica por meio dos sistemas de transmissão. Assim, para um aumento na transferência de energia sem comprometimento da estabilidade dos sistemas, algumas soluções podem ser utilizadas, como por exemplo, a compensação série capacitiva, a construção de novas linhas de transmissão (LT) e a diminuição dos tempos de atuação dos sistemas de proteção (KUNDUR *et al.*, 1994).

O desenvolvimento e aumento da disponibilidade de recursos digitais empregados em sistemas elétricos de potência têm propiciado a melhoria dos sistemas de proteção, tornando-os mais rápidos e confiáveis. O intuito principal do sistema de proteção é o de eliminar o defeito. Dessa forma, os sistemas de proteção devem atuar isolando os componentes defeituosos, o mais rápido possível, evitando assim a propagação dos efeitos da falta e reduzindo os danos ocasionados. A proteção convencional aplicada no domínio da frequência se baseia na análise de fasores fundamentais de tensão e corrente, e apresenta tempos de operação da ordem de 0,5 a 1,5 ciclos fundamentais (SCHWEITZER; HOU, 1993). Isto ocorre devido à necessidade do janelamento de dados para estimação das grandezas fasoriais na frequência fundamental (SCHWEITZER; HOU, 1993). Sendo assim, os tempos de operação das proteções convencionais devem ser considerados no cálculo do ponto de operação da rede elétrica, visando garantir a estabilidade do sistema (KUNDUR *et al.*, 1994). Portanto, a potência elétrica máxima transmitida em uma linha é muitas vezes limitada para garantir a estabilidade da rede elétrica, devido principalmente aos tempos de operação da proteção fasorial (KUNDUR *et al.*, 1994), (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

A redução dos tempos de eliminação de falhas em LT possibilita um aumento das margens de estabilidade do sistema e, conseqüentemente, ocorre a transferência de uma maior quantidade de energia de forma segura (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Assim, funções de proteção baseadas em análises no domínio do tempo podem ser utilizadas para diminuição dos tempos de eliminação de faltas, melhorando as margens de estabilidade da rede elétrica durante curtos-circuitos mais severos (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Considerando que informações de tensão são utilizadas tanto na proteção no domínio da frequência quanto na proteção no domínio do tempo, e sabendo que em sistemas de alta tensão as tensões são usualmente medidas por transformadores de potencial capacitivos (TPC), faz-se necessária a avaliação da influência destes equipamentos sobre as funções de proteção disponíveis em relés microprocessados reais (LOPES *et al.*, 2016). Na frequência fundamental, os TPC apresentam resposta em frequência com ganho unitário e ângulo de fase nulo. Porém, durante curtos-circuitos, devido ao armazenamento de energia em seus componentes internos, o TPC possui uma resposta dinâmica que culmina em distorções nas tensões secundárias, as quais têm forma de onda que difere dos sinais primários a serem de fato medidos. Essas distorções podem afetar o desempenho de funções de proteção que dependem da análise de tensões (LOPES *et al.*, 2016).

A proteção de distância é o tipo de função mais utilizada para LT. Este tipo de proteção foi introduzida por volta de 1920 e desde então tem-se desenvolvido, passando dos elementos de discos, nos relés eletromecânicos, aos circuitos integrados nos relés estáticos, chegando à proteção numérica com os relés microprocessados. Este tipo de proteção opera baseando-se na comparação da distância da falta até o local de medição, operando para casos em que a falta esteja dentro do alcance ajustado.

Neste trabalho, analisa-se a proteção de distância TD21 no domínio do tempo, que se baseiam em grandezas incrementais e valores instantâneos das tensões e correntes do sistema, não sendo necessária a estimação de fasores (SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018; GUZMAN *et al.*, 2017). Também, é realizada a comparação entre os resultados obtidos pela função TD21 com os resultados obtidos pela função de proteção de distância fasorial PH21. A função no domínio do tempo está disponível no relé SEL-T400L e apresenta tempos médios de operação de poucos milissegundos (SCHWEITZER *et al.*, 2016). Já a função no domínio fasorial está

presente no relé SEL-411L, apresentando tempos médios de operação de 1 ciclo.

Apesar de alguns trabalhos na literatura já terem avaliado preliminarmente o impacto de TPC sobre funções de proteção no domínio da frequência, são escassos os estudos que apresentem esta avaliação considerando dispositivos reais, especialmente considerando também funções de proteção no domínio do tempo. Assim, tratando-se de uma tecnologia nova no mercado, a avaliação da função TD21 realizando ensaios diretamente no relé SEL-T400L possibilita um melhor entendimento do potencial e limitações destes tipos de proteção, comparando o seu desempenho com a proteção fasorial de distância PH21, disponível no relé SEL-411L.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal desta dissertação é avaliar o impacto dos transitórios provenientes dos transformadores de potencial capacitivos nas funções de proteção de distância no domínio do tempo e da frequência por meio de ensaios em equipamentos reais.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Na dissertação é realizada a avaliação das funções de proteção no domínio fasorial e do tempo frente aos transitórios dos TPC, com uma grande variedade de cenários de falta e ensaiados equipamentos de proteção reais, comparando-se o resultado das atuações destes equipamentos que utilizam funções de proteção no domínio da frequência e do tempo quando submetidos às tensões primárias e secundárias de três tipos diferentes de TPC.

1.4 PUBLICAÇÕES

Os estudos realizados para elaboração desta dissertação proporcionaram a publicação dos artigos elencados abaixo:

- CUSTODIO, E. A.; LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G. Análise da Influência da Resposta Transitória de TPC sobre Funções de Proteção Aplicadas no Domínio do Tempo. XII Conferência Brasileira Sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE), Curitiba-PR, 2017.

- CUSTODIO, E. A.;LOPES, F. V.;RIBEIRO, J. P. G. CCVT impact on the TD21 function security. 2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasília-DF, 2017.
- CUSTODIO, E. A.;LOPES, F. V.;RIBEIRO, J. P. G; HONORATO, T. R. Avaliação da Influência da Resposta Transitória de TPCs Sobre Funções de Proteção Aplicadas nos Domínios da Frequência e do Tempo. XVIII Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRE, Foz do Iguaçu-PR, 2019.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado como segue:

- No Capítulo 2 é realizado um levantamento dos principais trabalhos consultados para elaboração deste trabalho. O levantamento aborda a modelagem de TPC além da influência que os TPC têm sobre funções de proteção no domínio fasorial e do tempo.
- No Capítulo 3 são abordados os conceitos básicos da proteção de distância de LT, considerando a proteção no domínio fasorial e do tempo.
- No Capítulo 4 são apresentados os conceitos básicos dos Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC). Juntamente com o capítulo 3, esses conceitos proporcionam a base teórica para análise dos resultados.
- No Capítulo 5 é apresentada a bancada de testes utilizada para levantamento dos dados analisados. Também, é apresentado e analisado os dados obtidos para um sistema simplificado utilizando dados reais do Sistema Interligado Nacional. Por fim, é realizada uma avaliação geral dos resultados obtidos.
- Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica do impacto dos transitórios provenientes dos transformadores de potencial capacitivos nas funções de proteção de distância no domínio do tempo e da frequência, buscando apresentar os principais trabalhos que mostram os problemas associados às funções de proteção devido ao uso dos TPC.

Os relés de proteção dependem de sinais precisos de tensão e corrente para determinar corretamente se uma falha está dentro de sua zona de proteção, em especial a proteção de distância que determina o alcance do elemento em função da impedância medida. Em sistemas de alta tensão, o sinal de tensão normalmente vem de um Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), sendo necessário que seus sinais secundários reflitam de forma fidedigna os sinais primários. Porém, de acordo com CARVALHO JR. (2008), sob condições transitórias, a tensão no secundário do TPC pode ser diferente da primária devido principalmente à energia armazenada em seus elementos indutivos e capacitivos e à sua indutância de magnetização que apresenta característica não-linear. O problema associado à resposta transitória dos TPC é conhecido e amplamente estudado, sendo verificado na literatura a existência de diversos trabalhos apresentando uma avaliação quanto aos impactos que este fenômeno causa nas funções de proteção.

Diante da necessidade de se realizar estudos sobre a influência da resposta transitória de TPC sobre as funções de proteção, o uso de *softwares* computacionais para simulação de sistemas elétricos de potência torna-se essencial para avaliação destes fenômenos. Sendo assim, é necessário que o sistema elétrico e seus equipamentos sejam modelados de forma fiel, apresentando respostas fidedignas quando submetidos aos fenômenos que o sistema está sujeito. Com este objetivo, o trabalho de CARVALHO JR. (2008) apresenta a modelagem digital de diversos TPCs baseados em medições reais, demonstrando que as respostas transitórias dos mesmos apresentam diferenças significativas, sendo que o modelo utilizado para simulação deve

ser específico para cada tipo de equipamento. O trabalho citado, apesar de não analisar a influência dos TPC sobre as funções de proteção, apresenta um estudo sobre a interação destes equipamentos e as linhas de transmissão objetivando minimizar as falhas decorrentes de TPC. Utilizando os levantamentos realizados, no desenvolvimento desta dissertação são utilizados dois dos modelos digitais elaborados pelo trabalho de CARVALHO JR. (2008).

Também, referente à modelagem de TPC, CAMARGO (2015) propõe uma metodologia para modelagem destes equipamentos com o intuito de realizar estudos transitórios eletromagnéticos em altas frequências, gerando modelos que podem ser simulados em programas do tipo EMTP, como o ATP. O autor analisa a resposta dos TPC frente a diversos eventos do sistema elétrico, como descargas atmosféricas, curto-circuitos e chaveamentos, demonstrando a imprecisão destes equipamentos em representar mudanças rápidas na tensão primária, podendo provocar erros na atuação das proteções do sistema. De outra forma, o trabalho de VASCONCELOS & NEVES (2003) busca fornecer subsídios para a modelagem digital de TPC partindo da resposta em frequência dos mesmos, apresentando a metodologia proposta para a modelagem destes equipamentos incluindo o levantamento de parâmetros como as curvas de saturação. Sumarizando diversos trabalhos desta linha, FERNANDES JR. *et al.* (2006) apresenta a comparação da resposta em frequência de um TPC, modelado em um software e o equipamento real, sendo apresentada a metodologia para modelagem digital, além dos métodos utilizados para levantamento da resposta do equipamento real, mostrando ao final que as diferenças apresentadas entre o modelo e o equipamento real são de pequena ordem.

Sabendo dos problemas apresentados pelos TPC e com o objetivo de corrigir a tensão secundária dos TPC utilizando filtros digitais recursivos, o trabalho de SILVA (2014) apresenta um método de obtenção dos parâmetros destes filtros digitais. De forma a validar os resultados obtidos, seu trabalho avalia a resposta da função de distância fasorial frente às diferenças na tensão secundária ocasionadas pelo uso de TPC e também a resposta desta função depois de corrigidas estas diferenças utilizando o método proposto para casos com o início da falta ocorrendo no pico e no ponto zero da tensão. Dos resultados, é reportado uma redução de até 38 vezes no erro das tensões analisadas, podendo melhorar o tempo de atuação e a segurança da proteção de distância. Por não ser seu objetivo, o trabalho não realiza uma análise profunda do desempenho da função de distância frente a diferentes eventos que o sistema elétrico está

sujeito.

Um estudo sobre os diversos fatores que influenciam na resposta em frequência dos TPC e seus efeitos é apresentado no trabalho de ANNABATULLA *et al.* (2014), mostrando que os três fatores que mais afetam a resposta em frequência dos TPC são o circuito supressor de ferroressonância, os parâmetros de construção do TPC e a carga secundária que estará ligada neste equipamento. São avaliadas diversas condições que o TPC está sujeito, apresentando como os fatores afetam a resposta em frequência dos TPC. Dessa forma, fica demonstrado a necessidade de se conhecer os fatores que podem ocasionar em maiores erros nas respostas dos TPC evitando tais condições.

Diante da necessidade de proteções que possam atuar de forma mais rápida mantendo contudo a confiabilidade, o trabalho de DAQING HOU & ROBERTS (1996) demonstra preocupação a respeito da exigência de relés de proteção mais rápidos frente à resposta transitória inadequada dos TPC sob determinadas condições de operação do sistema elétrico. É realizado um estudo com alguns modelos de TPC buscando-se identificar quais são os principais componentes que contribuem para os problemas na resposta transitória dos TPC. Por fim, os autores apresentam propostas de melhorias na lógica dos relés e descrevem um método para detecção de transitórios no TPC.

2.1 INFLUÊNCIA DOS TPC EM FUNÇÕES DE PROTEÇÃO FASORIAIS

Diante dos trabalhos já apresentados, verifica-se que os TPC não são capazes de fornecer em seus terminais secundários uma cópia fiel da tensão primária, principalmente durante condições transitórias. Desta forma, diversos trabalhos buscam analisar a influência que esses equipamentos exercem sobre as funções de proteção no domínio fasorial. A esse respeito, o trabalho de PAJUELO *et al.* (2005) descreve o impacto da resposta transitória dos TPC sobre o desempenho de relés de distância. Os autores apresentam o efeito da resposta transitória dos TPC na estimação dos fasores e sua influência na proteção de distância, sendo então descrita uma nova técnica de estimação fasorial utilizando o método de mínimos quadrados com o objetivo de melhorar os resultados da proteção estudada. Por fim, é demonstrado o desempenho desta técnica por meio de diversos casos selecionados. Apesar de analisar a resposta da função de distância,

o trabalho não faz uso de dispositivos reais para tal análise, utilizando uma implementação básica da função de proteção.

À medida que os TPC envelhecem, as sobretensões às quais o mesmo é submetido acabam reduzindo sua resistência dielétrica, pois os ciclos térmicos causam a degradação do equipamento, e dessa forma, é mais provável a ocorrência de falhas. Essas falhas podem resultar em erro na tensão secundária dos TPC, desempenho transitório inesperado, um sinal de tensão corrompido ou mesmo uma perda total deste sinal. Dessa forma, uma análise de três eventos de falha ocorridas em TPC é apresentado por GRAY *et al.* (2018). A partir da análise destes eventos é discutida a influência sobre o desempenho de relés de distância durante tais falhas, incluindo o erro transitório dos mesmos. O trabalho apresenta o estudo baseado em funcionalidades disponíveis em funções de distância de relés de proteção reais, avaliando o desempenho desta proteção frente aos eventos de falhas dos TPC.

Conforme discutido anteriormente, o uso de modelos digitais de TPC é de grande importância, sendo essencial prever como a dinâmica destes equipamentos afetam o desempenho dos relés de proteção. Para tanto, o trabalho de REIS *et al.* (2019) reúne informações completas sobre cinco modelos digitais realísticos de TPC disponíveis na literatura e realiza uma análise de sensibilidade das suas respostas na frequência, bem como sua influência nas técnicas de estimação fasorial, proteção de distância e localização de faltas. Este trabalho realiza a análise da função de distância utilizando um modelo digital da mesma, sem contudo realizar testes em equipamentos reais.

CAMPOS *et al.* (2015) apresenta uma avaliação da influência da resposta transitória dos TPC sobre o desempenho de um relé de distância, apresentando o caminho da impedância e suas alterações devido à resposta dos TPC. Simulando curtos-circuitos por meio de um sistema implementado no *RTDSTM* (*Real Time Digital Simulator*) foi verificado que o desempenho do relé de distância apresentou ganhos quando não foram utilizados os sinais do TPC, demonstrando assim a influência que o TPC causa nos relés de proteção.

Com o intuito de mitigar os impactos dos transitórios do TPC sobre os relés de distância, BADRKHANI AJAEI *et al.* (2012) apresenta um estudo utilizando diversas condições de falta, incluindo o SIR, descrevendo os problemas de desempenho que o relé de distância está sujeito quando submetido aos transitórios induzidos pelo TPC. Com o intuito de resolver os problemas

apresentados, os autores propõem um algoritmo que busca sanar tais problemas. Novamente, os estudos são realizados computacionalmente sem apresentar resultados de equipamentos reais. Por fim, o trabalho de ANGELL & HOU (2007) apresenta considerações a respeito das características que os TPC devem possuir baseado em estudos utilizando a função de proteção de distância fasorial. Dentre as características que os TPC devem apresentar, pode-se citar, uma alta capacitância, alta relação de transformação, circuito de ferorrressonância passivo e uso de carga resistiva no secundário do TPC.

2.2 INFLUÊNCIA DOS TPC EM FUNÇÕES DE PROTEÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Por se tratar de uma proteção recentemente disponibilizada comercialmente, não existem muitos trabalhos que avaliam a influência da resposta transitória dos TPC sobre as funções de proteção no domínio do tempo. Como visto anteriormente, a proteção de distância no domínio da frequência é afetada pela resposta transitória dos TPC. Desta forma, é essencial avaliar a influência que estes equipamentos possuem nas funções de proteção no domínio do tempo, principalmente pelo fato destas utilizarem valores instantâneos dos sinais de tensão. Buscando apresentar as funções de proteção no domínio do tempo utilizadas no relé T400L, o trabalho de SCHWEITZER *et al.* (2016) ilustra a operação destas funções utilizando falhas reais e simulações digitais. No trabalho, é mencionado que a resposta transitória dos TPC influenciam na atuação das funções, sendo apresentadas algumas condições de segurança, com o objetivo de garantir a correta operação. Porém, não é investigada a influência dos TPC sobre as funções apresentadas.

Em SHARMA & MYNAM (2018) é apresentada a experiência de campo em uma concessionária de energia elétrica indiana obtidas pelo uso de relés de proteção que possuem funções no domínio do tempo. São analisados diversos casos reais de faltas que ocorreram nas linhas de transmissão desta concessionária, sendo apresentadas algumas situações onde a resposta do TPC ocasiona em desvios no desempenho das funções de proteção, majoritariamente nas funções que utilizam ondas viajantes. Apesar de apresentar casos reais, não é realizado um estudo da função de proteção de distância presente no relé, nem a influência que os TPC possuem sobre a mesma.

Com o objetivo de realizar uma revisão das funções de proteção de distância no domínio fasorial e do tempo abordando uma explanação da história e do desenvolvimento destas funções, o trabalho de SCHWEITZER & KASZTENNY (2018) busca apresentar testes de campo comparando o desempenho das funções de distância no domínio do tempo e da frequência. É realizada uma breve discussão sobre a influência que os TPC exercem sobre as funções de proteção no domínio do tempo que utilizam ondas viajantes, sem discutir a resposta da função de distância frente a tais equipamentos.

O trabalho de KASZTENNY *et al.* (2017) busca apresentar a forma de se realizar os cálculos dos ajustes utilizados nas funções de proteção no domínio do tempo, incluindo os cuidados necessários nos ajustes das funções, devido ao uso de TPC. Contudo, tal discussão diz respeito somente às funções que utilizam ondas viajantes. Já em relação ao desempenho dos relés de proteção, SCHWEITZER *et al.* (2016) apresentam um trabalho com foco em definir e mensurar o desempenho destes equipamentos, com especial foco nas funções no domínio do tempo. O trabalho também busca apresentar os requisitos para a simulação digital com o procedimento de *playback* disponível no relé T400L, sendo realizada uma discussão sobre os conceitos dos TPC e sua possível interferência no relé.

Buscando uma avaliação do desempenho das funções de proteção no domínio do tempo, o trabalho de SCHWEITZER *et al.* (2016) utiliza diversos casos reais para demonstrar a resposta destas funções. Para tanto, é utilizada a resposta da proteção fasorial convencional para comparação com as funções de proteção no domínio do tempo. O trabalho cita a influência que o TPC realiza sobre a função de distância no domínio do tempo, apresentando uma análise dos casos estudados e mostrando que a função TD21, devido ao transitório do TPC, inibe intencionalmente o elemento antes que ocorra o sobrealcançe da mesma. Este trabalho é o primeiro a apresentar uma análise da influência dos transitórios dos TPC sobre a função de proteção de distância, sem apresentar outras análises à respeito deste tema.

Por fim, o trabalho de METZGER *et al.* (2018) apresenta a experiência real obtida pela instalação de um relé de proteção no domínio do tempo em uma linha de transmissão de 115 kV da empresa *Baltimore Gas and Electric Company (BGE)*. No estudo, é analisado o desempenho das funções no domínio do tempo e comparado com a proteção padrão utilizada pela empresa. Porém, não é mencionada a influência dos TPC sobre as funções objetos deste estudo.

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentado um levantamento de trabalhos referentes a modelagem digital de TPC e seu uso para simulações em softwares computacionais, além de levantar os trabalhos que avaliam a influência dos TPC em funções de proteção no domínio da frequência e do tempo. Nas Tabelas 2.1 e 2.2, apresenta-se uma sinopse do levantamento bibliográfico realizado. Diante dos resultados dos diversos trabalhos apresentados, nota-se que a função de proteção de distância no domínio fasorial é afetada pela resposta transitória dos TPC. Já os estudos referentes à influência dos TPC sobre a função de distância no domínio do tempo são escassos. Porém, em nenhum dos trabalhos abordados foi realizada uma análise desta influência utilizando relés reais, nem tampouco foram apresentados resultados com uso de um grande número de casos de falta. Diante disto, este trabalho tem o objetivo de realizar um estudo avaliando o impacto dos transitórios provenientes dos transformadores de potencial capacitivos nas funções de proteção de distância no domínio do tempo e da frequência, utilizando relés reais para diversos cenários de falta.

Tabela 2.1. Parâmetros da LT.

Referências	Características	Limitações
CARVALHO JR. (2008)	Modelagem digital do TPC e avaliação da interação entre estes equipamentos e a LT	I
CAMARGO (2015)	Metodologia para modelagem de TPC para estudos transitórios eletromagnéticos	I
VASCONCELOS & NEVES (2003)	Modelagem digital do TPC baseado em levantamento de sua resposta em frequência	I
FERNANDES JR. <i>et al.</i> (2006)	Comparação entre simulações digitais e medições em laboratório de um TPC	I
SILVA (2014)	Método para obtenção dos parâmetros de filtros digitais recursivos	II
ANNABATULLA <i>et al.</i> (2014)	Análise dos fatores que influenciam na resposta em frequência do TPC	I

Tabela 2.2. Parâmetros da LT.

Referências	Características	Limitações
DAQING HOU & ROBERTS (1996)	Análise dos principais componentes do TPC que contribuem para os erros em relés de distância	II
PAJUELO <i>et al.</i> (2005)	Proposta de uma nova técnica de estimação fasorial da tensão com o intuito de minimizar o impacto dos transitórios dos TPC	II
GRAY <i>et al.</i> (2018)	Estudo de falhas em TPC e os efeitos ocasionados em relés de distância	I
REIS <i>et al.</i> (2019)	Revisão de alguns modelos de TPC disponíveis na literatura e seus impactos no sistema elétrico	II
CAMPOS <i>et al.</i> (2015)	Análise da influência dos erros transitórios dos instrumentos de medição no desempenho de relés de distância	II
BADRKHANI AJAEI <i>et al.</i> (2012)	Proposta de um método para mitigar os impactos dos transitórios dos TPC em relés de distância	II
ANGELL & HOU (2007)	Análise das principais fontes de erros de medição à que os relés de proteção estão sujeitos	II
SCHWEITZER <i>et al.</i> (2016)	Análise do desempenho das funções de proteção no domínio do tempo	III
SHARMA & MYNAM (2018)	Resultado da instalação de relés de proteção no domínio do tempo em uma LT de uma concessionária	I
SCHWEITZER & KASZTENNY (2018)	Revisão da proteção de distância, desde os relés eletromecânicos até os relés no domínio do tempo, comparando a atuação de eventos	I
KASZTENNY <i>et al.</i> (2017)	Considerações sobre os ajustes das funções no domínio do tempo	I
SCHWEITZER <i>et al.</i> (2016)	Define e apresenta formas de mensurar o desempenho de relés de proteção de LT	I
METZGER <i>et al.</i> (2018)	Experiência com a instalação de relés no domínio do tempo	I

Legenda:

I = Não realiza testes em equipamentos reais e não avalia a influência do TPC sobre as funções de proteção;

II = Não realiza testes em equipamentos reais e não avalia a influência do TPC na proteção no domínio do tempo;

III = Realiza uma análise pontual da influência do TPC sobre a proteção no domínio do tempo, sem contemplar a proteção fasorial e o ensaio em equipamentos reais;

Fonte: autoria própria.

CAPÍTULO 3

FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA DE LT

A proteção de distância é utilizada, de forma geral, em sistemas de distribuição e transmissão, podendo em alguns casos, ser usada em sistemas de geração. Este tipo de proteção tem o objetivo de atuar para eventos de falta dentro do alcance escolhido, ou seja, quando a distância entre o ponto de medição e a falta é menor que o valor ajustado na proteção. O controle do alcance é o atributo chave para aplicação da proteção de distância em LT. Idealmente, elementos como o nível de corrente, o carregamento, o tipo de falta, a resistência de falta ou o ângulo de incidência da falta não deveriam afetar o elemento de proteção de distância. Porém, na prática estes elementos afetam a proteção de distância, mas de forma menos crítica que para proteção de sobrecorrente, por exemplo (SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018).

Uma das grandes vantagens da proteção de distância é a possibilidade de realizar a atuação da proteção para curtos-circuitos em linhas sem a necessidade de um canal de comunicação para troca de informações entre equipamentos nos terminais da linha, além da possibilidade de viabilizar a coordenação no tempo de diversos relés de proteção de distância. Estas vantagens levaram a uma utilização abrangente de relés de distância para proteção de LT de alta tensão, sendo uma das proteções mais utilizadas (SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018; SILVA, 2009).

A proteção de distância surgiu há mais de um século e vem passando por uma série de avanços e melhorias durante o tempo, passando pelos relés eletromecânicos para os relés estáticos nos anos 70, até os relés baseados em microprocessadores digitais nos anos 80. Historicamente, os elementos de proteção de distância são baseados na medição da impedância aparente entre o terminal da linha protegida e o local da falta (SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018). Porém, recentemente colocada em operação comercial, a proteção de distância no domínio do tempo realiza a comparação, no ponto de alcance ajustado, entre a tensão esperada e a verificada (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos da proteção de distância no domínio da

frequência e do tempo, os quais são necessários para o entendimento dos resultados obtidos neste trabalho.

3.1 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA FASORIAL

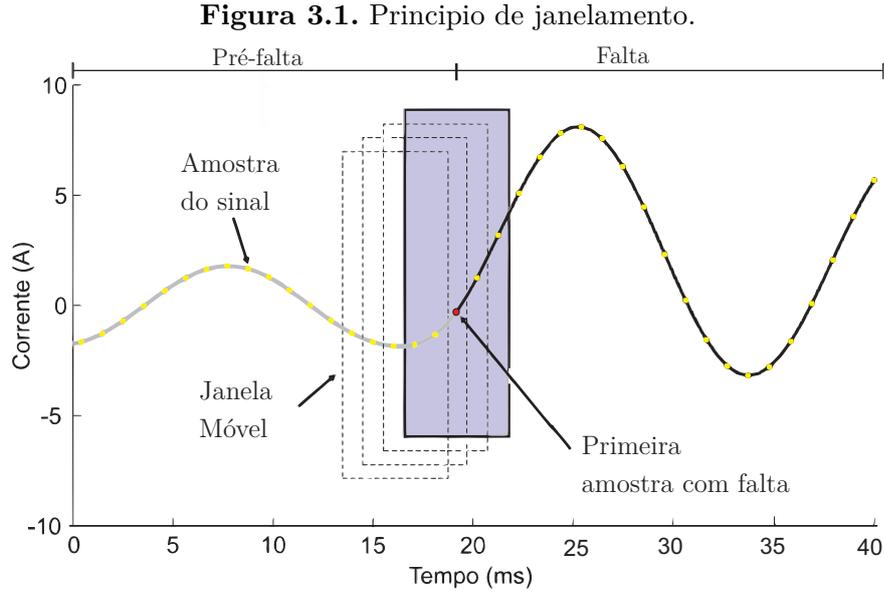
A proteção de distância no domínio da frequência utiliza as tensões e correntes fasoriais para estimar a impedância vista pelo relé e desta forma decidir se existe uma falta dentro de sua área de proteção. Desta forma, é necessário que o relé realize o processo de estimação fasorial dos sinais de tensão e corrente obtidos do sistema (SCHWEITZER; HOU, 1993).

Dentre os diversos tipos existentes de proteção de distância no domínio fasorial, este trabalho irá avaliar o elemento de distância Mho contido no relé SEL-411L. Sendo assim, serão apresentados elementos necessários para o entendimento do funcionamento deste tipo de proteção, além dos fundamentos de estimação fasorial e outros pontos necessários ao entendimento da função de proteção de distância fasorial.

3.1.1 Estimação Fasorial

Os algoritmos de estimação fasorial não recursivos de janela fixa utilizam um conjunto de amostras do sinal estudado para realizar a estimação fasorial. Desta forma, um dos principais processos da estimação fasorial é o janelamento dos sinais, ou seja, as amostras dos sinais que serão estudados são inseridas em uma janela móvel, sendo descartada a amostra mais antiga. Desta forma, a estimação dos valores dos sinais depende de valores passados, sendo o tamanho da janela determinado pelo algoritmo de estimação utilizado. A Figura 3.1 apresenta um exemplo de janelamento do sinal. O valor estimado possui um certo tempo para acomodação devido ao tamanho da janela. E, assim, os valores estimados sempre possuem influência das amostras passadas.

Da Figura 3.1, pode-se afirmar que o valor estimado para o período de falta somente retratará a condição de falta após a janela conter apenas amostras do sinal de falta.



Fonte: SILVA (2009) com adaptações.

3.1.1.1 Algoritmo de Fourier de Um Ciclo

O algoritmo de Fourier de um ciclo é baseado na análise de Fourier e consiste em extrair a componente fundamental de um sinal $x(t)$, utilizando-se de filtros ortogonais do tipo seno e cosseno (SILVA, 2009). Utilizando-se os coeficientes da série de Fourier para a frequência fundamental, obtém-se:

$$Y_{C1} = \int_t^{t+T} x(t) \cdot \cos \omega t \cdot dt, \quad (3.1)$$

$$Y_{S1} = \int_t^{t+T} x(t) \cdot \sen \omega t \cdot dt. \quad (3.2)$$

Estas integrais podem ser aproximadas no domínio discreto por:

$$Y_{c1} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{N}, \quad (3.3)$$

$$Y_{s1} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot \sen \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{N}, \quad (3.4)$$

sendo x_k a k -ésima amostra do sinal $x(t)$ e N o número de amostras em um ciclo da frequência fundamental.

(3.3) e (3.4) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$Y_{c1} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot h_{ck}, \quad (3.5)$$

$$Y_{s1} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot h_{sk}, \quad (3.6)$$

onde h_{ck} e h_{sk} são os coeficientes dos filtros de Fourier de um ciclo. Estes filtros podem ser escritos como:

$$h_c = \frac{2}{N} [\cos \omega t_0 \cos \omega t_1 \cos \omega t_2 \dots \cos \omega t_{N-1}], \quad (3.7)$$

$$h_s = \frac{2}{N} [\sin \omega t_0 \sin \omega t_1 \sin \omega t_2 \dots \sin \omega t_{N-1}]. \quad (3.8)$$

Os filtros h_c e h_s são ortogonais para a frequência fundamental. Eles também podem ser calculados previamente, de forma *off-line*, não requerendo um grande esforço computacional (SILVA, 2009). O fasor que representa o sinal é dado pela amplitude A e o ângulo φ :

$$A = \sqrt{Y_{c1}^2 + Y_{s1}^2}, \quad (3.9)$$

$$\varphi = \arctan \frac{Y_{s1}}{Y_{c1}}. \quad (3.10)$$

3.1.1.2 Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo

O algoritmo de Fourier de meio ciclo possui os mesmos fundamentos teóricos do algoritmo de Fourier de um ciclo, porém ele utiliza apenas meio ciclo da janela de dados, que é metade de um ciclo da frequência fundamental do sinal estudado. Com isso, o tempo da resposta é reduzido pela metade em comparação ao algoritmo de Fourier de um ciclo. As suas equações podem ser escritas como:

$$Y_{c1} = \frac{4}{N} \cdot \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_k \cdot \cos \frac{2\pi \cdot k}{N}, \quad (3.11)$$

$$Y_{s1} = \frac{4}{N} \cdot \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x_k \cdot \text{sen} \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{N}. \quad (3.12)$$

Os filtros h_c e h_s passam a ser:

$$h_c = \frac{4}{N} \left[\cos \omega t_0 \cos \omega t_1 \cos \omega t_2 \dots \cos \omega t_{\frac{N}{2}-1} \right], \quad (3.13)$$

$$h_s = \frac{4}{N} \left[\text{sen} \omega t_0 \text{sen} \omega t_1 \text{sen} \omega t_2 \dots \text{sen} \omega t_{\left(\frac{N}{2}-1\right)} \right]. \quad (3.14)$$

As funções seno e cosseno também são ortogonais no intervalo de meio ciclo, na frequência fundamental (SILVA, 2009).

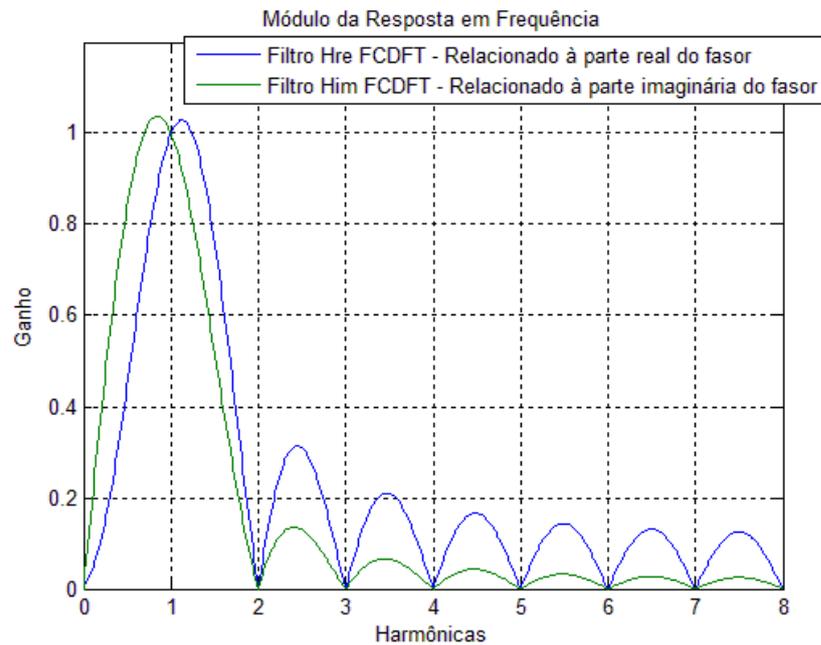
3.1.1.3 Resposta em Frequência dos Algoritmos de Estimação Fasorial

A Figura 3.2 apresenta a resposta em frequência do filtro H_{RE} e H_{IM} referentes ao algoritmo de Fourier de um ciclo. Nota-se que os filtros possuem ganho unitário na frequência fundamental e ganho zero nas demais frequências múltiplas da fundamental. Devido a esta característica, estes filtros eliminam todas as harmônicas de um sinal. Pode-se notar também, que o filtro H_{IM} possui maior ganho próximo da frequência zero, enquanto que o filtro H_{RE} possui maiores lóbulos laterais, ou seja, maiores ganhos para as frequências interharmônicas (SILVA, 2009).

Já a Figura 3.3 apresenta a resposta em frequência do filtro H_{RE} e H_{IM} referentes ao algoritmo de Fourier de meio ciclo. Nota-se que os filtros possuem ganho unitário na frequência fundamental e possuem ganho zero nas frequências harmônicas ímpares. Devido a esta característica, estes filtros eliminam somente as harmônicas ímpares de um sinal. As harmônicas pares não são eliminadas devido ao tamanho da janela que é utilizada para estimação do fasor, que à medida que diminui piora a resposta em frequência dos filtros. Pode-se notar também, que o filtro H_{IM} possui maior ganho próximo da frequência zero, e o filtro H_{RE} possui maiores lóbulos laterais, ou seja, maiores ganhos para as frequências interharmônicas (SILVA, 2009).

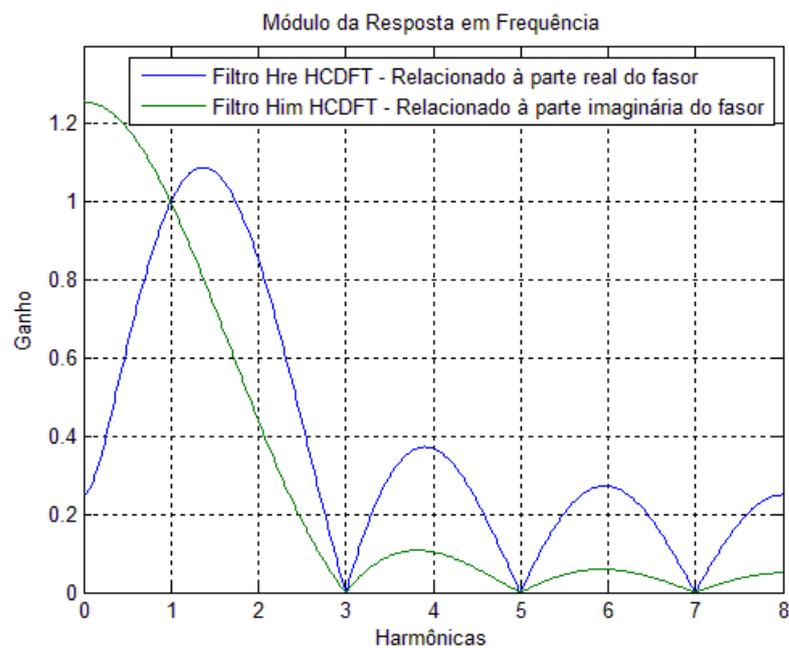
Vale destacar que o relé de proteção SEL-411L utilizado para os testes descritos neste trabalho faz uso de uma combinação de algoritmos de estimação fasorial de um e de meio ciclo, conforme apresentado por BENMOUYAL & ZIMMERMAN (2010) e SEL (2018).

Figura 3.2. Resposta em frequência dos filtros H_{RE} e H_{IM} referentes ao algoritmo de Fourier de um ciclo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.3. Resposta em frequência dos filtros H_{RE} e H_{IM} referentes ao algoritmo de Fourier de meio ciclo.



Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Malhas (*Loops*) de Falta

Os tipos possíveis de falta em um sistema elétrico trifásico são: trifásicas (ABC ou ABCT), bifásicas (AB, BC e CA), bifásicas para terra (ABT, BCT e CAT) e monofásicas (AT, BT e CT). Para determinação da impedância vista pelo relé as relações entre tensões e correntes são diferentes para cada tipo de falta, sendo utilizado pelos relés de distância seis unidades diferentes de impedância a depender do tipo de falta: três do tipo fase-terra e três do tipo fase-fase. Diversos trabalhos descrevem o método de cálculo a fim de mostrar quais sinais devem ser usados em cada unidade de impedância (SILVA, 2009). A Tabela 3.1 apresenta um resumo das malhas ou *loops* de falta e os fasores de tensão e corrente utilizados para o cálculo das unidades de impedância, em que $K_0 = \frac{Z_{L0}-Z_{L1}}{3Z_{L1}}$, Z_{L0} é a impedância de sequência zero da linha e Z_{L1} é a impedância de sequência positiva da linha.

Tabela 3.1. Valores de tensão e corrente utilizados nos cálculos das unidades de impedância.

<i>Loop</i>	Tensão de Entrada	Corrente de Entrada
AT	\hat{V}_a	$\hat{I}_a + K_0\hat{I}_0$
BT	\hat{V}_b	$\hat{I}_b + K_0\hat{I}_0$
CT	\hat{V}_c	$\hat{I}_c + K_0\hat{I}_0$
AB	$\hat{V}_a - \hat{V}_b$	$\hat{I}_a - \hat{I}_b$
BC	$\hat{V}_b - \hat{V}_c$	$\hat{I}_b - \hat{I}_c$
CA	$\hat{V}_c - \hat{V}_a$	$\hat{I}_c - \hat{I}_a$

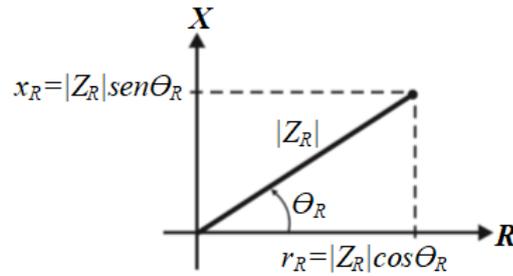
Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Diagrama R-X

Com o intuito de apresentar de forma apropriada as características de um relé de distância, utiliza-se um diagrama de impedâncias denominado diagrama R-X, onde no eixo das abscissas encontra-se o valor da resistência R e no eixo das ordenadas o valor da reatância X. A impedância aparente Z_R vista pelo relé pode ser obtida por meio da relação entre as devidas tensões e correntes apresentadas na Tabela 3.1. Desta forma, a impedância Z_R pode ser representada no diagrama R-X através de um vetor com coordenadas $r_R = |Z_R|\cos\theta_R$ e $x_R = |Z_R|\sen\theta_R$,

conforme Figura 3.4. Sendo assim, o relé deve atuar caso a impedância Z_R esteja dentro de uma característica de operação da função de proteção. Esta característica pode ser descrita como uma figura geométrica no plano R-X e pode ser definida de diversas formas, adaptando-se às características do sistema protegido e às possibilidades computacionais do relé (SILVA, 2009).

Figura 3.4. Diagrama R-X.



Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Função Fasorial de Distância Mho PH21

O relé de distância pode ser visto como um comparador, que pode distinguir entre uma situação normal de operação ou uma falta comparando dois sinais e verificando a defasagem ou magnitude entre estes sinais. Os parâmetros utilizados para determinação do comparador determinam a forma, tamanho e posição de sua característica de operação no plano R-X. Dentre estas características, a Mho é bastante utilizada, tendo como principais características (SILVA, 2009): Alcance finito; Direcionalidade e Acomodação da resistência de falta.

O elemento Mho combina características dos elementos de impedância e direcionais, sendo sua característica inerentemente direcional com o elemento operando somente para faltas à frente do relé (SCHWEITZER; ROBERTS, 1993). A característica deste elemento, no plano R-X, é de uma circunferência que passa pela origem do plano (SEL-411L INSTRUCTION MANUAL, 2018). O elemento de distância implementa a característica Mho utilizando um comparador do tipo cosseno, e desta forma calcula o operador Mho como apresentado em (3.15) (SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018).

$$m = \frac{\text{Re}(\hat{V}_{LOOP} \cdot \hat{S}_{POL}^*)}{\text{Re}(Z_{L1} \cdot \hat{I}_{LOOP} \cdot \hat{S}_{POL}^*)}, \quad (3.15)$$

onde \hat{V}_{LOOP} é a tensão de *loop* utilizada pelo relé, \hat{S}_{POL} é o valor de polarização utilizado, Z_{L1} é a impedância da LT e \hat{I}_{LOOP} é a corrente de *loop* utilizada pelo relé.

A variável m representa a distância medida entre o relé e o ponto de falta em pu, em relação à impedância da LT. Assim o relé pode verificar se a falta está dentro da zona de proteção ajustada (SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018).

O elemento Mho de distância utiliza como valor de polarização \hat{S}_{POL} , a memória de tensão de sequência positiva. A polarização por memória de tensão garante uma operação adequada para faltas com afundamentos significativos da tensão de loop. No entanto, uma memória mais longa pode prejudicar a segurança do elemento de distância quando um distúrbio no sistema causa uma rápida excursão de frequência. Desta forma, o tamanho da memória de tensão é adaptável, usando normalmente um tamanho de memória curto ou médio. Quando o relé identifica a tensão de sequência positiva abaixo de um valor limite, ele automaticamente passa a utilizar um tamanho de memória longo (SEL-411L INSTRUCTION MANUAL, 2018). Maiores detalhes sobre o funcionamento e a forma de ajuste da função de distância Mho no relé SEL-411L podem ser encontradas em SCHWEITZER & KASZTENNY (2018); SEL-411L Instruction Manual (2018) e SCHWEITZER & ROBERTS (1993).

3.2 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Após discutir os princípios da função de proteção de distância no domínio fasorial, esta seção apresenta os princípios básicos da proteção de distância no domínio do tempo.

3.2.1 Grandezas Incrementais

De acordo com o princípio da superposição, qualquer sistema linear com múltiplas fontes independentes de corrente e/ou tensão pode ser solucionado pela soma algébrica dos resultados individuais de cada fonte, desconsiderando-se as demais fontes.

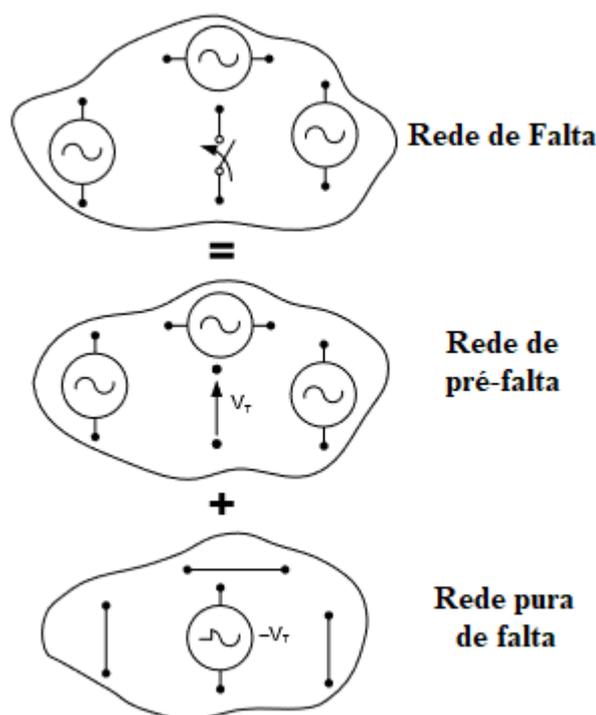
Desta forma, uma rede sob falta pode ser solucionada utilizando-se o princípio da superposição, resolvendo separadamente o sistema antes da ocorrência da falta e o sistema puro de falta, que somados resultam na rede sob falta (GUZMAN *et al.*, 2017). Primeiramente, encontram-se

as tensões e correntes do sistema sem considerar a presença da falta, e então, obtém-se a tensão no ponto de falta, que será igual ao negativo da variação de tensão no ponto do defeito.

Na Figura 3.5 é ilustrado o princípio da superposição. Nota-se que o sistema sob falta foi dividido em um sistema de pré-falta e um sistema de falta-pura, tornando possível o cálculo e avaliação das correntes e tensões de pré-falta e curto-circuito (sistema de falta) separadamente, facilitando a análise do evento (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Destaca-se que o sistema de falta passa a existir após a ocorrência do curto-circuito, representado pelo fechamento da chave mostrada na Figura 3.5, energizando os componentes do sistema puro de falta. Esses sinais são exclusivos dos efeitos de falta e não são afetados pela carga ou outras grandezas de pré-falta.

Figura 3.5. Ilustração do princípio da superposição para análise de um curto-circuito.



Fonte: SCHWEITZER *et al.* (2015) com adaptações.

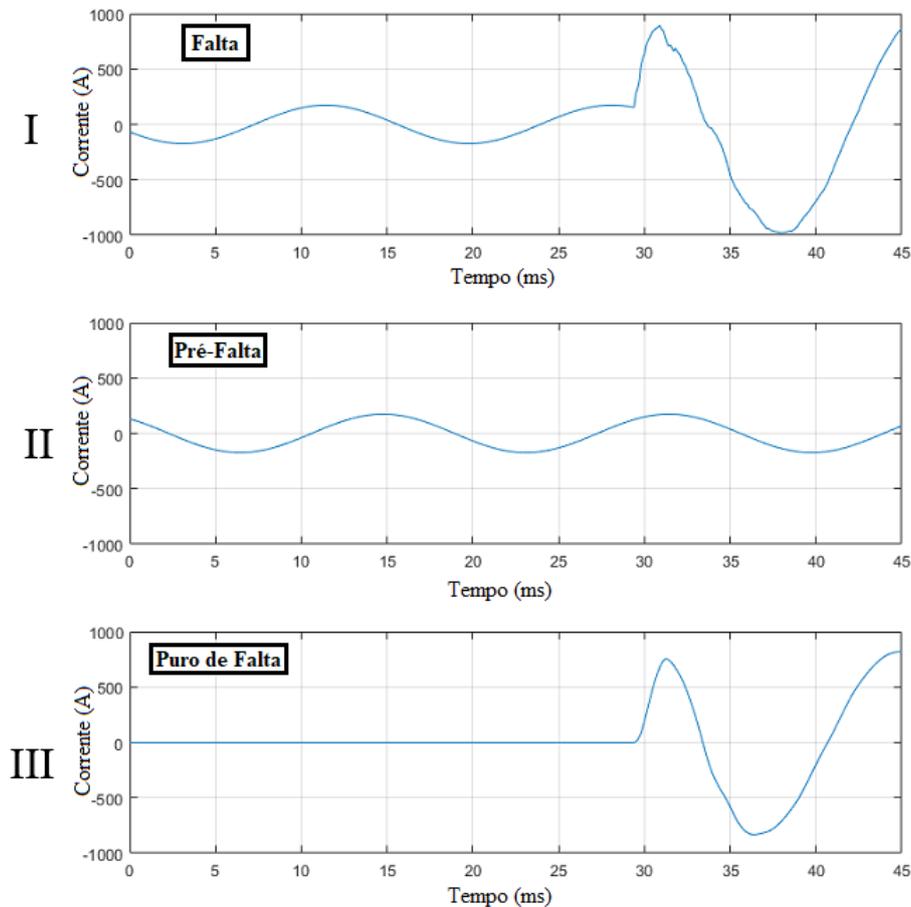
Em um sistema real, relés de proteção realizam as medições de tensão e corrente no ponto onde são instalados. Dessa forma, é possível obter a medição das grandezas analógicas antes da falta (Pré-falta), utilizando os valores armazenados em um *buffer*, e durante a falta (Sob falta), utilizando valores do instante atual. Como os sinais do sistema sob falta são a soma dos sinais de pré-falta e de falta é possível obtermos os sinais de falta, ou seja, os gerados pelo

curto-circuito. Utilizando estes conceitos podemos derivar o cálculo das grandezas incrementais como o valor instantâneo medido ($S(t)$), subtraído do valor medido p períodos (T) anteriores:

$$\Delta S(t) = S(t) - S_{(t-pT)}. \quad (3.16)$$

Remetendo-se à Figura 3.5, o sinal instantâneo medido ($S(t)$) representa a medição na rede sob falta. Já o sinal medido p períodos anteriores ($S_{(t-pT)}$) seria a medição na rede de pré-falta. Selecionando apropriadamente o valor de p , obtém-se os valores puros de falta, contendo todos os transitórios produzidos unicamente pela falta. A Figura 3.6 apresenta os sinais de corrente para um curto-circuito da fase A à terra, mostrando o sinal da grandeza incremental gerada para $p = 1$.

Figura 3.6. Corrente de um sistema sob falta, de pré-falta e de falta para um curto-circuito da fase A à terra em 5% de uma linha de 200 km e 230 kV.



Fonte: Autoria própria.

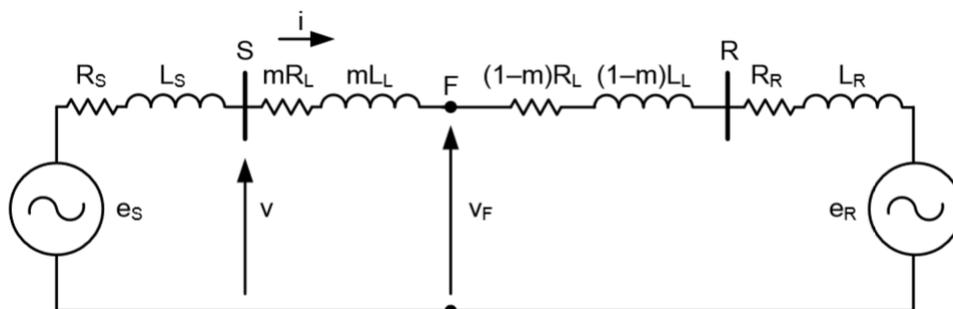
A Figura 3.6 apresenta a aplicação de (3.16) para um sinal de corrente obtido após um

curto-circuito fase-terra. Em I observa-se o sinal da rede sob falta, em II tem-se o sinal de pré-falta e em III é apresentado o sinal gerado unicamente pela falta que é a grandeza incremental da corrente avaliada. Somando-se os sinais II e III obtemos o sinal apresentado em I, conforme o princípio da superposição.

3.2.2 Relação entre Correntes e Tensões no Domínio do Tempo

Para explicar os princípios da proteção no domínio do tempo, a Figura 3.7 apresenta um sistema monofásico com duas fontes e uma LT entre elas, modeladas a parâmetros RL. O ponto F é o local onde ocorre a falta estudada, localizada a uma distância m do terminal S da linha. (GUZMAN *et al.*, 2017)

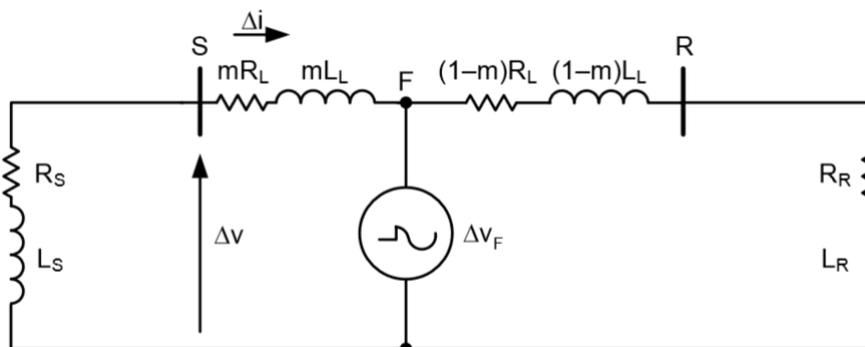
Figura 3.7. Sistema fictício com duas fontes e uma linha para análise de falta no ponto F.



Fonte: GUZMAN *et al.* (2017) com adaptações.

A Figura 3.8 apresenta o circuito de falta contendo as grandezas incrementais de corrente e tensão.

Figura 3.8. Sistema de falta para análise das grandezas incrementais.



Fonte: GUZMAN *et al.* (2017) com adaptações.

Considerando um relé instalado no terminal S, a relação entre a tensão incremental e a

corrente incremental é dada por:

$$\Delta v = -(R_S \cdot \Delta i + L_S \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i) \quad (3.17)$$

A Equação (3.17) é a queda de tensão na impedância da Fonte S ocasionada pela corrente incremental Δi . Sem alteração de (3.17), multiplica-se e divide-se o lado direito da equação pelo módulo da impedância da fonte S, obtendo:

$$\Delta v = -|Z_S| \cdot \left(\frac{R_S}{|Z_S|} \cdot \Delta i + \frac{L_S}{|Z_S|} \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \right). \quad (3.18)$$

Observando (3.18) pode-se escrever uma nova corrente incremental que é a combinação entre a corrente incremental instantânea e sua derivada, aplicado a cada termo um multiplicador relacionado à resistência e indutância, respectivamente. A Equação (3.19) apresenta essa nova corrente, chamada de corrente réplica incremental:

$$\Delta i_Z = D_0 \cdot \Delta i + D_1 \cdot \frac{d}{dt} \Delta i, \quad (3.19)$$

$$D_0 = \frac{R_S}{|Z_S|}, \quad (3.20)$$

$$D_1 = \frac{L_S}{|Z_S|}. \quad (3.21)$$

Dessa forma (3.17) pode ser reescrita como uma simples relação entre tensão e corrente medidas no terminal S:

$$\Delta v = -|Z_S| \cdot \Delta i_Z. \quad (3.22)$$

Destaca-se que este equacionamento é válido para um sistema elétrico representado por parâmetros RL. A Equação (3.22) lembra a relação entre tensão e corrente no domínio dos fasores dada por:

$$\Delta \hat{V} = -\hat{Z}_S \cdot \Delta \hat{I}. \quad (3.23)$$

Destaca-se que, no domínio do tempo, a informação de fase da impedância Z_S está inserida na corrente Δi_Z . Os multiplicadores D_0 e D_1 , selecionados conforme (3.20) e (3.21), proporcionam uma relação unitária entre a corrente incremental medida e a corrente réplica na frequência fundamental do sistema (GUZMAN *et al.*, 2017; SCHWEITZER *et al.*, 2016; SCHWEITZER *et al.*, 2015).

De (3.20) e (3.21) nota-se que os valores de resistência, indutância e impedância dizem respeito à Fonte S, porém é comum que os valores relacionados à LT sejam os parâmetros conhecidos, sabendo que para sistemas homogêneos, os ângulos das fontes local e remota são aproximadamente iguais ao ângulo da impedância da LT. Assim, pode-se reescrever (3.20) e (3.21) da seguinte forma (GUZMAN *et al.*, 2017):

$$D_0 = \frac{R_S}{|Z_S|} = \cos(\theta_S) \approx \cos(\theta_L) = \frac{R_L}{|Z_L|} \quad (3.24)$$

$$D_1 = \frac{L_S}{|Z_S|} \cdot \frac{\omega}{\omega} = \frac{\sin(\theta_S)}{\omega} \approx \frac{\sin(\theta_L)}{\omega} = \frac{L_L}{|Z_L|} \quad (3.25)$$

Destaca-se que os parâmetros da LT protegida são os valores inseridos no ajuste do relé de proteção T400L, sendo estes os valores utilizados para cálculo das correntes réplica incrementais. Diante do exposto, pode-se definir uma função réplica utilizando (3.19), (3.24) e (3.25), como (SCHWEITZER *et al.*, 2015):

$$f_{IZ}(\Delta i, R, L) = D_0(R, L) \cdot \Delta i + D_1(R, L) \cdot \frac{d}{dt} \Delta i. \quad (3.26)$$

3.2.3 Considerações a Respeito dos *Loop* de Falta

Na seção anterior foi utilizado um sistema monofásico para explicar as relações entre correntes e tensões no domínio do tempo, porém, em casos reais é necessário considerar sistemas adequados ao tipo de falta que se busca proteger, tornando a resposta do elemento adequada ao tipo de falta ocorrida no sistema elétrico. Sendo assim, os *loops* de falta são a melhor forma de representar a resposta do sistema. A Tabela 3.1 pode ser alterada para apresentar os valores utilizados no domínio do tempo, conforme a Tabela 3.2 (SCHWEITZER *et al.*, 2015):

Na Tabela 3.2, Δi_{0Z} é definida como:

$$\Delta i_{0Z} = f_{IZ}(\Delta i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} f_{IZ}(\Delta i_0, R_0, L_0). \quad (3.27)$$

onde $i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$.

Tabela 3.2. Valores de tensão e corrente utilizados nos cálculos das unidades de impedância.

<i>Loop</i>	Tensão de Entrada	Corrente de Entrada
AT	Δv_A	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{0Z}$
BT	Δv_B	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{0Z}$
CT	Δv_C	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{0Z}$
AB	$\Delta v_A - \Delta v_B$	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{BZ}$
BC	$\Delta v_B - \Delta v_C$	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{CZ}$
CA	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{AZ}$

Fonte: Autoria própria.

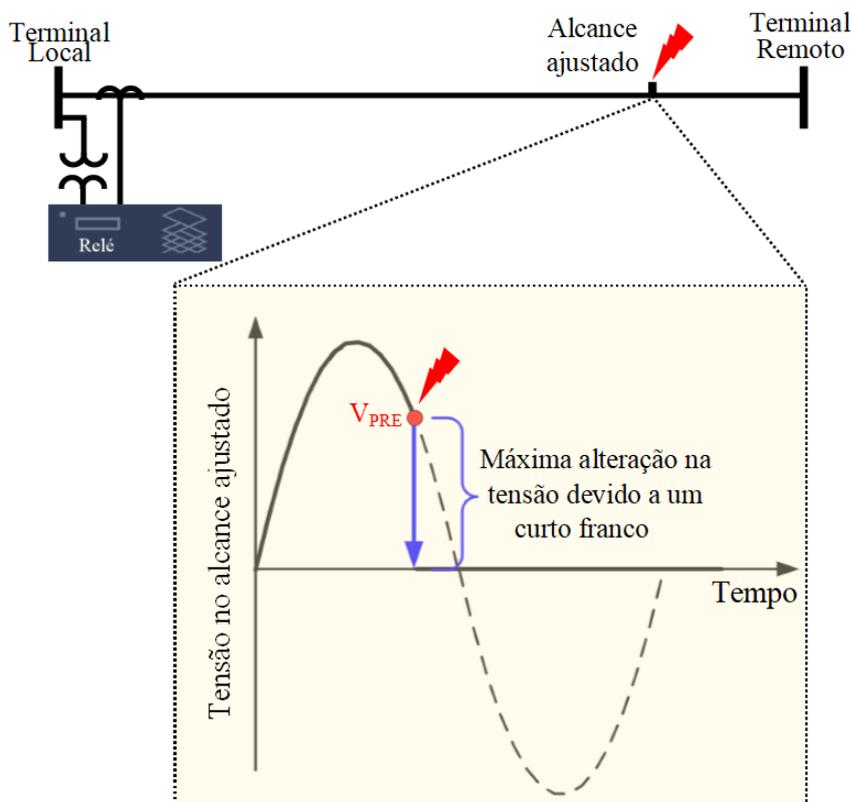
3.2.4 Função Incremental de Distância TD21

A função de proteção no domínio do tempo baseada em quantidades incrementais TD21 fornece proteção instantânea de alcance definido para linhas de proteção. Esta função é utilizada para realizar atuação direta, sem necessidade de comunicação e com informações de somente um terminal (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018).

O elemento de distância TD21 compara, no domínio do tempo, a mudança na tensão no ponto de alcance ajustado, utilizando os valores de tensão e corrente medidos pelo relé, além dos parâmetros de resistência (R) e indutância (L) da LT. Tomando como referência a Figura 3.9 ocorrendo um curto-circuito no ponto de alcance definido, a maior mudança de tensão possível ocorre para um evento de curto-circuito com resistência nula de falta (curto franco). Desta forma, a tensão vai a zero e a mudança na tensão é igual ao valor da tensão de pré-falta, V_{PRE} (SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018).

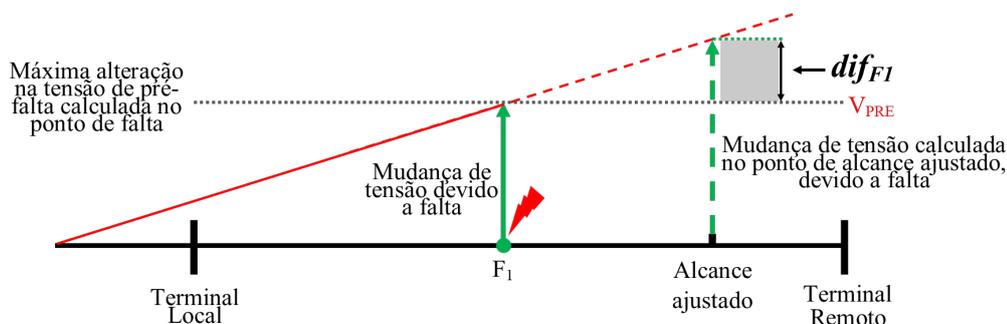
Considerando que uma falta ocorra antes do ponto de alcance definido, conforme apresentado na Figura 3.10, neste caso, a mudança na tensão devido à falta, calculada no ponto de alcance definido, é próxima da máxima alteração na tensão de pré-falta calculada no ponto de alcance, V_{PRE} . Desta forma, quando projetado no ponto de alcance ajustado, o valor da mudança de tensão devido à falta supera o valor de V_{PRE} por um valor igual à $diff_{F1}$. Sendo assim, a mudança de tensão calculada no ponto de alcance ajustado, devido ao evento de curto-circuito no ponto F1, é maior que a tensão de pré-falta para um curto-circuito franco no ponto de alcance ajustado.

Figura 3.9. Sistema elétrico fictício.



Fonte: SCHWEITZER & KASZTENNY (2018) com adaptações.

Figura 3.10. Diagrama de tensão para falta dentro da zona de proteção.



Fonte: SCHWEITZER & KASZTENNY (2018) com adaptações.

Considere agora uma falha no ponto F_2 , após o ponto de alcance ajustado, conforme apresentado na Figura 3.11. Novamente, a mudança de tensão devido à falha é próxima da máxima alteração na tensão de pré-falha calculada no ponto de alcance, V_{PRE} , e a projeção desta tensão no ponto de alcance é menor que o valor da mudança de tensão devido à falha por um valor igual à dif_{F2} . Sendo assim, a mudança de tensão calculada no ponto de alcance ajustado, devido ao evento de curto-circuito no ponto F_2 , é menor que a alteração na tensão de pré-falha para um curto-circuito franco no ponto de alcance ajustado.

Figura 3.11. Diagrama de tensão para falta fora da zona de proteção.

Fonte: SCHWEITZER & KASZTENNY (2018) com adaptações.

Baseado nas observações das Figuras 3.10 e 3.11, pode-se escrever a relação chave para uma função de distância utilizando grandezas incrementais, conforme SCHWEITZER & KASZTENNY (2018):

- (TD21 Opera) SE (Mudança de tensão calculada no ponto de alcance ajustado, devido à falta) > (Máximo valor da tensão de pré-falta no ponto de alcance)

$$\text{Operação} = \Delta v_{\text{alcance}} > v_{\text{alcance}} = \Delta v_{\text{alcance}} > v_{PRE}. \quad (3.28)$$

Desta forma, pode-se assumir que existe uma tensão de restrição e uma tensão de operação, e que quando a tensão de operação for maior que a tensão de restrição, o elemento pode operar. A função de proteção de distância TD21 compara o valor instantâneo da tensão de operação e restrição no domínio do tempo (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018).

O relé T400L calcula a tensão no ponto de alcance ajustado como (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018):

$$v_F = v - m_1 |Z_1| i_Z. \quad (3.29)$$

onde m_1 é o alcance ajustado em valor por unidade, $|Z_1|$ é a impedância da LT protegida, v é a tensão lida pelo relé, e i_Z é a corrente réplica lida pelo relé.

O sinal da tensão de operação, V_{OP} é calculado a partir da mudança de tensão no ponto de alcance da seguinte forma (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018):

$$V_{OP(t)} = V_F(t) - V_{F(t-1\text{ciclo})} = \Delta v - m_1 |Z_1| \Delta i_Z. \quad (3.30)$$

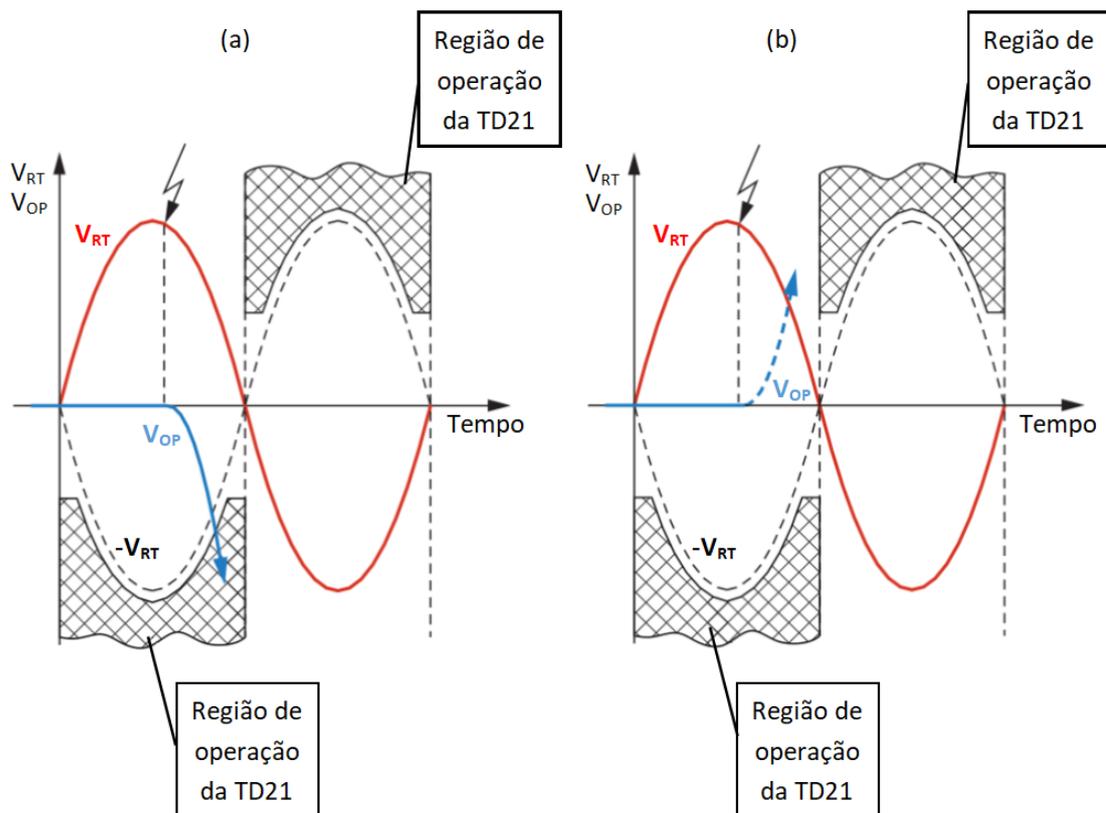
onde $V_{F(t)}$ é a tensão calculada no ponto de ajuste e $V_{F(t-1ciclo)}$ é a tensão calculada no ponto de ajuste atrasada de um ciclo da frequência fundamental.

A tensão de restrição é calculada utilizando a tensão de pré-falta calculada no ponto de alcance ajustado, ou (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018):

$$V_{RT(t)} = V_{F(t-1ciclo)}. \quad (3.31)$$

Como forma de incrementar a segurança da função TD21, a lógica da função não realiza apenas a comparação da tensão de restrição e operação, mas também verifica se estas tensões possuem sinais opostos. A Figura 3.12 apresenta a região de operação da função TD21, bem como o caso onde o elemento teria condições de atuar e o caso onde a lógica bloquearia a atuação (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018).

Figura 3.12. Região de operação da função TD21: (a) Falta legítima, e (b) Evento de chaveamento.



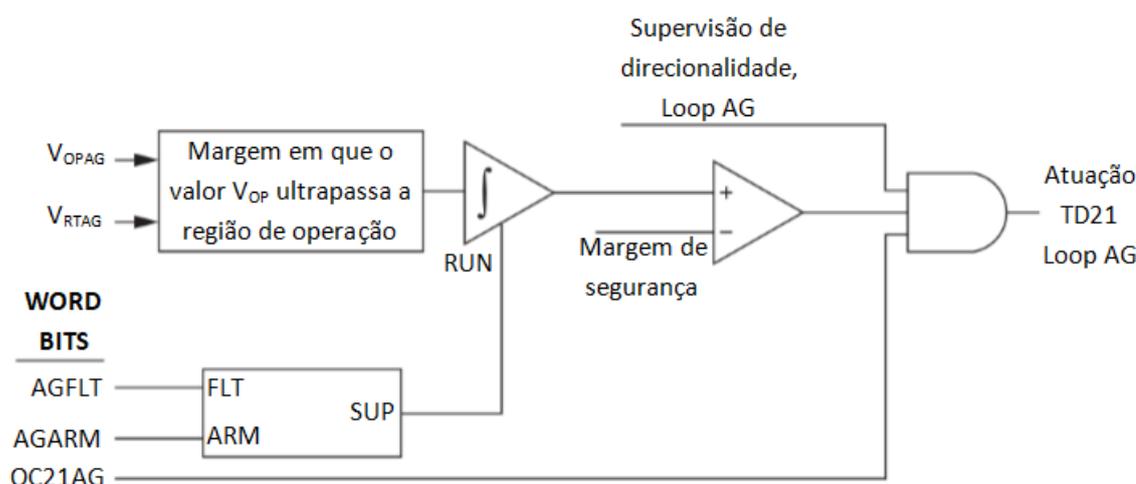
Fonte: SEL-T400L Instruction Manual (2018) com adaptações.

A conferência de polaridade é apresentada na Figura 3.12. Na Figura 3.12 (a) é apresentado um caso onde ocorre uma falta legítima e a função deve ser sensibilizada. Já na Figura 3.12

(b) é apresentado um caso de um evento de chaveamento onde a função TD21 não deve ser sensibilizada. Para definir a região de operação da função TD21 a tensão de restrição é invertida, e então é adicionada uma pequena margem na tensão de restrição invertida. A região de operação da função TD21 também utiliza um nível mínimo para o sinal de restrição, para a região próxima do cruzamento pelo zero. Desta forma, a Figura 3.12 apresenta, na área hachurada, a efetiva região de operação da função TD21. O elemento TD21 não realiza a lógica de proteção quando o sinal de operação excede o sinal de restrição e a polaridade dos mesmos for igual, conforme apresentado na Figura 3.12 (b).

A Figura 3.13 apresenta um diagrama lógico simplificado do elemento TD21 para o *loop* de falta AT, representado na figura pelo *loop* AG, para guardar proporcionalidade com o manual do relé.

Figura 3.13. Diagrama lógico simplificado da função TD21 para o *loop* de falta AG.



Fonte: SEL-T400L Instruction Manual (2018) com adaptações.

O elemento TD21 realiza o cálculo da margem em que o sinal de operação adentra a região de operação, considerando a polaridade conforme Figura 3.12. Esta margem é integrada caso a lógica do relé identifique que o *loop* esteja envolvido em uma falta, *WORD BIT AGFLT*, e as condições do sistema estão de acordo com parâmetros que garantam a operação segura dos elementos de proteção no domínio do tempo, *WORD BIT AGARM*. Este valor integrado é comparado com uma margem de segurança restrita ao fabricante. Caso esse valor seja superado, ainda é verificada a condição de sobrecorrente (OC21AG) e direcionalidade do evento. Cumpridos todos os requisitos, o elemento declara a existência de uma falta. Vale destacar que

esta lógica opera de forma independente para cada *loop* de falta. A supervisão de sobrecorrente possui condições definidas em fábrica e pode ser sintetizada da seguinte forma (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018):

$$|\Delta i_z| > \frac{V_{MIN}}{(1 - m_1)|Z_1|}. \quad (3.32)$$

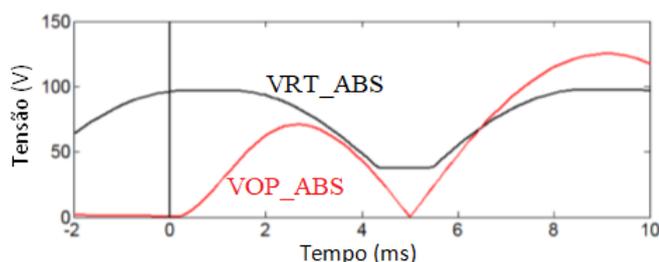
O limiar da supervisão de sobrecorrente não é um parâmetro definido pelo usuário. Esse ajuste depende da impedância da LT e do alcance ajustado, além de uma constante V_{MIN} , onde V_{MIN} é uma fração da tensão nominal definido pelo fabricante. Nota-se de (3.32) que para linhas curtas e alcances longos o valor de limiar aumenta (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2018).

3.2.5 Considerações sobre a Tensão de Restrição

A característica de restrição da função TD21 utilizada pelo relé T400L é calculada conforme apresentado na Figura 3.12. Porém, em determinados trabalhos são apresentadas algumas outras formas desta característica de restrição.

No trabalho de SCHWEITZER *et al.* (2016), a tensão de restrição se assemelha com a apresentada na Figura 3.12, porém considerando os valores absolutos, conforme apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.14. Operação do elemento de distância TD21 conforme (SCHWEITZER *et al.*, 2016).

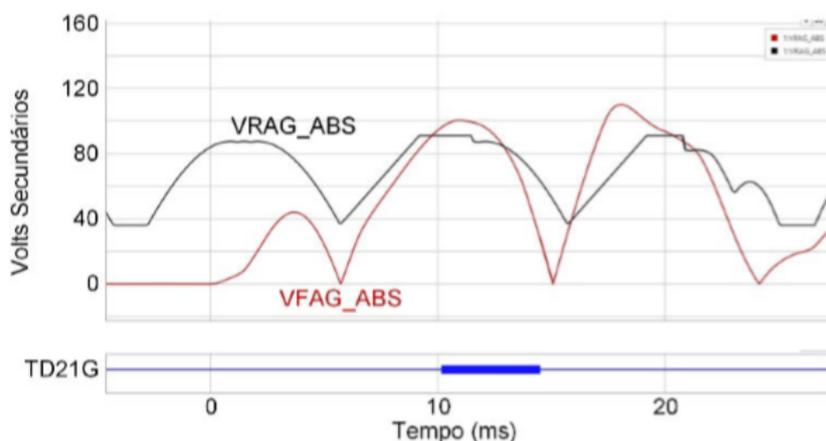


Fonte: SCHWEITZER *et al.* (2016).

No trabalho de SHARMA & MYNAM (2018) é apresentada uma característica de incremento na tensão de restrição, conforme pode ser observado nas Figuras 3.15 e 3.16. Nota-se que a tensão de restrição apresenta uma resposta esperada no primeiro semi-ciclo, diferente do início do segundo e terceiro semi-ciclo, que apresentam uma característica reforçada de restrição. O

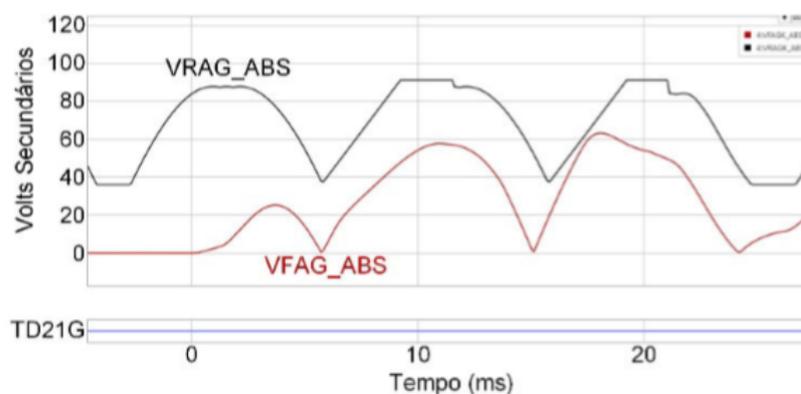
mesmo fato pode ser observado no trabalho de METZGER *et al.* (2018), conforme apresentado na Figura 3.17.

Figura 3.15. Operação do elemento de distância TD21 conforme SHARMA & MYNAM (2018).



Fonte: SHARMA & MYNAM (2018).

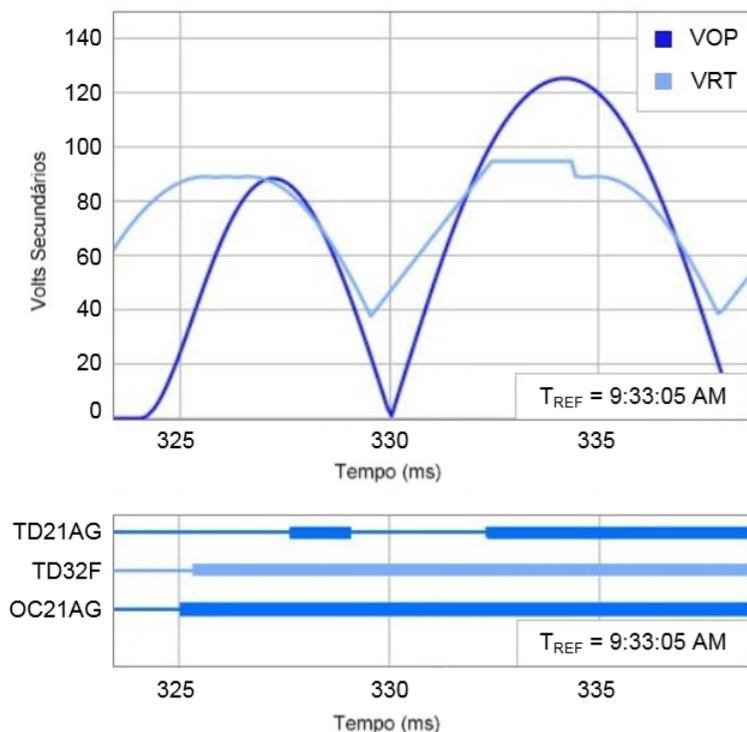
Figura 3.16. Operação do elemento de distância TD21 conforme SHARMA & MYNAM (2018).



Fonte: SHARMA & MYNAM (2018).

Nota-se que as Figuras 3.15, 3.16 e 3.17 apresentam uma condição de reforço na tensão de restrição. Porém, em nenhuma parte dos trabalhos de SHARMA & MYNAM (2018) e METZGER *et al.* (2018), ou mesmo no manual do relé T400L são apresentadas as condições que possibilitam este incremento na tensão de restrição. No entanto, para os ensaios realizados neste trabalho entende-se que esta característica de reforço não resultará em diferenças nos resultados, haja vista os ensaios serem realizados em equipamento real e os dados de entrada apresentarem boa proximidade, diferindo apenas pela tensão utilizada (primária ou secundária).

Figura 3.17. Operação do elemento de distância TD21 conforme METZGER *et al.* (2018).



Fonte: METZGER *et al.* (2018).

3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos da proteção de distância de linhas de transmissão, tanto no domínio fasorial, utilizando o elemento Mho, como no domínio do tempo. Os conceitos apresentados foram utilizados para o entendimento do funcionamento destas funções, podendo, dessa forma, avaliar a resposta destas funções frente aos transitórios dos TPC. Nota-se que a função de proteção de distância no domínio fasorial toma sua decisão baseada no cálculo e comparação de impedância, já a função de proteção no domínio do tempo utiliza uma comparação de tensões calculadas.

CAPÍTULO 4

TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS

Para disponibilização dos valores de tensão e corrente provenientes do Sistema de Energia Elétrica (SEE) é necessário utilizar equipamentos chamados de Transformadores para Instrumentos (TI), que transformam as altas correntes e tensões para valores condizentes com os equipamentos de medição, controle e proteção (CARVALHO JR., 2008).

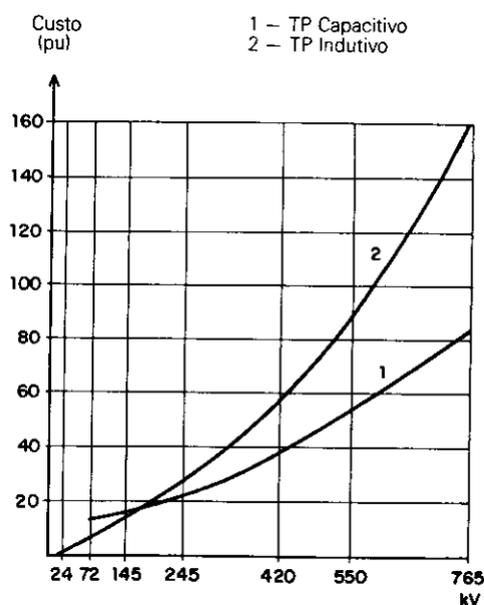
Os TI englobam os Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP) (MAMEDE FILHO, 2013). O TC obtém a corrente do circuito a ser medido por meio do seu primário e disponibiliza em seu secundário uma corrente proporcional à obtida em seu primário. O TP possui seu primário conectado em paralelo ao sistema, disponibilizando em seu secundário uma tensão proporcional à do sistema, ou seja, são equipamentos que possibilitam aos instrumentos de medição, controle e proteção funcionarem no sistema em que estão conectados sem a necessidade de possuir a mesma tensão de isolamento deste sistema (MAMEDE FILHO, 2013).

Existem diversos tipos de Transformadores de Potencial, sendo os mais utilizados os transformadores de potencial indutivos (TPI), os transformadores de potencial capacitivos (TPC), os transformadores de potencial resistivos (TPR) e os transformadores de potencial mistos. Os TP resistivos e mistos são utilizados em aplicações específicas, como laboratórios para medição de impulsos ou tensão contínua (SILVA, 2014). Por outro lado, os TPI e TPC são largamente utilizados nos SEE (CARVALHO JR., 2008).

A escolha por utilizar o TPI ou o TPC é baseada principalmente no nível de tensão do sistema e na necessidade de utilização de comunicação via *Power Line Carrier* (PLC). Em sistemas com tensões entre 600 V e 69 kV os TPI são mais utilizados, já para tensões superiores a 138 kV os TPC são predominantes. Por fim, quando se utiliza PLC para comunicação, o uso de TPC passa a ser obrigatório. Vale destacar que, para tensões inferiores a 69 kV os esquemas empregados, geralmente, não utilizam *carrier* e o custo do TPI é inferior ao do TPC, explicando

assim o uso predominante nesta faixa de tensão. Para tensões entre 69 kV e 138 kV, o fator decisivo entre o uso de TPI e TPC é o uso de PLC, sendo que os TPI possuem custo menor nesta classe de tensão (CARVALHO JR., 2008). A Figura 4.1 apresenta um comparativo do custo do TPI e TPC em relação à tensão nominal (D'AJUZ *et al.*, 1985).

Figura 4.1. Custo de Transformadores de Potencial em Função da Tensão Nominal.



Fonte: D'AJUZ *et al.* (1985).

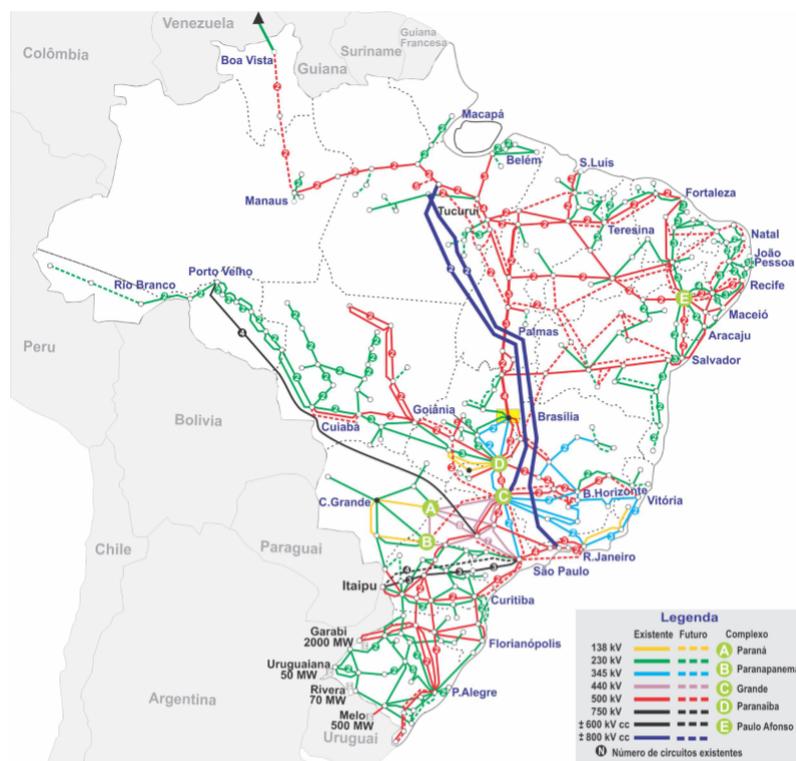
4.1 ESTRUTURA DOS TPC

Conforme apresentado na Figura 4.2, a grande maioria das LT do SIN possuem tensões superiores a 138 kV. Dessa forma, como apresentado anteriormente, os TPC são maioria nas medições das tensões das LT.

A Figura 4.3 apresenta esquematicamente os TPI e TPC e a Figura 4.4 apresenta um esquema elétrico simplificado de um TPC típico, sem considerar os elementos para uso do PLC. Estes equipamentos são constituídos por uma coluna capacitiva, composta basicamente por C_1 e C_2 , que possui a função de divisor de tensão, provendo uma tensão de derivação no ponto "b". Esta tensão geralmente está na faixa de 15 kV, possibilitando o uso de um TPI de menor isolamento. Este disponibiliza tensões apropriadas para conexão dos equipamentos de medição e proteção, na faixa de 110 V e $115/\sqrt{3}$ V.

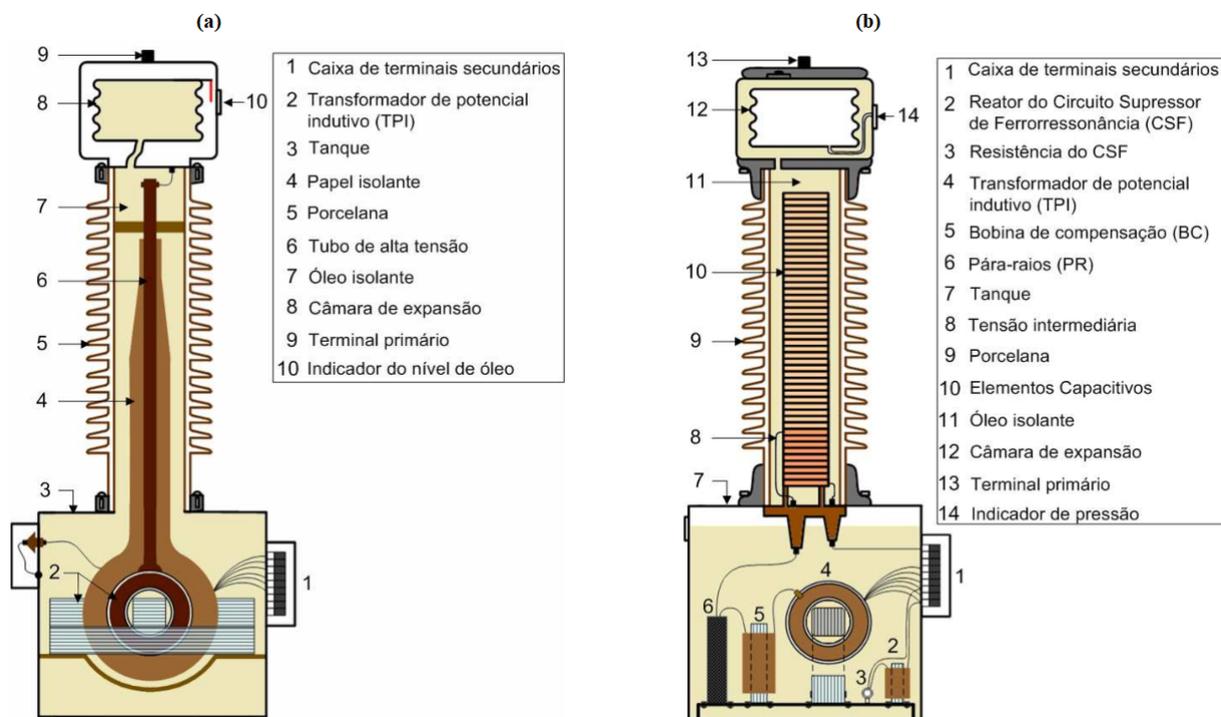
Para que a tensão em 'b' independa da corrente de carga do secundário do TPI e ainda

Figura 4.2. Sistema de Transmissão Brasileiro - Horizonte 2019.

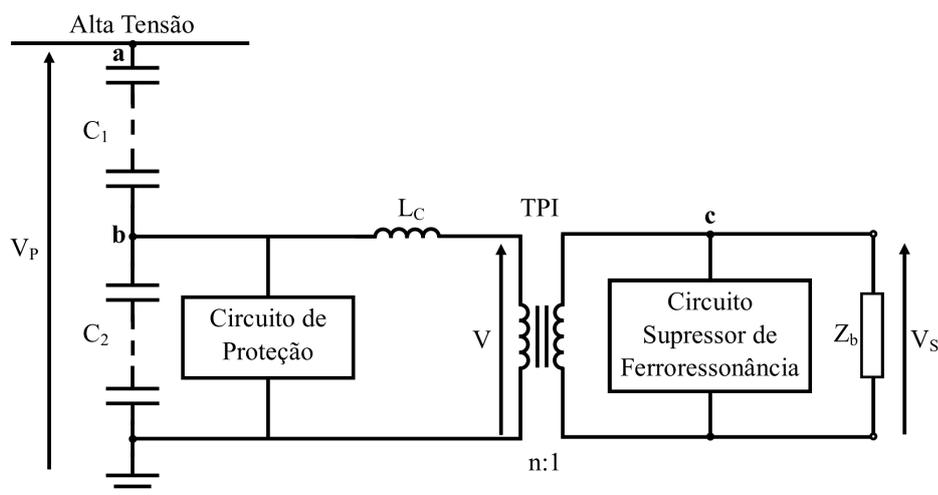


Fonte: ONS (2018).

Figura 4.3. Esquemático do (a) TPI, e (b) TPC.



Fonte: CARVALHO JR. (2008).

Figura 4.4. Esquema Simplificado do TPC.

Fonte: CARVALHO JR. (2008).

tenha a sua defasagem corrigida, um reator de compensação (L_C) é projetado. Para tanto, o conjunto deve possuir uma reatância ωL_C que satisfaça (4.1).

$$\omega \cdot L_C = \frac{1}{\omega \cdot (C_1 + C_2)} \quad (4.1)$$

Em algumas condições de operação, como em um religamento sem sucesso de uma LT ou após a eliminação de um curto-circuito no secundário de um TPC, sobretensões podem surgir no capacitor C_2 . Igualmente, podem surgir oscilações de baixas frequências ($1/3$, $1/5$, $1/7$ da frequência fundamental) que podem ocasionar o fenômeno de ferroressonância. Tal fenômeno, simplificado, é a ressonância entre as capacitâncias e as indutâncias não lineares do circuito (D'AJUZ *et al.*, 1985).

O fenômeno de ferroressonância pode causar sobretensões e sobrecorrentes destrutivas aos equipamentos de proteção e medição, além de prover valores discrepantes da tensão primária. Para minimizar ou suprimir os efeitos da ferroressonância, é utilizado um circuito supressor de ferroressonância (CSF), colocado em um dos enrolamentos do TPI, geralmente no enrolamento secundário (SILVA, 2014). Os CSF são classificados em passivos, quando é constituído de resistores, capacitores e/ou indutores e em ativos quando estes possuem dispositivos semicondutores (SILVA, 2014).

Para se evitar que sobretensões no sistema causem danos aos componentes do TPC é utilizado um circuito de proteção, geralmente no primário do TPI. Os elementos geralmente uti-

lizados para este tipo de proteção são para-raios, centelhadores e/ou centelhador associado a um capacitor em paralelo com uma resistência (D'AJUZ *et al.*, 1985).

A resposta em frequência indica a resposta em regime estacionário de um sistema com sinal de entrada senoidal. Um sistema linear estável, invariante no tempo e com uma entrada senoidal, tem como resposta um sinal senoidal de mesma frequência do sinal de entrada, porém com amplitude e ângulo de fase diferente dos de entrada. A resposta em frequência dos TPC são influenciadas por alguns fatores, sendo os três principais (ANNABATULLA *et al.*, 2014):

- Circuito supressor de ferroressonância (CSF);
- Parâmetros de projeto do TPC;
- Carga conectada ao secundário do TPC.

A resposta em frequência para o CSF passivo é melhor que a do ativo. Já em relação ao projeto, a influência de construção dos TPC consiste geralmente dos efeitos da relação de transformação e da capacitância do divisor capacitivo (ANNABATULLA *et al.*, 2014). Em relação à carga conectada no secundário do TPC, verifica-se que cargas reduzidas tornam o TPC mais susceptível ao aparecimento de oscilações de baixa frequência e ferroressonância CARVALHO JR. (2008).

Em relação à resposta transitória dos TPC, diversos fatores afetam a severidade dos transitórios de um TPC, sendo os principais:

- Ângulo de incidência da falta na onda de tensão (falta externa);
- Valores das capacitâncias do divisor capacitivo;
- Circuito supressor de ferroressonância (CSF);
- Carga conectada ao TPC;
- Relação de espiras do TPI;
- Corrente de excitação do TPI (COSTELLO; ZIMMERMAN, 2012).

4.2 MODELOS AVALIADOS

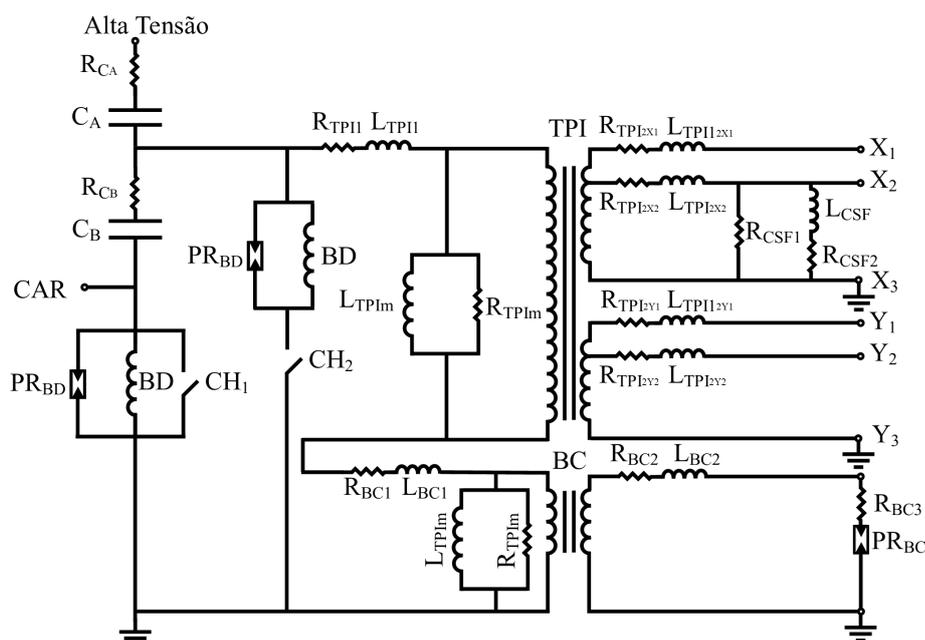
Como descrito anteriormente, diversos fatores alteram a resposta transitória dos TPC. Desta forma, é interessante avaliar as particularidades destes equipamentos, a fim de considerar sua influência sobre a atuação das funções de proteção. Para avaliação das funções de proteção, é

importante observar o espectro de frequência que estas funções utilizam. Sendo assim, sabe-se que a função de proteção no domínio fasorial possui filtros que limitam a frequência em algumas centenas de Hz, já a função de proteção de distância no domínio do tempo realiza uma subamostragem de 10 kHz, tornando o espectro de interesse da ordem de alguns milhares de Hz. Diante do apresentado, espera-se que os modelos digitais dos TPC apresentem resposta em frequência fidedigna até cerca de 10 kHz. Com este intuito foram analisados três modelos diferentes de TPC de 230 kV, sendo dois deles provenientes de uma avaliação de TPC reais e o último proveniente de um modelo proposto para estudos relacionados à proteção de sistemas elétricos.

4.2.1 TPC TRENCH 230 kV/60 Hz

O primeiro TPC avaliado é proveniente do estudo de CARVALHO JR. (2008), onde foram modelados alguns TPC com base na resposta em frequência destes equipamentos. O TPC em estudo neste tópico foi confeccionado em 1987 pela fabricante Trench, modelo TEM230H, tensão nominal de 230 kV e frequência de 60 Hz. Para este equipamento, o reator de compensação é um transformador de dois enrolamentos e o circuito supressor de ferroressonância é formado pelo paralelo de uma resistência e um reator saturável em série com uma resistência.

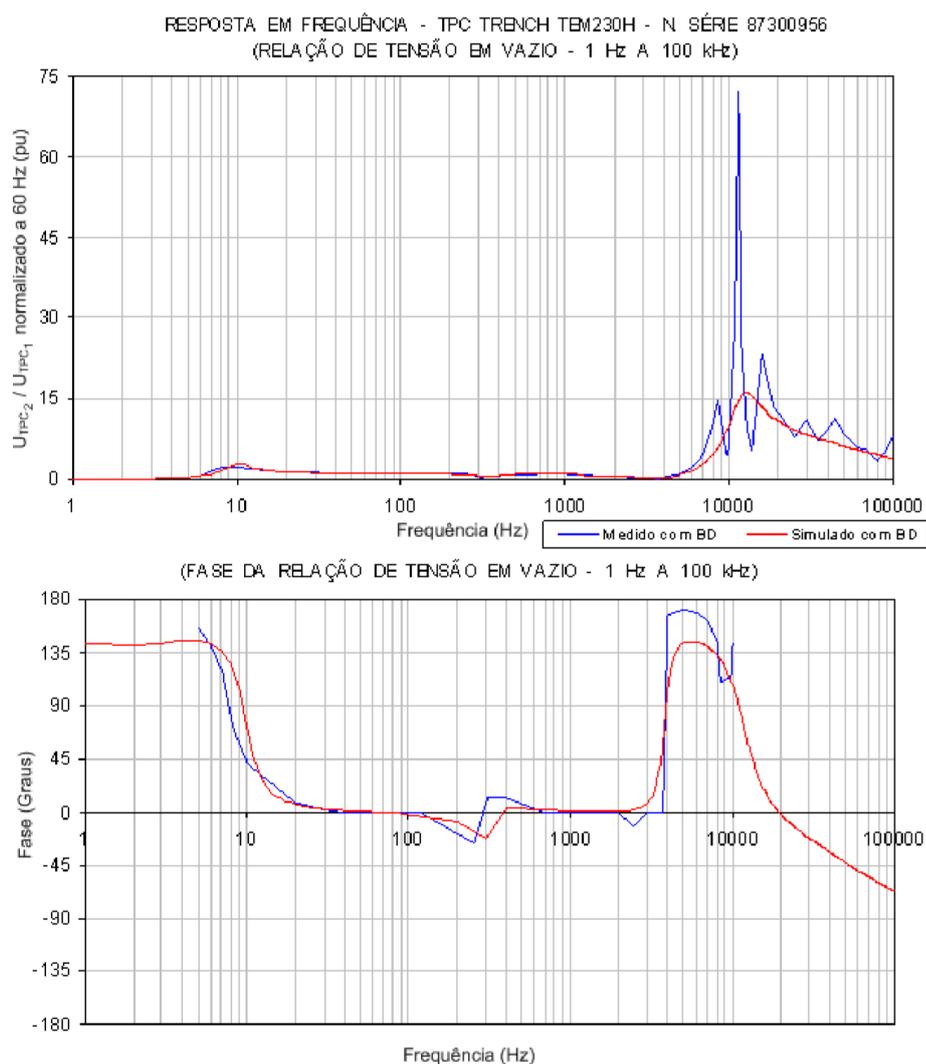
Figura 4.5. Circuito equivalente do TPC Trench TEM230H.



Fonte: CARVALHO JR. (2008).

Apresenta-se na Figura 4.5 o circuito equivalente do TPC Trench TEM230H. A partir dos dados coletados por CARVALHO JR. (2008), o TPC foi modelado no *software* ATP e por meio da função *FREQUENCY SCAN* do ATP foi possível obter a resposta em frequência do TPC e compará-la com os valores levantados nos ensaios, conforme apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6. Resposta em frequência do TPC TRENCH.



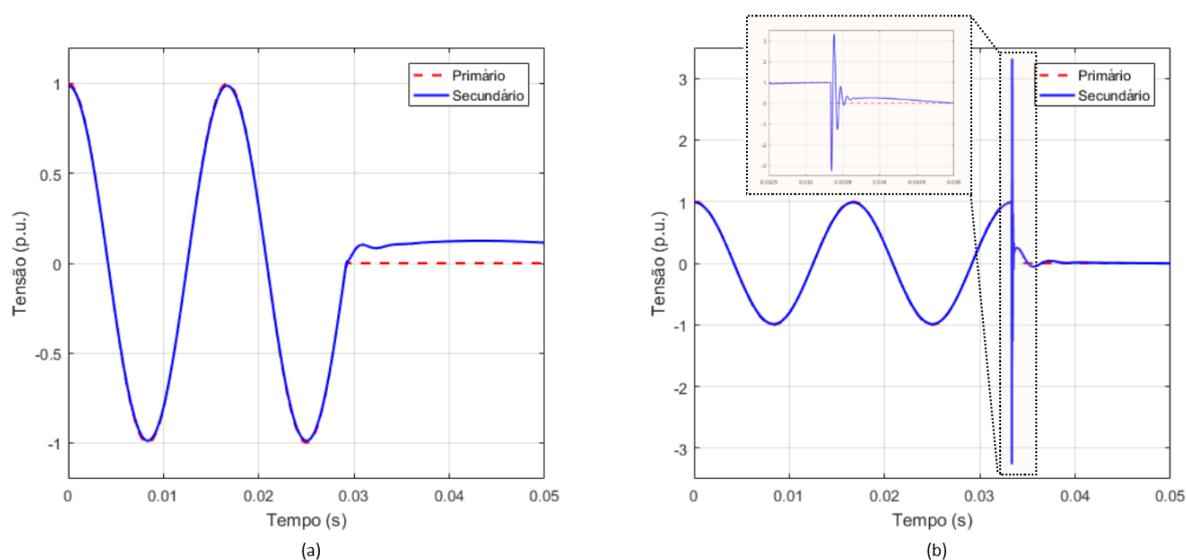
Fonte: CARVALHO JR. (2008) com adaptações.

Da Figura 4.6 nota-se que o TPC apresenta amplificação da tensão secundária em relação à primária para diversas frequências, tanto abaixo quanto acima da nominal. Por volta de 10 Hz, temos uma amplificação próxima de 3 pu. Já para os 10 kHz, a amplificação é de cerca de 16 pu. Também ocorre atenuação para frequências menores que 6 Hz e, entre 200 Hz e 5 kHz. A fase da tensão secundária também apresenta alteração significativa para diversas frequências, infligindo alterações de até 150° para frequências abaixo de 10 Hz e acima de 3 kHz. Nota-se

que até aproximadamente 10 kHz a resposta em frequência levantada em ensaios e a simulada apresentam razoável similaridade, mostrando assim a viabilidade de uso deste modelo para obtenção dos objetivos propostos neste trabalho.

A Figura 4.7 apresenta a resposta dinâmica do TPC frente a um curto-circuito aplicado no local onde o mesmo está instalado, para um ângulo de incidência da falta de 0° e 90° , considerando a tensão na fase A como referência. Nota-se que a tensão primária vai a zero no instante do curto, porém a tensão secundária permanece com valores diferentes de zero. Para o caso onde o ângulo de incidência é de 90° verifica-se um transitório acentuado.

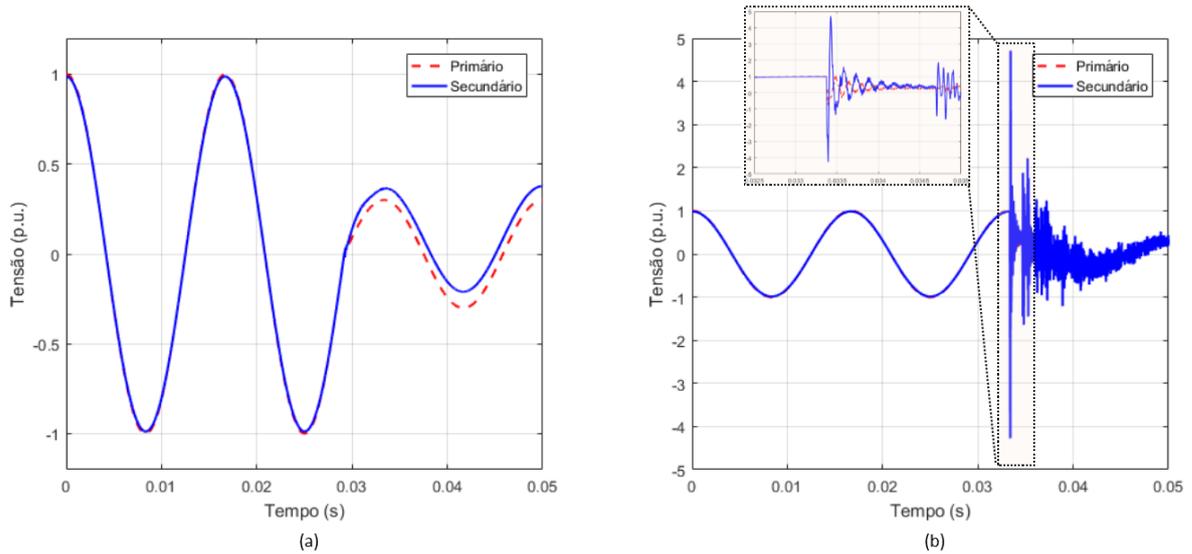
Figura 4.7. Resposta dinâmica do TPC para uma falta no ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90° .



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.8 apresenta-se a resposta dinâmica do TPC frente a um curto-circuito aplicado a 20 km do ponto de medição, em uma LT de 200 km. Neste caso a tensão não vai a zero no instante da falta, porém pode-se notar que a tensão secundária apresenta valores diferentes da primária para ambos os casos. Quando o ângulo de incidência é de 90° o sistema apresenta transitórios relevantes após o instante da falta.

Figura 4.8. Resposta dinâmica do TPC para uma falta em uma LT 20 km a frente do ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90° .

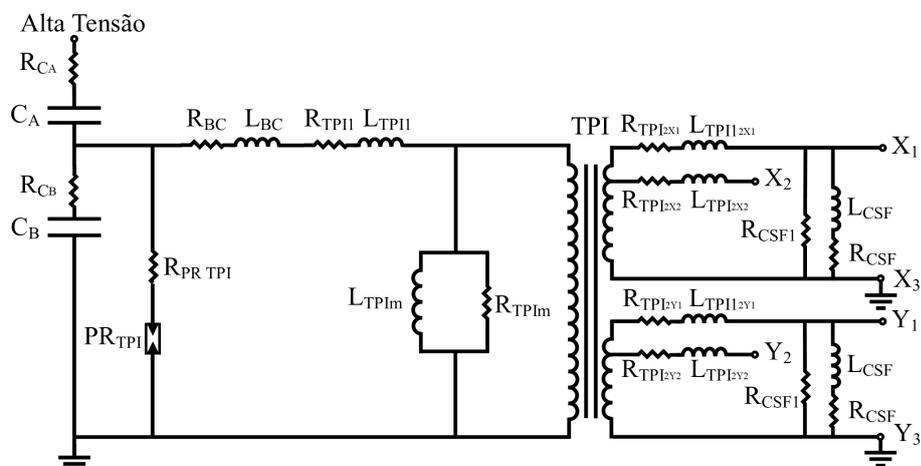


Fonte: Autoria própria.

4.2.2 TPC HAEFELY 230 kV/60 Hz

O segundo TPC avaliado também é proveniente dos estudos de CARVALHO JR. (2008), sendo fabricado em 1968 pela empresa Haefely, modelo CVE230, com tensão nominal de 230 kV e frequência nominal de 60 Hz. O reator de compensação deste equipamento é formado por um reator simples e no circuito supressor de ferorrressonância são utilizadas cargas estabilizadoras.

Figura 4.9. Circuito equivalente do TPC Haefely CVE230.

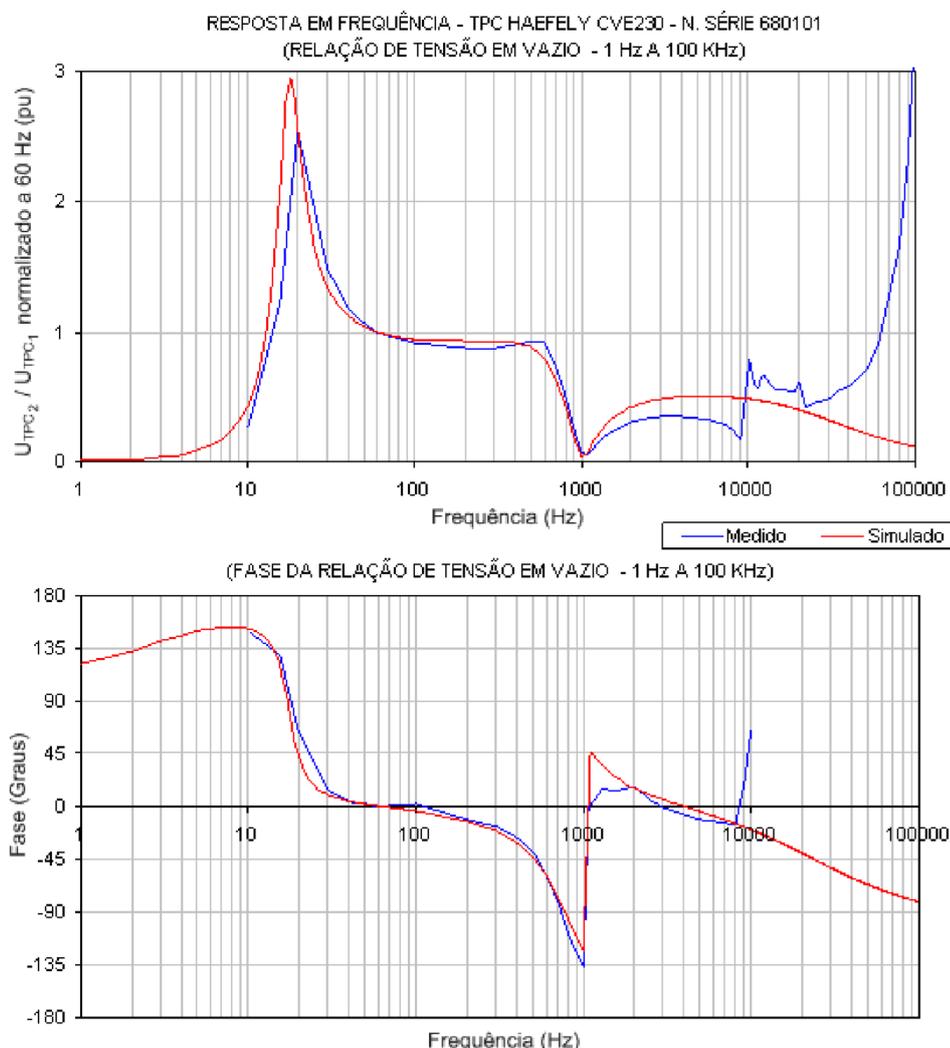


Fonte: CARVALHO JR. (2008).

A Figura 4.9 apresenta o circuito equivalente do TPC Haefely CVE230. Como realizado no

tópico anterior, foi utilizada a função *FREQUENCY SCAN* do ATP para obtenção da resposta em frequência e compará-la com os valores levantados nos ensaios, conforme apresentado na Figura 4.10.

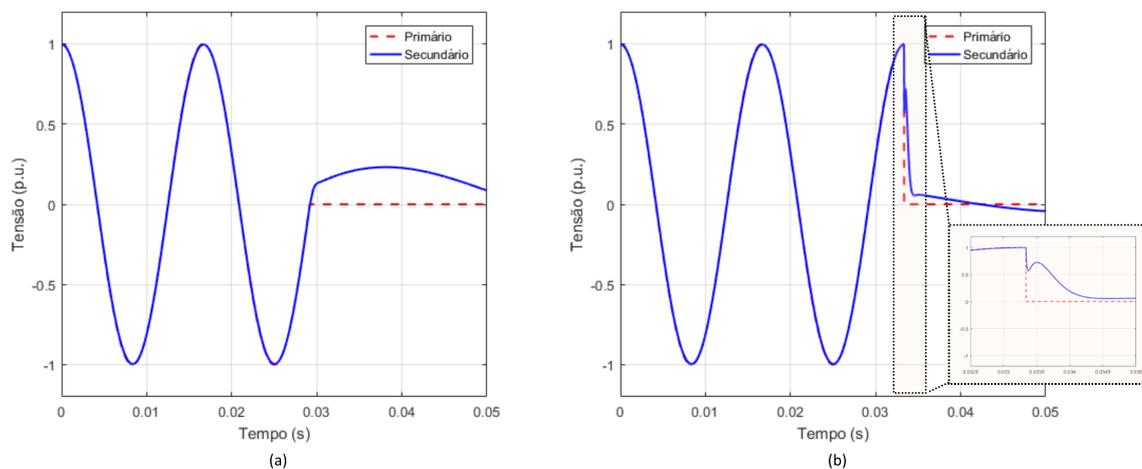
Figura 4.10. Resposta em frequência do TPC HAEFELY.



Fonte: CARVALHO JR. (2008) com adaptações.

Nota-se da Figura 4.10 que, entre 15 Hz e 60 Hz, o TPC amplifica a tensão secundária em relação à primária em até 3 vezes, porém para as demais frequências verifica-se apenas atenuação da tensão secundária. Para a distorção de fase, tem-se erros de até 150° para frequências abaixo e acima de 60 Hz. A Figura 4.11 apresenta a resposta dinâmica do TPC frente a um curto-circuito aplicado no local onde o mesmo está instalado, para um ângulo de incidência da falta de 0° e 90° , considerando a tensão na fase A como referência. Verifica-se que, após o instante da falta, a tensão secundária difere da tensão primária de forma significativa.

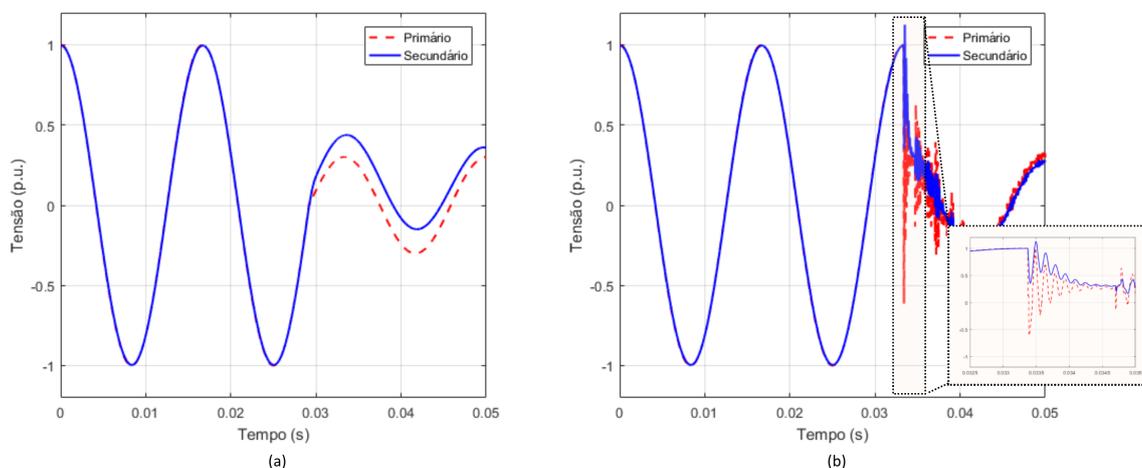
Figura 4.11. Resposta dinâmica do TPC para uma falta no ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90° .



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.12 apresenta a resposta dinâmica do TPC frente a um curto-circuito aplicado a 20 km do ponto de medição, em uma LT de 200 km. Novamente, a tensão secundária difere da primária, sendo que para faltas com ângulo de incidência de 90° , os transitórios de alta frequência são atenuados consideravelmente.

Figura 4.12. Resposta dinâmica do TPC para uma falta em uma LT 20 km a frente do ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90° .

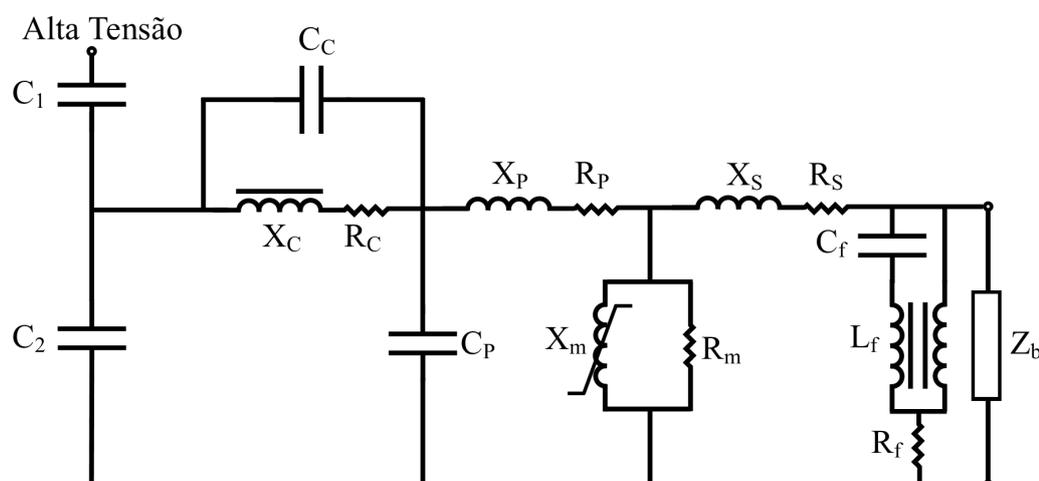


Fonte: Autoria própria.

4.2.3 TPC IEEE 230 kV/60 Hz

O terceiro e último TPC avaliado neste trabalho é disponibilizado pelo Comitê *Power System Relaying and Control* do IEEE e foi proposto com o intuito de prover conceitos para os padrões de testes de proteção em LT. A Figura 4.13 apresenta o circuito equivalente do TPC. Nota-se que o reator de compensação é um reator núcleo de ferro e o circuito supressor de ferorrressonância é formado por um capacitor, um reator de dois enrolamentos e um resistor.

Figura 4.13. Circuito equivalente do TPC IEEE.



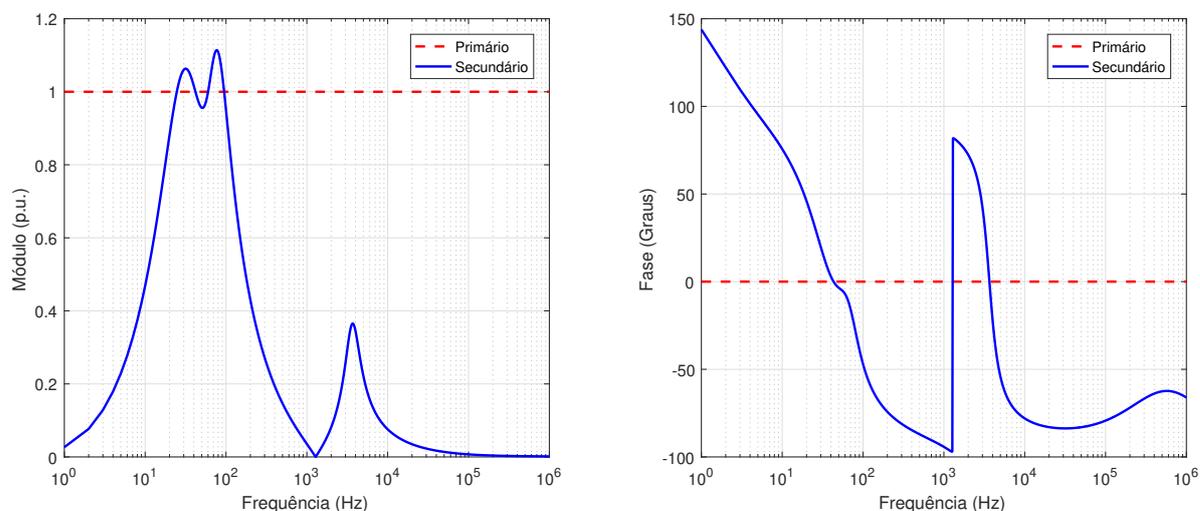
Fonte: COMMITTEE (2005).

Com base no modelo apresentado, foi utilizada a função *FREQUENCY SCAN* do ATP para obtenção da resposta em frequência do TPC de 1 Hz até 1 MHz, conforme apresentado na Figura 4.14.

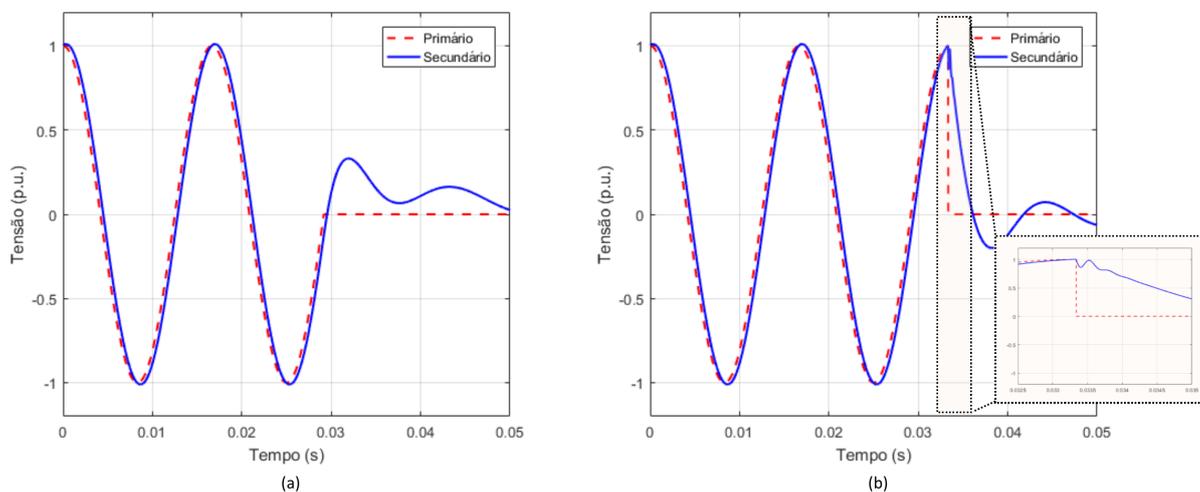
Da Figura 4.14, nota-se que existe amplificação da tensão secundária em relação à primária em duas faixas de frequência, entre 20 Hz e 40 Hz, e entre 60 Hz e 100 Hz. Para as demais frequências, a tensão secundária é atenuada. Já em relação à defasagem do sinal, tem-se alterações de até 150° para baixas frequências e de até 100° para frequências superiores.

A Figura 4.15 apresenta a resposta dinâmica do TPC frente a um curto-circuito aplicado no local onde o mesmo está instalado, para um ângulo de incidência da falta de 0° e 90°, considerando a tensão na fase A como referência. A Figura 4.16 apresenta a resposta dinâmica do TPC frente a um curto-circuito aplicado a 20 km do ponto de medição, em uma LT de 200 km.

Em relação à resposta dinâmica deste TPC apresentada na Figura 4.15, notam-se oscilações

Figura 4.14. Resposta em frequência do TPC IEEE.

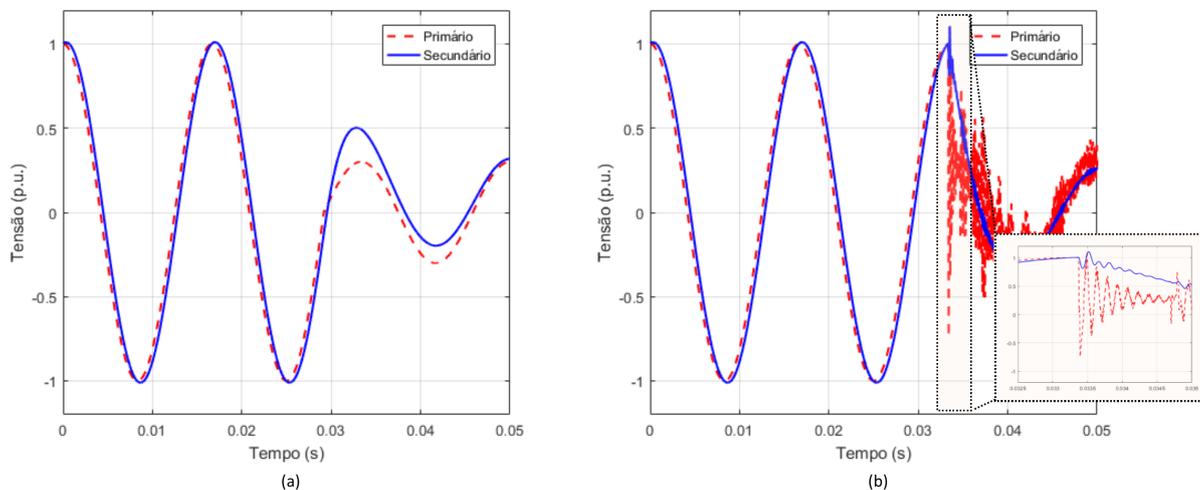
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.15. Resposta dinâmica do TPC para uma falta no ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90° .

Fonte: Autoria própria.

na tensão secundária para ambos os casos de ângulo de incidência de falta. Observando a Figura 4.16, para o caso da falta ocorrendo em 90° da tensão, nota-se que a tensão secundária não acompanha as oscilações apresentadas na tensão primária, atenuando componentes de maior frequência e, portanto, não apresentando uma correta representação da tensão primária.

Figura 4.16. Resposta dinâmica do TPC para uma falta em uma LT 20 km a frente do ponto de medição, considerando o ângulo de incidência da falta de: (a) 0° ; e (b) 90° .



Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram abordados os temas relativos aos Transformadores de Potencial Capacitivos, como os casos em que se utilizam estes equipamentos, um breve relato sobre a estrutura e funcionamento dos TPC, além da apresentação dos três modelos avaliados nesta dissertação.

Utilizando a resposta em frequência e a resposta dinâmica dos TPC estudados pode-se verificar que a tensão secundária apresenta diferenças em relação a tensão primária, sendo dessa forma, importante avaliar as possíveis diferenças na resposta dos relés de proteção quando utilizadas tensões provenientes do primário e secundário dos TPC.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

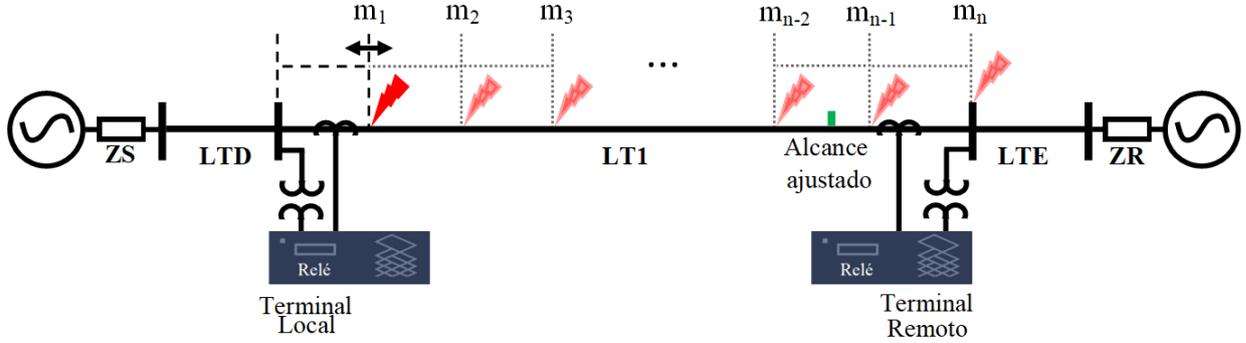
A fim de avaliar o impacto dos transitórios dos TPC sobre o desempenho das proteções de distância TD21 e PH21, serão apresentados os resultados obtidos de relés reais, utilizando arquivos *COMTRADE* gerados a partir de um sistema elétrico com parâmetros reais para as linhas de transmissão. Conforme mencionado no Capítulo anterior, dos TPC utilizados, dois são modelados a partir de equipamentos reais, sendo o circuito real estimado e modelado no *software Alternative Transient Program (ATP)* e um modelo utilizado em simulações para avaliação da proteção de linhas de transmissão, disponibilizado pelo Comitê *Power System Relaying and Control* do IEEE. As simulações realizadas buscam avaliar o desempenho das funções para diferentes situações de operação do sistema modelado, sendo elas a variação da resistência de falta, a variação do *Source-to-Impedance Ratio (SIR)*, a variação do ângulo de incidência da falta e a variação do carregamento da LT protegida. De acordo com PORTELA *et al.* (2009), grande parte dos defeitos em LT é ocasionada por curto-circuitos monofásicos fase-terra. Sendo assim, em todos os ensaios deste trabalho foram realizados curtos monofásicos da fase A para Terra.

5.1 SISTEMA TESTADO E METODOLOGIA DOS TESTES

Com o intuito de avaliar a influência dos TPC na atuação das funções analisadas neste trabalho, foi implementado um sistema elétrico fictício de 230 kV/60 Hz conforme ilustrado na Figura 5.1. Os sinais de tensão e corrente analisados são medidos na linha LT1 nos terminais local e remoto. Todas as linhas de transmissão foram modeladas a parâmetros distribuídos constantes na frequência usando dados de um sistema real brasileiro, conforme apresentado na Tabela 5.1. A linha LT1 possui 200 km de extensão e as linhas LTD e LTE possuem 15 km cada. Além disso, foram incluídos equivalentes de Thévenin, os quais representam os sistemas elétricos em torno das linhas LTD e LTE, conforme parâmetros apresentados na Tabela 5.2,

onde SIR_{L0} , SIR_{L1} , SIR_{R0} e SIR_{R1} são o SIR de sequência zero da fonte L, o SIR de sequência positiva da fonte L, SIR de sequência zero da fonte R e o SIR de sequência positiva da fonte R, respectivamente.

Figura 5.1. Esquema simplificado da bancada de testes



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.1. Parâmetros da LT.

Sequência	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ωC ($\mu S/km$)
Zero	0,522	1,432	2,293
Positiva	0,098	0,53	3,252

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.2. Dados do circuito equivalente de Thévenin.

Componente	Variável	Valor
Impedância Z_S	$R_0(\Omega)$	$120,06 \times SIR_{L0}$
	$X_0(\Omega)$	$329,36 \times SIR_{L0}$
	$R_1(\Omega)$	$22,54 \times SIR_{L1}$
	$X_1(\Omega)$	$121,9 \times SIR_{L1}$
Impedância Z_R	$R_0(\Omega)$	$120,06 \times SIR_{R0}$
	$X_0(\Omega)$	$329,36 \times SIR_{R0}$
	$R_1(\Omega)$	$22,54 \times SIR_{R1}$
	$X_1(\Omega)$	$121,9 \times SIR_{R1}$
Fontes S e R	E_S (p.u.)	$1,01 \angle 1,036^\circ \times E_S^* \angle \beta_S$
	E_R (p.u.)	$1,00 \angle -5,8947^\circ \times E_R^* \angle \beta_R$

Fonte: Autoria própria.

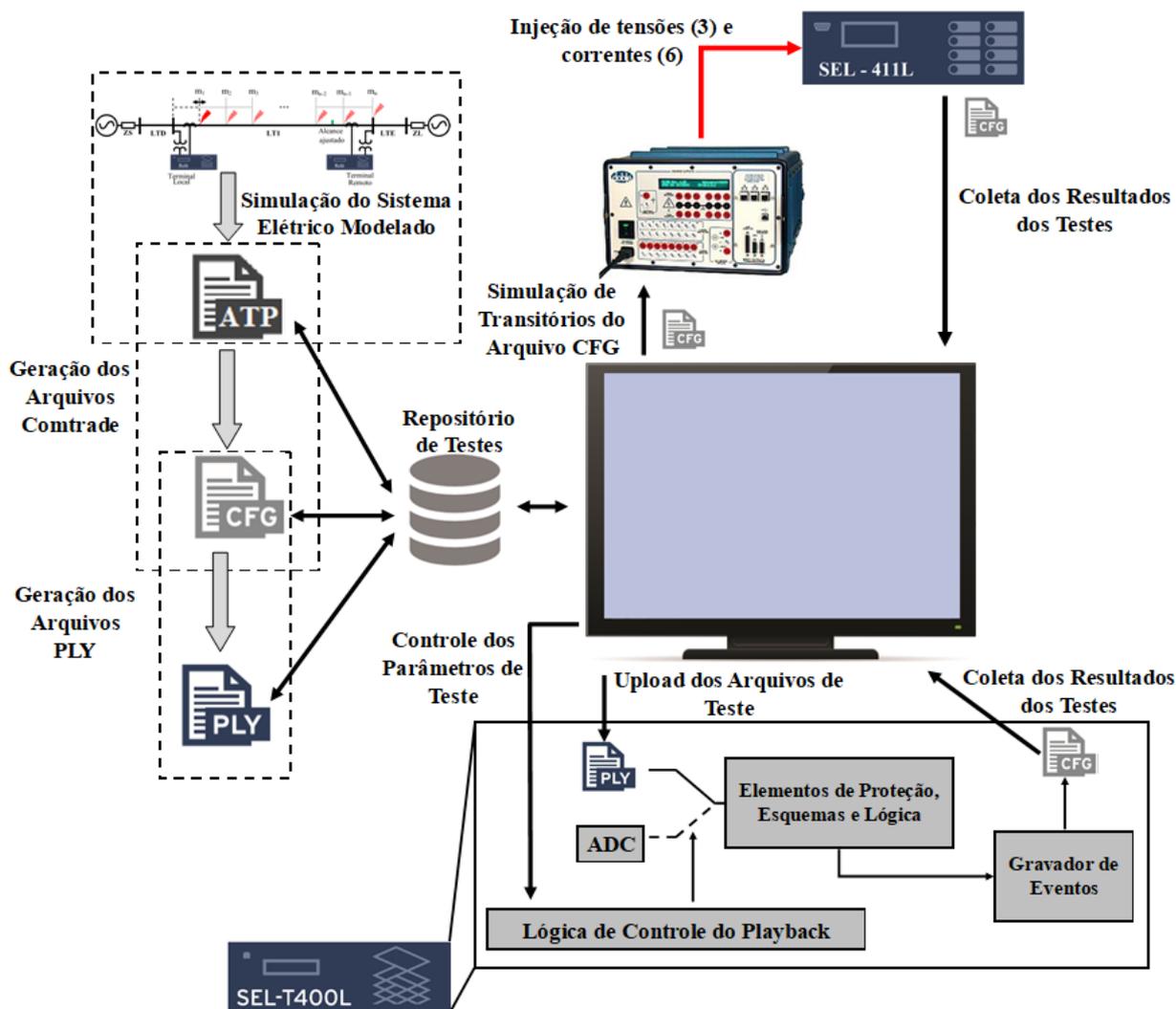
Foram realizadas simulações considerando faltas monofásicas sólidas entre a fase A e o terra, conforme informado anteriormente, e distância de falta de 5% a 95% com passos de 10% e 5% em

relação ao terminal local da linha LT1, sendo aplicadas faltas em diversos locais da LT1. Desta forma é possível avaliar faltas próximas do ponto de alcance ajustado das funções de proteção em passos de cálculo menores. As fontes foram ajustadas para simular um carregamento fixo, exceto quando a simulação avaliada foi a de variação do carregamento, onde foram simulados diversos cenários de carregamento. Nota-se na Tabela 5.2 que as fontes de tensão equivalentes foram multiplicadas pelos operadores complexos $E_S^* \angle \beta_S$ e $E_L^* \angle \beta_L$, respectivamente, para facilitar a demonstração da variação do carregamento, calculado considerando uma abertura angular entre as barras local e remota da LT1. Adicionalmente, o SIR utilizado foi de 0,1 para ambas as fontes, quando não realizada a variação deste parâmetro. Os ângulos de incidência para as faltas foram de 90° no ponto de ocorrência do defeito quando variadas outras características de falta, assumindo uma referência do tipo seno, e variando de 0° a 345° quando realizada a análise deste parâmetro.

Para avaliação da operação dos relés de proteção SEL-T400L e SEL-411L diante de diferentes cenários, foram gerados casos de falta utilizando o ATP sendo simulados os diversos TPC utilizados neste trabalho. Nos casos simulados, consideraram-se faltas no sistema teste descrito, assumindo diferentes localizações de faltas, ângulos de incidência, SIR e carregamento. A partir dos dados produzidos pelo ATP foram gerados arquivos *COMTRADE* que, por sua vez, foram utilizados para geração de arquivos PLY, utilizados para simulação no relé T400L através da funcionalidade *Playback*. Todos os arquivos gerados foram armazenados em um banco de dados, também chamado de repositório de dados, para posterior uso em ensaios nos equipamentos reais SEL-T400L e SEL-411L. Os arquivos *COMTRADE* foram reproduzidos pela mala de teste Doble F6150sv em relés SEL-411L, considerando um relé para o terminal local e outro para o terminal remoto da LT protegida. Já para os ensaios no relé SEL-T400L foi utilizada a funcionalidade *Playback*, em que os arquivos PLY são inseridos no relé diretamente após o conversor analógico digital. A funcionalidade *Playback* é importante, pois permite reproduzir sinais com taxa de amostragem superiores às disponibilizadas pela mala de teste Doble F6150sv, que limita o sinal de teste em 10 kHz. Com isso e considerando os filtros aplicados, limita-se o espectro dos sinais, evitando problemas com as respostas em frequência dos TPC para faixas de frequência não validadas na literatura. Durante testes preliminares verificou-se que, para as funções de proteção no domínio do tempo, a re-amostragem para 10 kHz produz perda de informação do sinal. A Figura 5.2 apresenta um diagrama esquemático dos procedimentos e

equipamentos utilizados nos testes realizados.

Figura 5.2. Esquema simplificado da bancada de testes.



Fonte: Autoria própria.

Para análise dos ensaios realizados foram coletados os arquivos de evento gerados pelos respectivos relés. Para avaliar o instante da atuação e possibilitar a comparação de todos os casos ensaiados, foi utilizada a posição da chave que gerou a falta no sistema simulado, convertendo este valor de posição para um sinal de corrente, sendo a posição aberta convertida para 0 A e a posição fechada convertida para 1 A. Este sinal foi injetado nos relés juntamente com os sinais de falta e coletados os arquivos de evento gerados pelos respectivos relés contendo os dados de atuação, os sinais de falta e o sinal de posição. Dessa forma, foi possível identificar o momento exato do início da falta e avaliar assim, o tempo total para atuação de cada ensaio, conforme cada caso.

Tabela 5.3. Resumo dos casos analisados.

Variável	Constante	Limites	Passo	Tipos de curto
R_F	$\theta = 90^\circ$, SIR=0,1 $\delta = -5^\circ$	0 a 60 Ω $d=0,05$ a 0,95 p.u.*	5 Ω 0,1 ou 0,05 p.u.	AT
SIR	$\theta = 90^\circ$, $R_F = 0 \Omega$ $\delta = -5^\circ$	0,1 a 2,0 $d=0,05$ a 0,95 p.u.*	0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 0,1 ou 0,05 p.u.	AT
θ	$R_F = 0 \Omega$, SIR=0,1 $\delta = -5^\circ$	0° a 345° $d=0,05$ a 0,95 p.u.*	15° 0,1 ou 0,05 p.u.	AT
δ	$\theta = 90^\circ$, $R_F = 0 \Omega$ SIR=0,1	-40° a 40° $d=0,05$ a 0,95 p.u.*	5° 0,1 ou 0,05 p.u.	AT

*Faltas em 5%, 10%, 20%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 80%, 90% e 95% da LT1
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5.3 apresenta de modo sintetizado os dados utilizados para os ensaios realizados. Vale destacar que devido ao fato de diversos trabalhos já terem realizado a avaliação da função fasorial de distância frente à variação dos parâmetros do sistema e da resposta da função frente a transitórios dos TPC, optou-se por reduzir o número de casos simulados para o relé SEL-411L. Sendo assim, foram realizados os ensaios que se mostraram mais significativos, buscando evitar que os equipamentos de teste e o relé SEL-411L passem por esforços e desgastes de forma desnecessária, pois nestes casos foi-se realizada a injeção física de tensões e correntes.

5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O RELÉ T400L

O relé T400L disponibiliza dois tipos de arquivo de eventos, um de ultra-alta resolução, com amostragem de 1 MHz, e outro de alta resolução, com amostragem de 10 kHz. Ambos os arquivos são armazenados conforme o padrão IEEE C37.111-2013 COMTRADE. Os arquivos de alta resolução possuem a nomenclatura de TDR (do inglês, Time-Domain Record) e contam com amostras de 18 bits de resolução e banda de medição efetiva de cerca de 3 kHz. Nestes arquivos são armazenados os sinais de entrada, além dos sinais calculados pelo relé e utilizados pelos elementos de proteção no domínio do tempo. Também, são armazenados todos os Word bits do relé. Os sinais disponibilizados pelo relé, além dos sinais de entrada, são a tensão incremental, a corrente réplica incremental de fase e de sequência zero (SEL-T400L INSTRUCTION

MANUAL, 2018).

Conforme apresentado no Capítulo 3, a função TD21 atua quando a integração da margem em que a tensão de operação excede a tensão de restrição é maior que um valor de segurança, entre outros fatores de segurança. Através dos valores provenientes dos arquivos *COMTRADE* disponibilizados pelo relé é possível plotar a tensão de operação dada por (3.30), porém não é possível realizar o mesmo procedimento para a tensão de restrição dada por (3.31). Sabe-se, porém, que a tensão de restrição é formada pelos valores atrasados de um ciclo da tensão e da corrente réplica, ambos do *loop* de falta. Para os ensaios realizados neste trabalho, as correntes utilizadas são as mesmas para o ensaio utilizando tensões primárias e secundárias, e os transitórios de falta só irão afetar a tensão de restrição após 1 ciclo, ou cerca de 16 ms. Desta forma, a tensão de restrição somente pode apresentar diferenças entre os ensaios com uso de tensão primária e secundária caso exista diferença entre as formas de onda da tensão primária e secundária no regime de pré-falta.

Com o intuito de prover uma forma de comparação da tensão de restrição dos casos analisados foi desenvolvida uma função para estimar a tensão de restrição, conforme a subseção 3.2.5 em sua Figura 3.14. Apesar de não ser possível afirmar que a tensão de restrição utilizada pelo relé T400L é a mesma da apresentada neste trabalho, a função desenvolvida possibilita realizar uma comparação da forma entre os sinais de restrição para cada caso estudado, sem contudo afirmar que os valores apresentados pela função estimada são exatamente os utilizados pelo relé.

5.3 VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE FALTA

Um dos parâmetros que podem afetar a operação de relés de proteção é a resistência de falta, que é a resistência entre as fases e/ou entre as fases e a terra durante a ocorrência de um curto-circuito. A resistência de falta é composta tipicamente por resistência de arco voltaico, resistência de "pé-de-torre" e outras resistências oriundas do contato entre condutor e terra, como por exemplo a vegetação.

De acordo com LIMA (2006), um valor prático a se considerar como resistência de falta para casos onde tem-se arco voltaico é de 20Ω para faltas fase-terra, por cobrir grande parte dos

casos reais de resistência de falta. Dessa forma, neste trabalho optou-se por realizar a variação da resistência de falta de 0 até 60 Ω , considerando que podem ocorrer faltas oriundas do contato entre o condutor e a terra com até 60 Ω de resistência. Sabe-se da literatura que podem ocorrer faltas com valores de resistência de falta superiores à 60 Ω , porém, a função TD21 apresenta atuações para eventos com valores de resistência de falta próxima à 60 Ω , conforme pode ser visto em SCHWEITZER *et al.* (2016).

A resistência de falta tem impacto direto na corrente de curto, sendo inversamente proporcionais. Dessa forma, quanto maior a resistência de falta menor a corrente de curto-circuito, tornando mais difícil para o sistema de proteção identificar a ocorrência da perturbação.

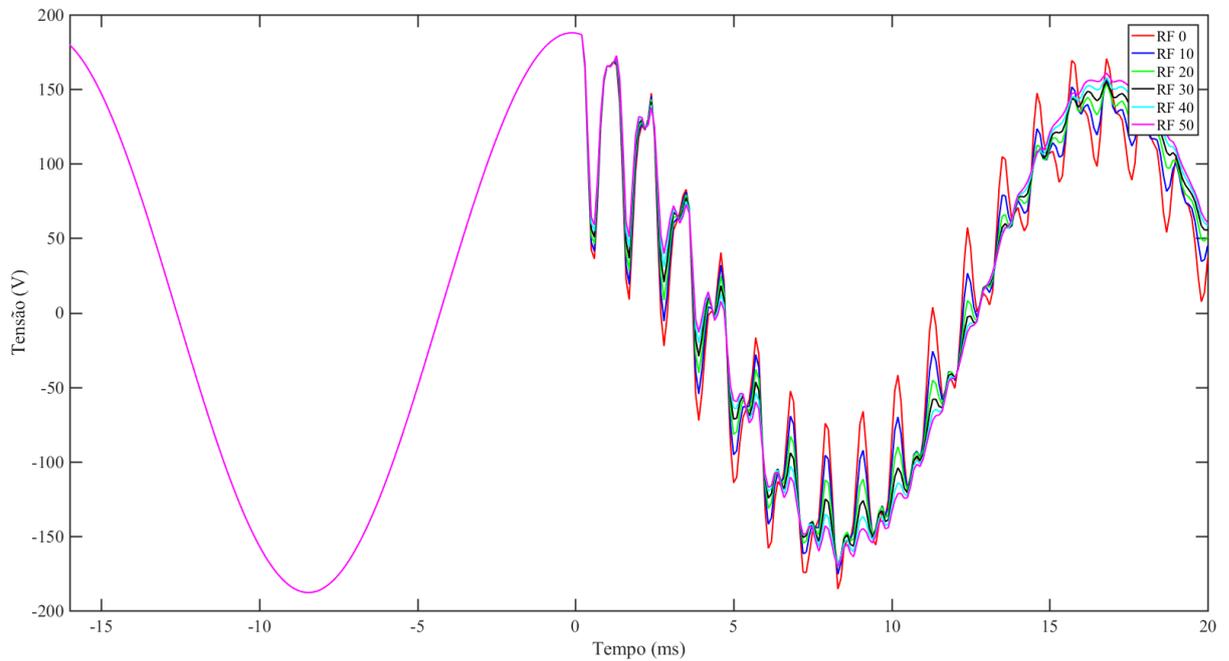
Para realização dos ensaios apresentados nesta seção foi utilizado o sistema apresentado na Figura 5.1, realizando curtos-circuitos na fase A com ângulo de incidência na tensão da fase A de 90°, um carregamento com abertura angular entre as barras Local e Remota de 5° e um *Source-to-line Impedance Ratio* (SIR) de 0,1 para ambas fontes, por fim foram utilizados os valores de resistência de falta variando de 0 a 60 Ω com incrementos de 5 Ω , totalizando 13 cenários de simulação e 195 casos simulados para cada tipo de TPC utilizado, além dos casos simulados para tensão primária. Destaca-se que a corrente de carga é mantida a mesma para todos os casos simulados, tornando a tensão e corrente de pré-falta medida pelo relé sempre iguais. Esta característica de simulação permite realizar a comparação dos casos simulados, pois a tensão e corrente de pré-falta são os elementos formadores da tensão de restrição, utilizada pela função TD21.

Sabendo que a corrente de curto-circuito decresce com o aumento da resistência de falta, é interessante verificar a influência que as respostas transitórias dos TPC possuem sobre diferentes valores de resistência de falta. Desta forma, as Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os sinais de tensão provenientes do sistema e do secundário do TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, respectivamente, sob diferentes valores de resistência de falta, para uma falta em 50% da LT.

Nota-se da Figura 5.3 que, conforme o valor da resistência de falta aumenta, os transitórios apresentam menores valores absolutos. Comparando os sinais apresentados na Figura 5.3, provenientes do primário, com os sinais apresentados nas Figura 5.4, 5.5 e 5.6, observa-se que os sinais provenientes do TPC IEEE apresentam as maiores discrepâncias, seguido dos sinais provenientes do TPC HAEFELY e TRENCH. Destaca-se que praticamente inexistem

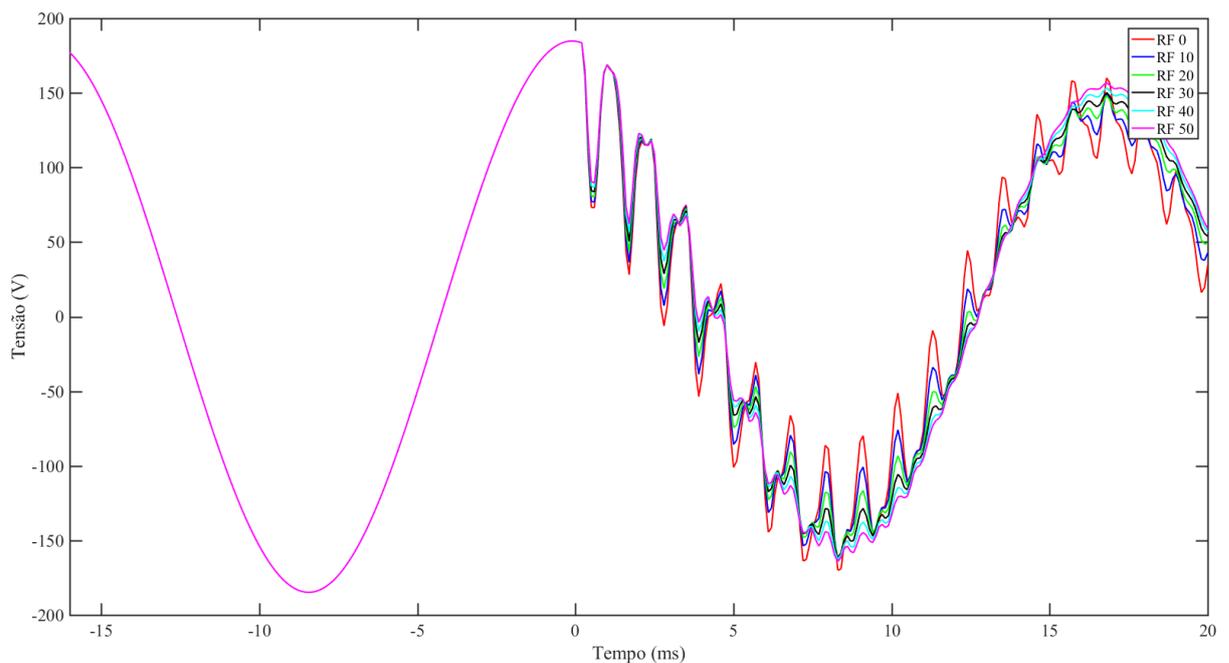
transitórios nos sinais provenientes do TPC IEEE.

Figura 5.3. Tensão medida pelo relé sem o uso de TPC, para diferentes valores de resistência de falta.



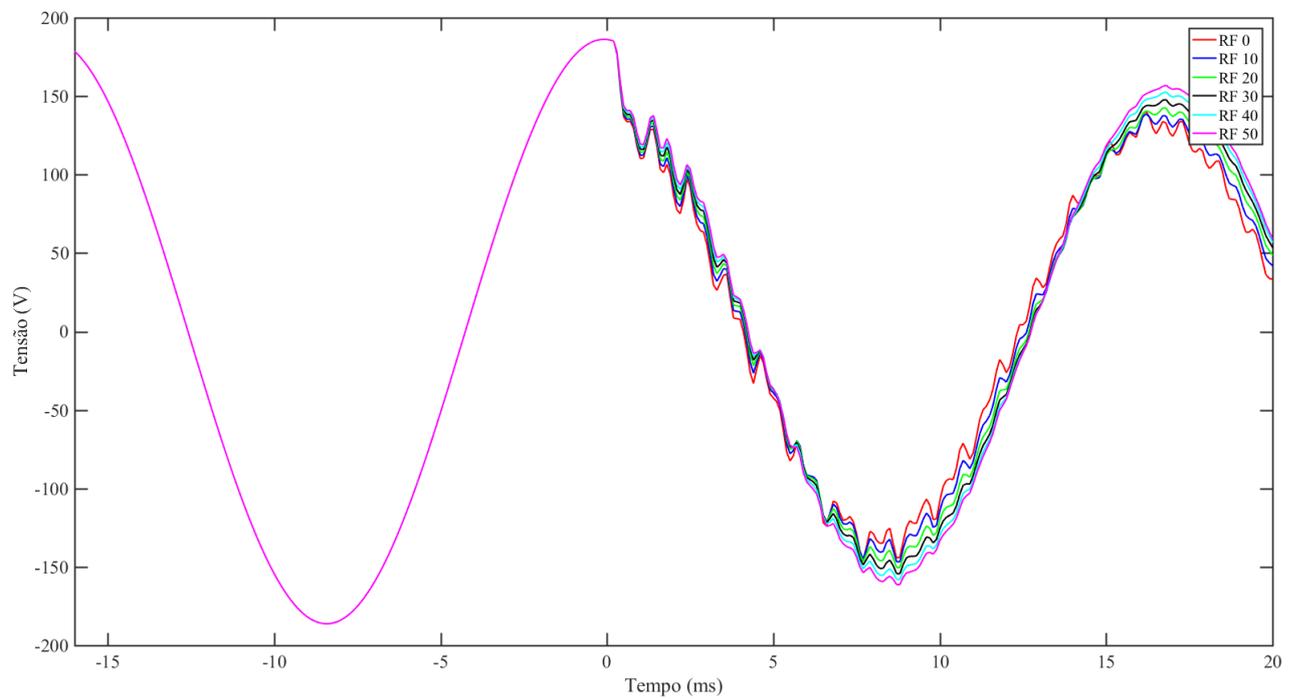
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.4. Tensão medida pelo relé com o uso do TPC TRENCH, para diferentes valores de resistência de falta.



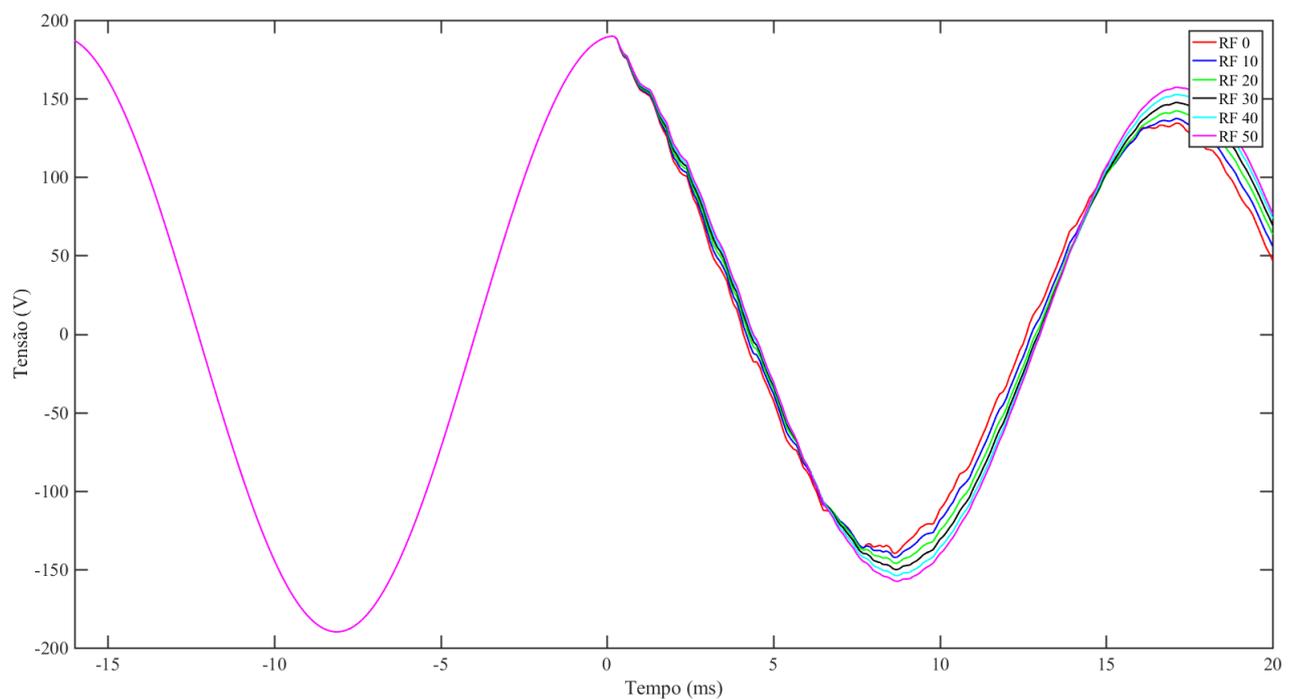
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.5. Tensão medida pelo relé com o uso do TPC HAEFELY, para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

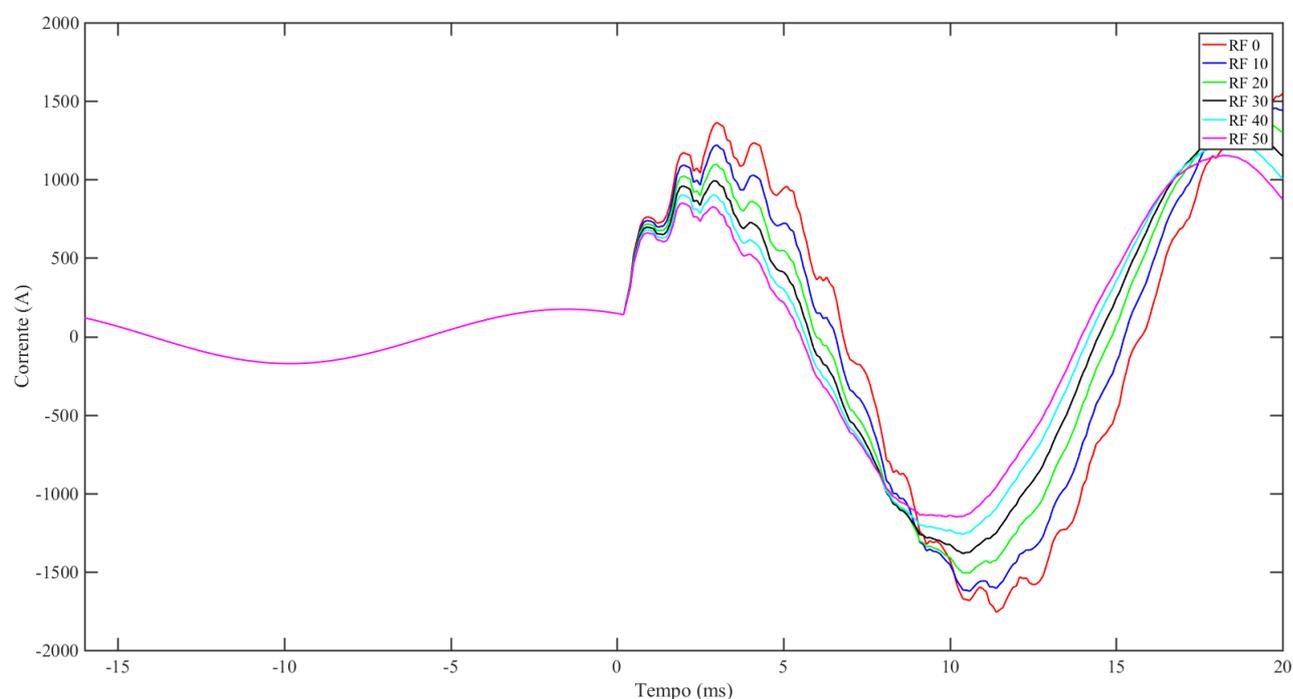
Figura 5.6. Tensão medida pelo relé com o uso do TPC IEEE, para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.7 apresenta a corrente medida pelo relé para uma falta em 50% da LT com diferentes valores de resistência de falta. Nota-se que conforme o valor da resistência de falta aumenta, o valor absoluto da corrente diminui. Também é possível verificar uma alteração na fase do sinal após a falta, sendo adiantado o sinal com resistência de falta maior. Esta resposta deve-se ao fator de potência do curto-circuito, pois a resistência de falta simulada é puramente resistiva e conforme é alterada também altera o fator de potência da corrente de falta, modificando a fase do sinal de corrente de falta.

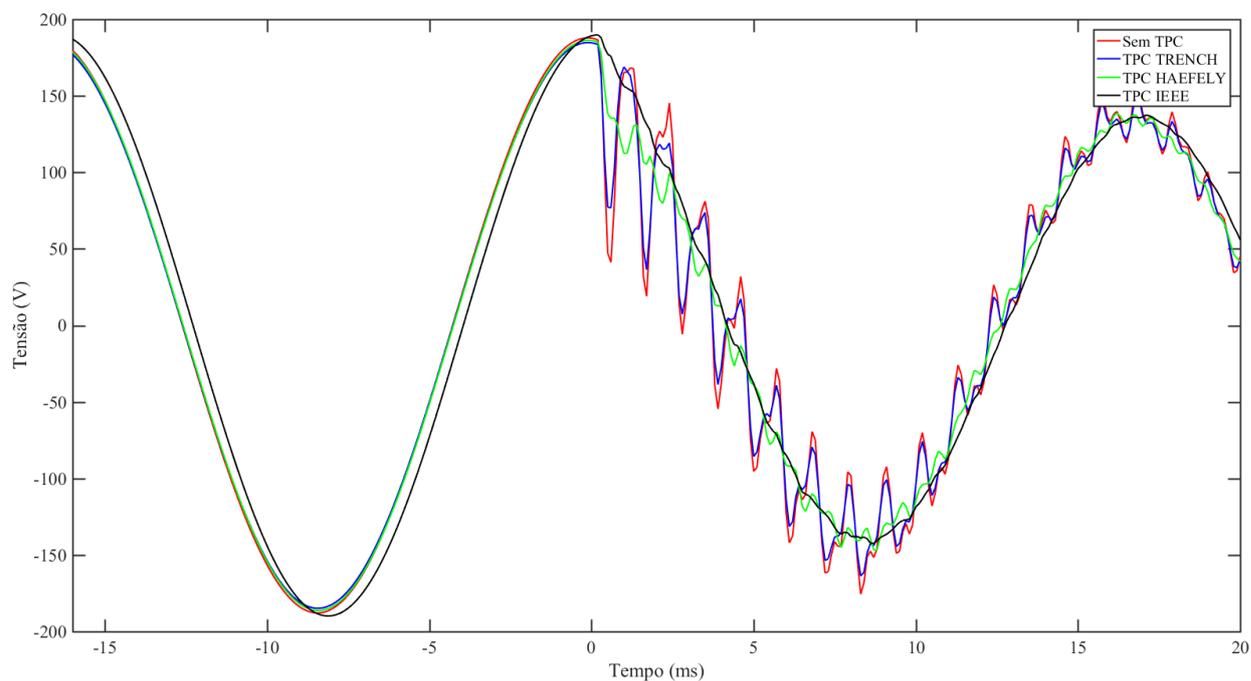
Figura 5.7. Corrente medida pelo relé para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

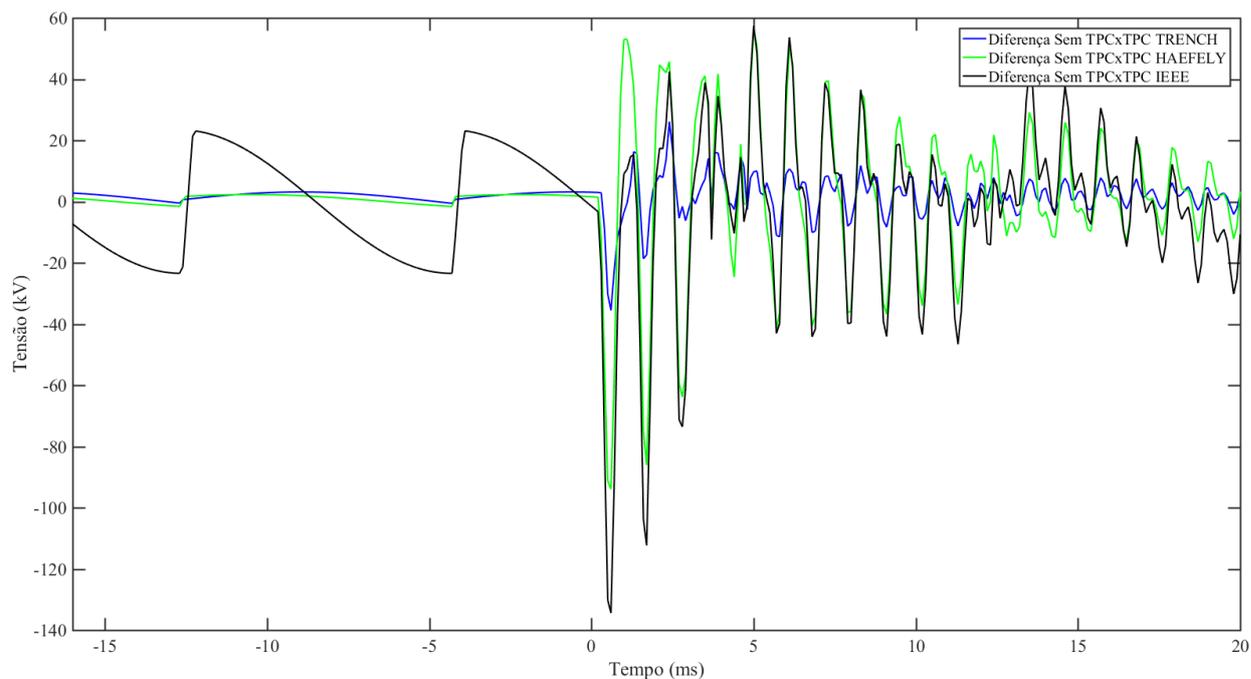
A Figura 5.8 apresenta os sinais de tensão obtidas do primário e do secundário dos diversos TPC estudados. Da Figura, observa-se que o sinal de tensão secundária que mais se aproxima do valor primário é do TPC TRENCH, apresentando pequenas atenuações. Já o TPC HAEFELY apresenta um sinal de tensão com significativas diferenças em relação a tensão primária. Por fim, o TPC IEEE é o que apresenta as maiores diferenças em relação a tensão primária, com atenuação de praticamente todo o transitório. Nota-se também que existe defasagem e diferença de amplitude da tensão secundária dos TPC em relação à tensão primária, sendo que o TPC IEEE apresenta os resultados mais adversos.

Figura 5.8. Comparação das tensões utilizadas nos ensaios, para uma falta em 50% da LT com resistência de falta de 10Ω .



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.9. Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.8.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.9 apresenta a diferença entre o módulo das tensões provenientes do primário e secundário dos diversos TPC. Verifica-se, que após a falta, as diferenças são significativas, sendo o pior caso para o TPC IEEE. Diferenças também podem ser vistas na tensão de pré-falta, em menor intensidade. Estas diferenças na tensão de pré-falta impactam diretamente na tensão de restrição da função TD21.

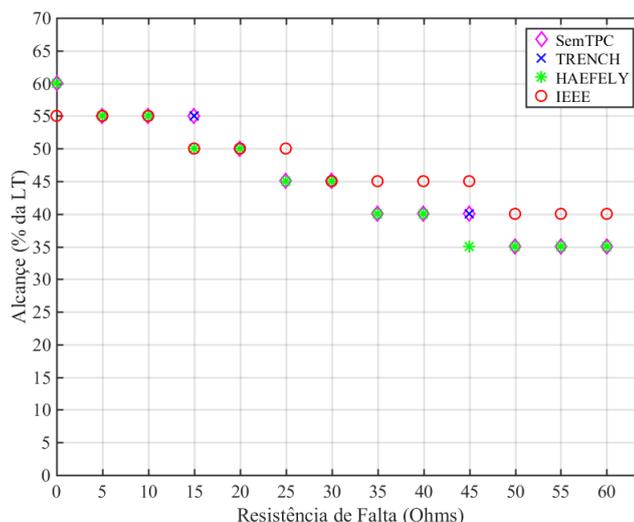
5.3.1 Resultados T400L

Conforme apresentado anteriormente, as simulações realizadas e ensaiadas utilizando o relé T400L utilizaram a funcionalidade de *Playback*, descrita na seção 5.1. Dessa forma, foram coletados os resultados utilizando como valores de entrada a tensão considerando o valor primário e os valores secundário provenientes dos modelos digitais dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, apresentados no capítulo 4. Dessa forma, foram realizadas as análises pertinentes conforme apresentado adiante.

5.3.1.1 Alcance da Função TD21

Com base nos resultados de atuação do relé T400L, foram encontrados o alcance máximo obtido para os ensaios utilizando os valores de tensão como entrada, conforme apresentado na Figura 5.10. Neste trabalho, os valores obtidos dos ensaios com a tensão primária são considerados o valor esperado, sendo este o padrão de comparação.

Verifica-se na Figura 5.10 que conforme se aumenta o valor da resistência de falta o alcance máximo da função TD21 diminui, sendo inicialmente de 60% da LT para 0 Ω indo à 35% da LT para 60 Ω , considerando o uso de tensões primárias. Nota-se, também, que quando comparado o alcance utilizando a tensão primária como valor padrão e as tensões provenientes dos TPC, ocorreu sobrealcance quando do uso da tensão do TPC IEEE e resistências de falta de 25, 35, 40, 45, 50, 55 e 60 Ω . Ao contrário, ocorreram subalcances quando do uso das tensões do TPC IEEE para resistência de falta de 0 e 15 Ω , e quando do uso das tensões do TPC HAEFELY e resistência de falta de 15 e 45 Ω . Baseado nos resultados apresentados na Figura 5.10 serão analisados os casos de subalcance e sobrealcance da função TD21.

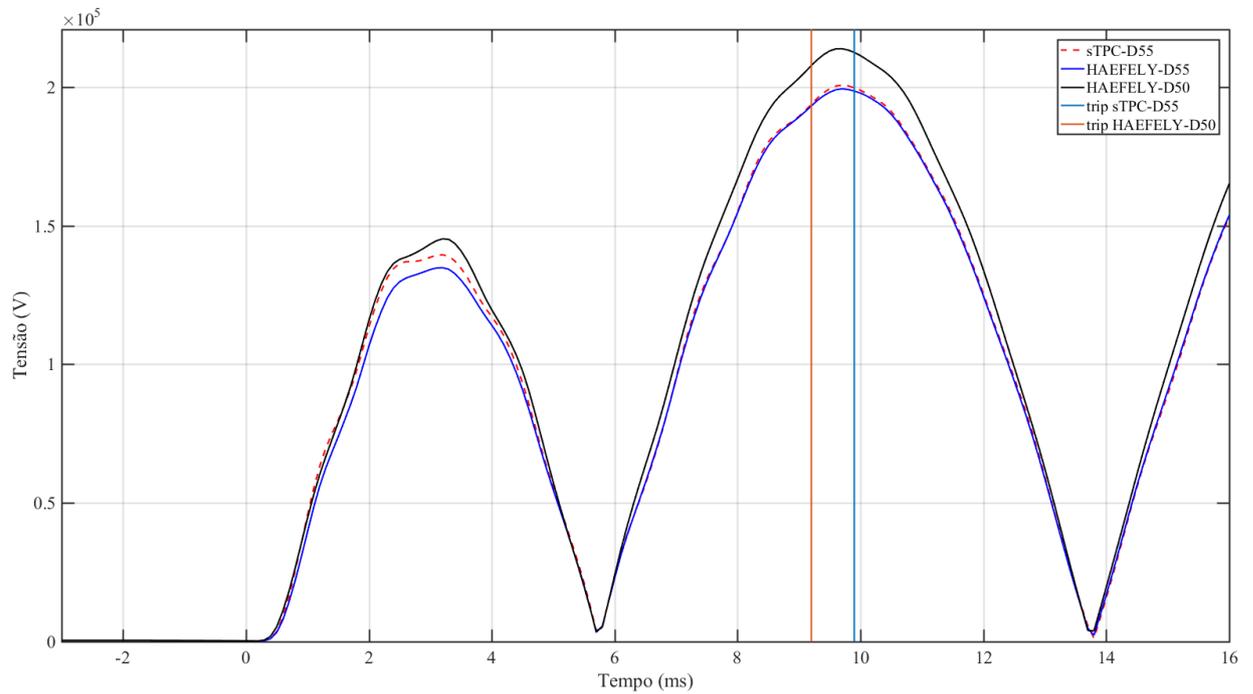
Figura 5.10. Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.

Fonte: Autoria própria.

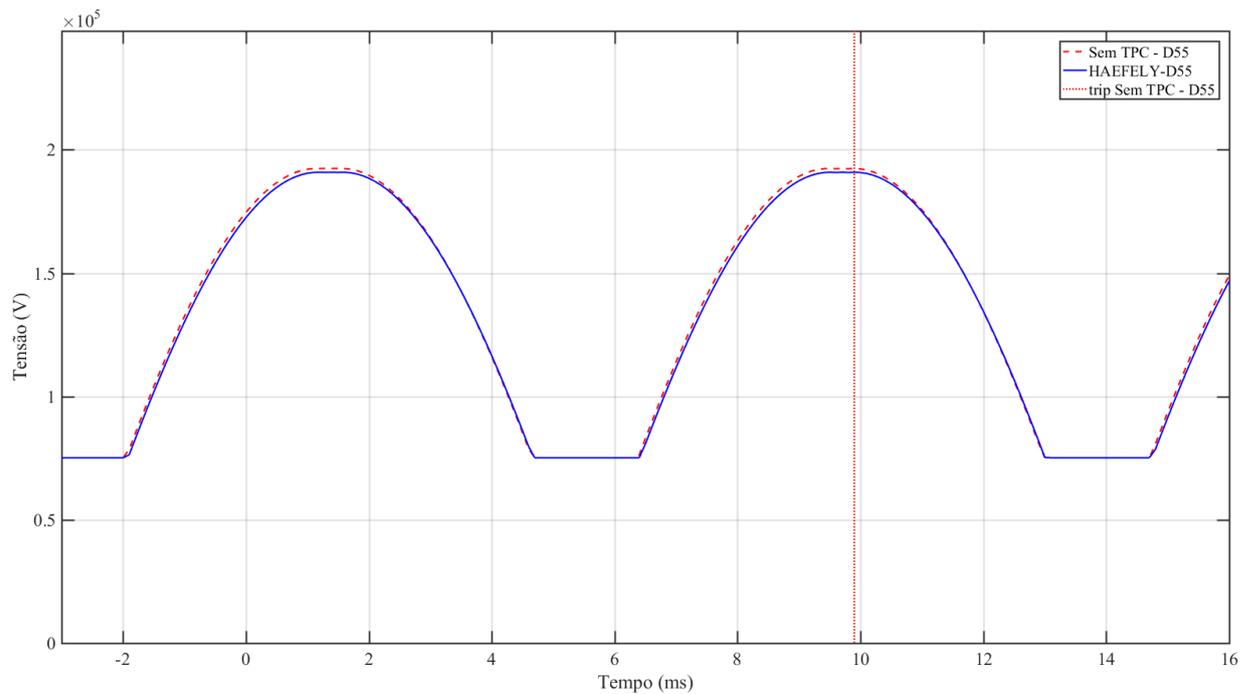
5.3.1.2 Subalcançe Devido às Tensões do TPC HAEFELY

O relé subalcançou quando do uso das tensões do TPC HAEFELY em dois eventos de falta, quando a resistência de falta foi de 15Ω tendo um alcance de 55% para o uso de tensões primárias e 50% para o uso das tensões do TPC HAEFELY, e quando a resistência de falta foi de 45Ω tendo um alcance de 40% e 35% quando do uso de tensões primárias e do TPC HAEFELY, respectivamente. Em ambos os casos, o subalcançe verificado foi igual ao passo de cálculo utilizado para as simulações, ou seja, as faltas foram simuladas considerando variação do ponto de falta a cada 5% do comprimento da LT.

A Figura 5.11 apresenta a comparação entre três tensões de operação, utilizando os valores da tensão primária para o alcance de 55% da linha, e utilizando os valores de tensão provenientes do TPC HAEFELY para os alcances de 55% e 50% da linha, bem como as devidas atuações. Nota-se que a tensão de operação proveniente do caso HAEFELY para falta em 50% da LT é superior às demais em praticamente todo o intervalo observado, no entanto, a tensão de operação do caso HAEFELY 55% é inferior às demais em praticamente todo o intervalo. Destaca-se que a atuação da função de proteção TD21 para os dois casos ocorreram 9,8 ms após o instante da falta. A Figura 5.12 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2, que proporciona uma possibilidade de comparação da diferença entre a tensão de restrição para os casos de falta em 55% da linha com uso da tensão proveniente do secundário e do primário.

Figura 5.11. Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 15Ω .

Fonte: Autoria própria

Figura 5.12. Comparação entre as tensões de restrição estimada para uma falta em 55% da LT para resistência de falta de 15Ω .

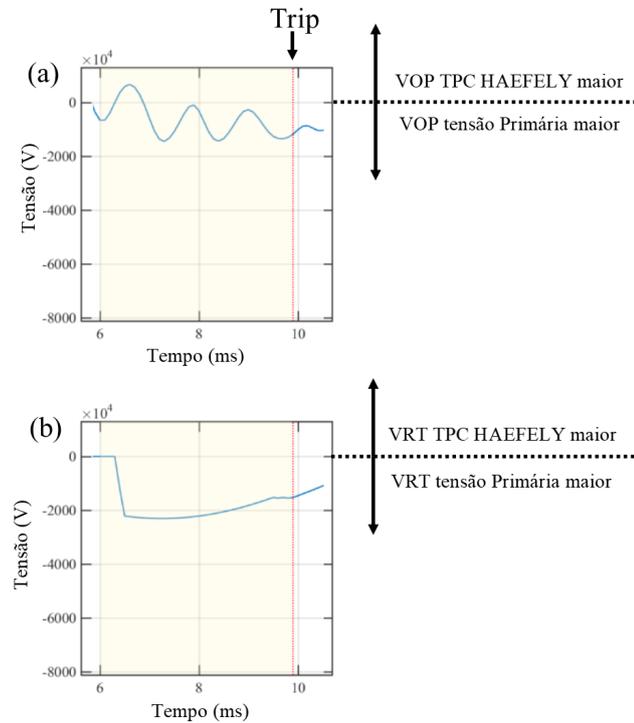
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que a tensão de restrição proveniente do uso do TPC HAEFELY apresenta valores inferiores quando comparado com a tensão de restrição utilizando as tensões primárias.

A Figura 5.13 (a) apresenta uma comparação entre o módulo da tensão de operação proveniente dos valores de tensão primária e das tensões do TPC HAEFELY, para uma falta ocorrendo em 55% da linha. Nota-se que a diferença é positiva para praticamente todo o intervalo apresentado, exceto para um pequeno intervalo entre 6 e 7 ms. Verifica-se que a tensão de operação quando do uso das tensões provenientes do secundário do TPC HAEFELY são inferiores a tensão de operação quando do uso das tensões primárias, para o caso em que constatou-se subalcançe. A Figura 5.13 (b) apresenta uma comparação entre o módulo das tensões de restrição para o caso em análise. Verifica-se que a tensão de restrição quando do uso das tensões primárias é maior em praticamente todos os momentos. Como os valores da tensão de restrição são estimados, não é possível realizar uma comparação como a realizada pela lógica da função TD21, porém os sinais apresentados proporcionam uma ideia do comportamento desta tensão. Diante do mostrado na Figura 5.14, pode-se inferir que a tensão de operação é superior para o caso de ensaio com valores primários, porém a tensão de restrição também é superior, sendo que a ocorrência da atuação para o caso em 55% da LT e uso de tensão primária deveria estar no limiar entre a atuação e a não atuação, como pode ser confirmado pelo tempo de atuação da mesma ocorrendo 9,8 ms após o início da falta, quando o tempo máximo verificado em todos os ensaios foi de 10,1 ms.

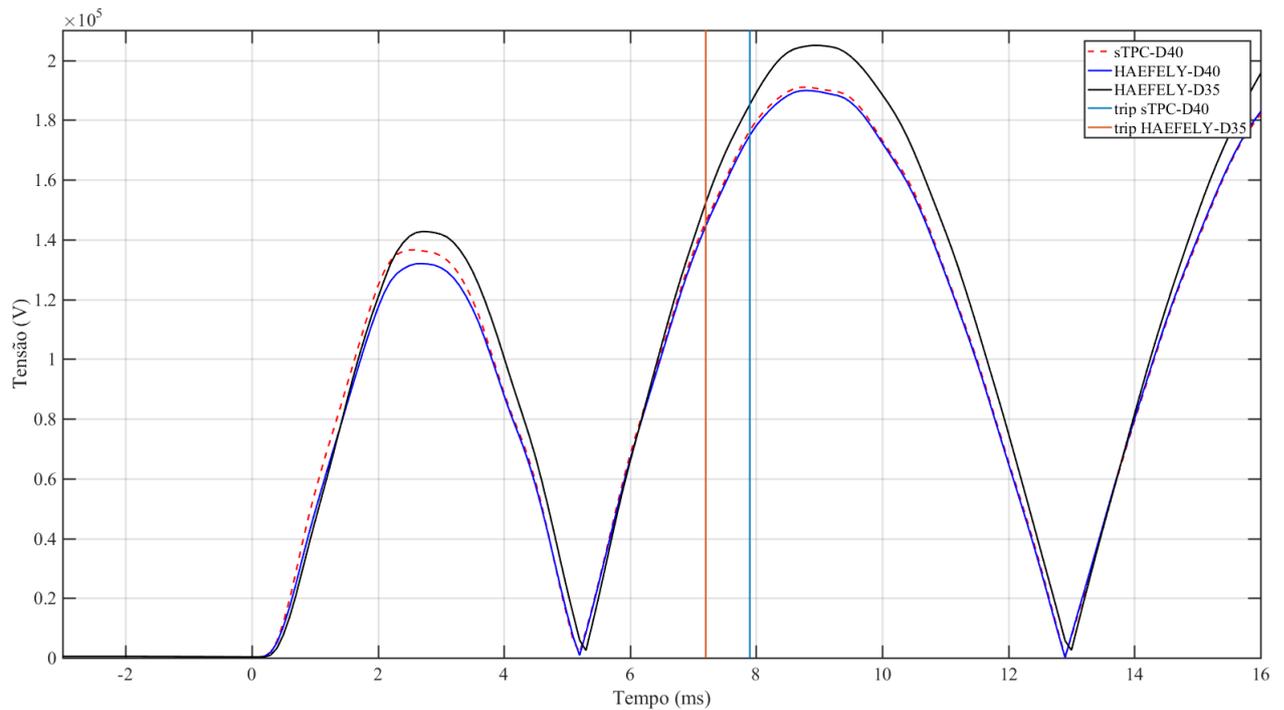
No caso de subalcançe para os eventos com resistência de falta de 45 Ω , é observado a mesma característica discutida anteriormente. A Figura 5.14 apresenta a comparação entre três tensões de operação, utilizando os valores da tensão primária para o alcance de 40% da linha, utilizando os valores de tensão provenientes do TPC HAEFELY para os alcances de 40% e 35% da linha, bem como as respectivas atuações. Neste caso, a atuação da proteção ocorreu para uma falta em 40% da linha quando do uso de tensões primárias, e em 35% da linha quando do uso de tensões provenientes do secundário do TPC HAEFELY. Neste caso, verifica-se que a diferença entre tensão de operação para o caso do TPC HAEFELY e o caso com tensão primária é maior que a apresentada na Figura 5.11. Já a tensão de restrição não sofre alteração, pois são mantidas as condições de pré-falta.

Figura 5.13. Comparação para uma falta em 55% da linha e um valor de resistência de falta de 15 Ω . (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.14. Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 45 Ω .



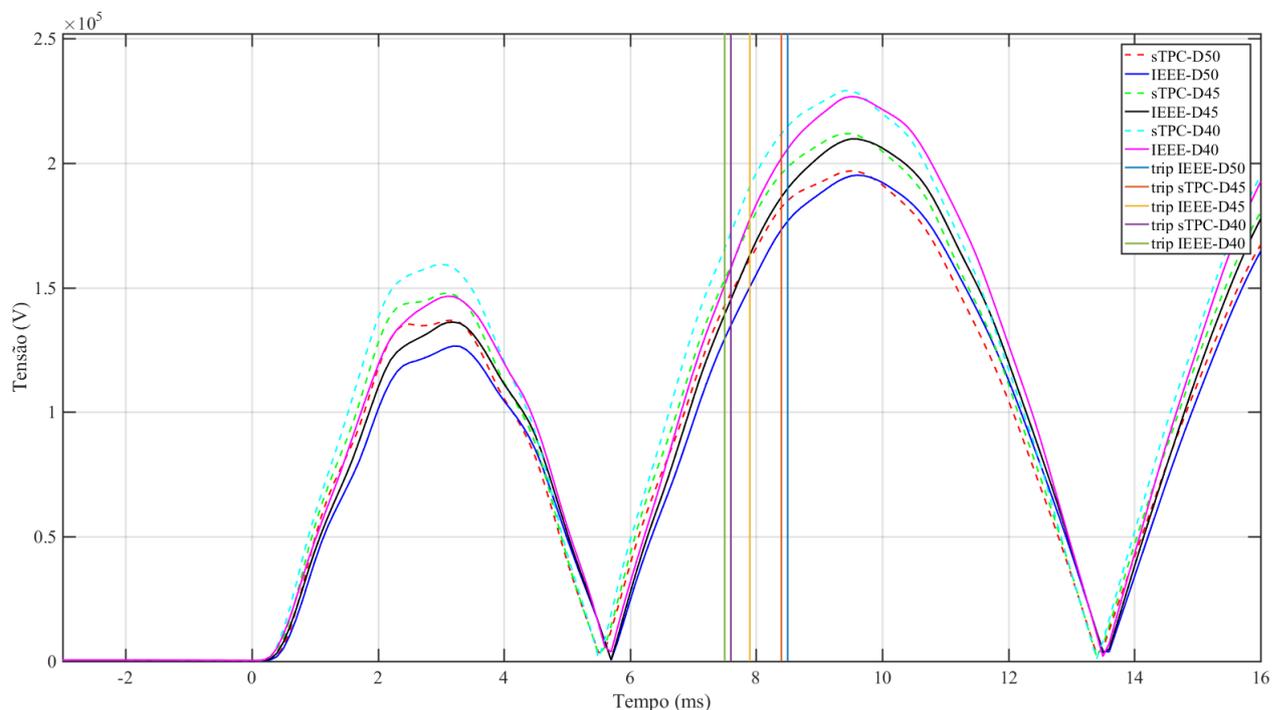
Fonte: Autoria própria.

5.3.1.3 Sobrealcance Devido às Tensões do TPC IEEE

Utilizando como padrão de comparação a atuação do relé de proteção T400L quando se utiliza valores de tensão provenientes do primário, ou seja, do sistema elétrico, foram verificados eventos de sobrealcance para diversas faltas quando se utilizou a tensão secundária do TPC IEEE.

Para análise das diferenças entre a atuação utilizando tensões primárias e secundárias pode-se observar as tensões de operação de cada caso e verificar possíveis diferenças entre elas. Com o intuito de analisar o sobrealcance observado, a Figura 5.15 apresenta a comparação entre o módulo de algumas tensões de operação, para faltas em 50%, 45% e 40% para ensaios com tensão primária e secundária provenientes do TPC IEEE, todas para curtos com resistência de falta de 25Ω , onde observou-se um sobrealcance da função TD21 com a atuação em 50% para o ensaio com tensão do TPC IEEE e 45% para tensão primária. Também foram apresentados os respectivos momentos de atuação de cada caso.

Figura 5.15. Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 25Ω .

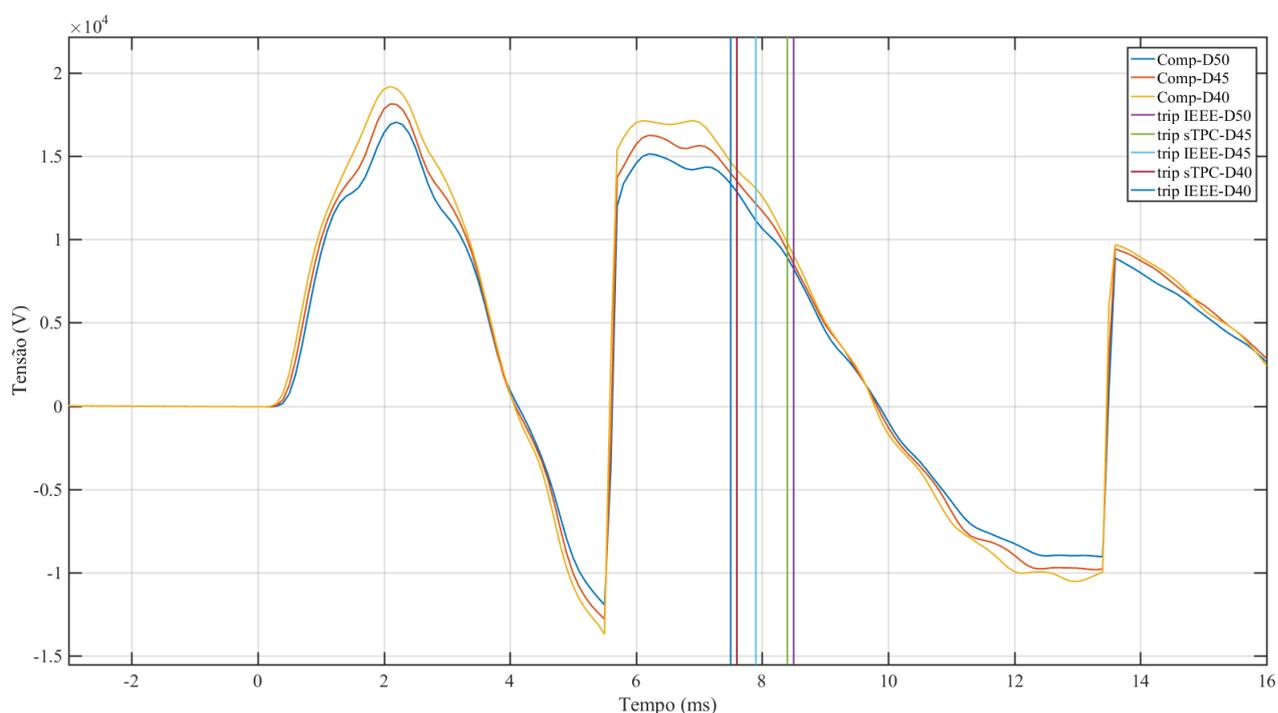


Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.16 apresenta a diferença entre o módulo da tensão de operação para ensaios utilizando a tensão primária e secundária. Na figura, quando a tensão de operação para ensaios

com tensão primária for superior a de ensaios com tensão secundária do TPC IEEE, os valores do gráfico são positivos. Nota-se que a tensão de operação para casos IEEE é superior somente nos intervalos entre 4 e 5,5 ms, e 9,5 e 13,5 ms, porém as atuações da função TD21 ocorrem no intervalo entre 7 e 9 ms, onde a tensão de operação é consideravelmente superior. Observando especificamente o evento sobrealçado, a atuação ocorreu em 8,4 ms após o início da falta com uma diferença positiva entre as tensões de operação. Neste evento, com a falta ocorrendo em 50% da LT, o relé teve atuação para o caso IEEE, não atuando para o caso do ensaio com a tensão primária. Porém, a tensão de operação para o ensaio com tensão primária foi significativamente superior, contradizendo a lógica de atuação da função TD21. Desta forma, conclui-se que existe diferença na tensão de restrição dos casos analisados, conforme apresentado posteriormente.

Figura 5.16. Diferença entre os módulos da tensão de operação para o caso de tensões primárias e do TPC IEEE, para falta com resistência de falta de 25Ω .



Fonte: Autoria própria.

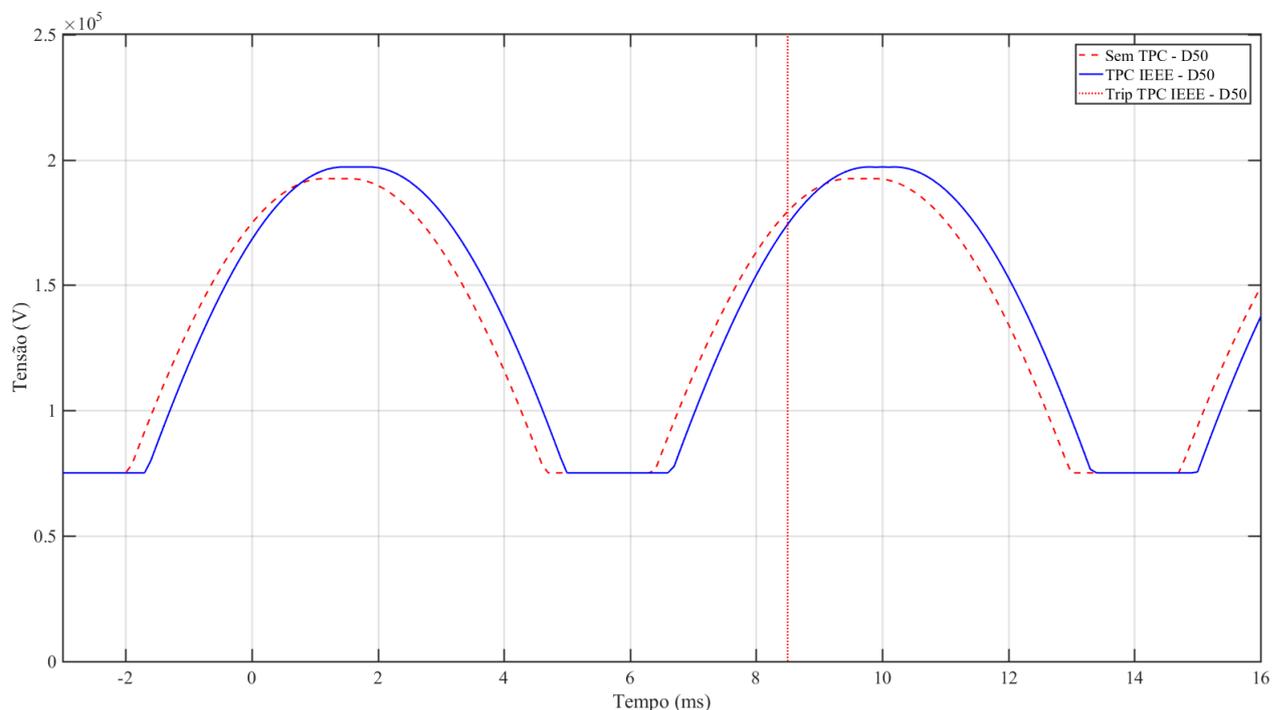
Conforme observado, se os valores da tensão de operação do caso IEEE sensibilizaram a função TD21 para atuar, os valores da tensão de operação do ensaio com tensões primárias também deveriam ter sensibilizado a função TD21, pois apresenta valores superiores. Outro ponto importante a ser analisado é o fato da atuação da função TD21 para os casos IEEE

apresentados, ocorrer mais rápido que os casos de ensaio com tensão primária. Para os eventos de curto-circuito em 45% e 40% da linha os tempos de atuação foram de 7,9 ms (IEEE) e 8,4 ms (Primária), e 7,5 ms (IEEE) e 7,6 ms (Primária), respectivamente. Da Figura 5.16, nota-se que em todos estes eventos a tensão de operação para os ensaios com tensão primária é superior. Desta forma, supõe-se que a tensão de restrição não é a mesma para os respectivos casos. Um ponto a se observar é que, conforme mostrado nas Figuras 4.16 e 5.8, em regime permanente existe um pequeno atraso na tensão proveniente do TPC IEEE em relação à tensão primária. Sabe-se que a tensão de restrição é formada por um termo com a tensão do sistema e outro termo com a impedância da linha, o alcance ajustado e a corrente réplica. Mesmo que a tensão apresente um pequeno atraso, os demais termos são iguais em ambos os ensaios, tornando a tensão de restrição praticamente idêntica em ambos os casos. Outro ponto a se observar nas Figuras 4.16 e 5.8 é que após a falta a tensão secundária praticamente não apresenta transitórios de alta frequência, tendo uma queda gradual, diferente do apresentado pela tensão primária.

Para comparação da tensão de restrição, a Figura 5.17 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2, que proporciona uma possibilidade de comparação da diferença entre a tensão de restrição para os casos de falta em 50% da LT e resistência de falta de 25 Ω . Nota-se que a tensão de restrição para o caso com uso da tensão proveniente do TPC IEEE apresenta um atraso em relação à tensão de restrição com uso de sinais primários. Comparando os casos, a tensão de restrição que utiliza valores primários inicia a subida antes, e desta forma, dificulta a ultrapassagem da tensão de operação. Já a tensão de restrição com uso de tensões do TPC IEEE inicia a subida depois e, desta forma, pode ser ultrapassada pela tensão de operação de forma mais fácil. Vale destacar que na Figura 5.15 a tensão de operação para o caso com uso de tensão do TPC IEEE também inicia a subida depois que a do caso com uso de tensão primária, porém as diferenças nas tensões de restrição podem ser maiores que na tensão de operação ocasionando a atuação para o caso IEEE.

Diante do apresentado, pode-se concluir que a tensão proveniente do TPC IEEE produz alteração na tensão de restrição e de operação da função TD21, ocasionando nos eventos de sobrealcance.

Figura 5.17. Comparação entre as tensões de restrição estimada para uma falta em 50% da LT para resistência de falta de 25Ω .



Fonte: Autoria própria.

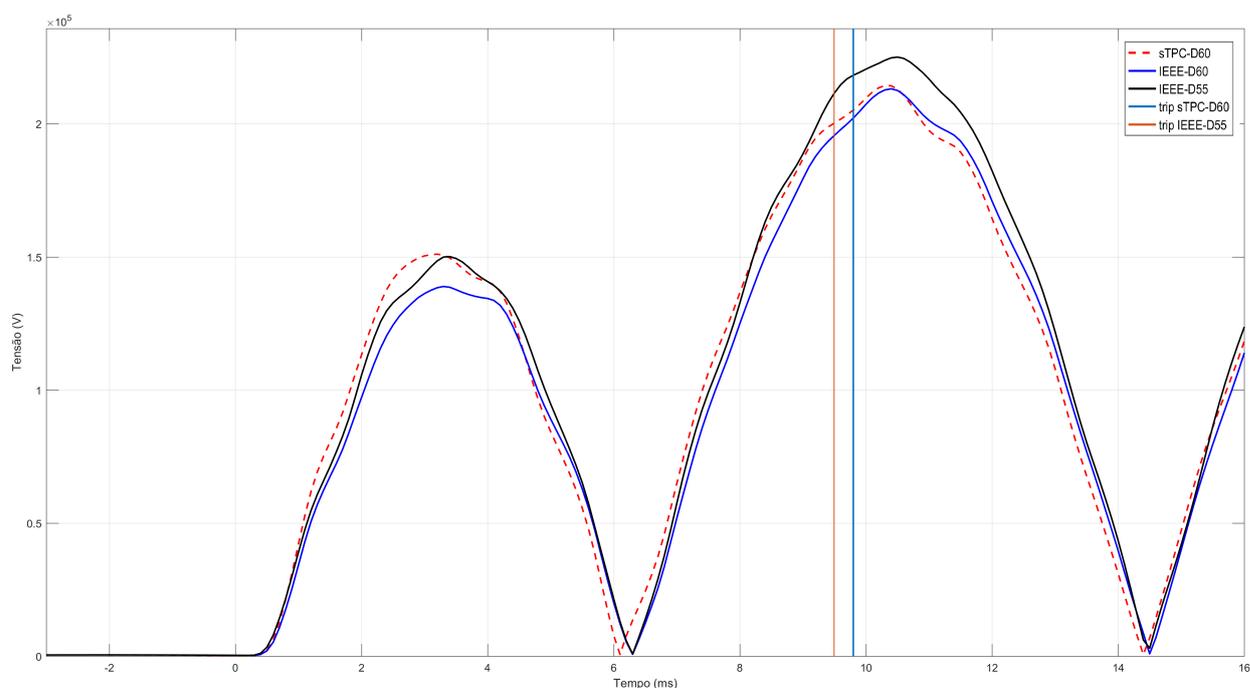
5.3.1.4 Sublance Devido às Tensões do TPC IEEE

Conforme apresentado na Figura 5.10, o relé subalcançou em eventos com uso das tensões do TPC IEEE, em dois casos de curto, quando a resistência de falta foi de 0Ω tendo um alcance de 60% para o uso de tensões primárias e 55% para o uso das tensões do TPC IEEE, e quando a resistência de falta foi de 15Ω tendo um alcance de 55% e 50%, quando do uso de tensões primárias e do TPC IEEE, respectivamente. Em ambos os casos, o sublance verificado foi igual ao passo de cálculo utilizado para as simulações, ou seja, as faltas foram simuladas considerando variação no ponto de falta a cada 5% da LT.

A Figura 5.18 apresenta a comparação entre três tensões de operação, utilizando os valores da tensão primária para uma falta em 60% da LT, e também, utilizando os valores de tensão provenientes do TPC IEEE para faltas em 60% e 55% da linha. Na Figura também são apresentadas as atuações da proteção proveniente do relé para os casos de tensão primária 60% e IEEE 55%. Nota-se da figura que a tensão de operação para o caso IEEE 55% é maior em

certo período de tempo, alternando com a tensão de operação para o caso de tensões primárias. Também, é possível notar que a tensão de operação para o caso IEEE 60% é menor que as demais em grande parte do período.

Figura 5.18. Comparação entre as tensões de operação para resistência de falta de 0Ω .

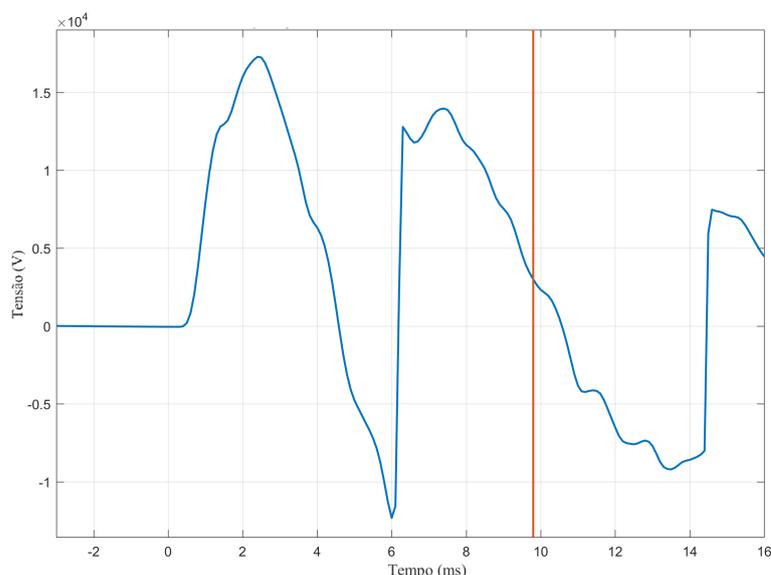


Fonte: Autoria própria.

Novamente, se utiliza a comparação entre o módulo das tensões de operação dos casos estudados. A Figura 5.19 apresenta uma comparação entre o módulo da tensão de operação proveniente dos valores de tensão primária e das tensões do TPC IEEE, para uma falha ocorrendo em 60% da linha e resistência de falta de 0Ω . Pode-se observar que, até o momento da atuação, a diferença é positiva em praticamente todo o intervalo. Mais uma vez, destaca-se o fato da tensão de operação do caso subalcançado ser inferior à do caso em que se utilizam tensões primárias.

Para comparação da tensão de restrição, a Figura 5.17, mostrada anteriormente, proporciona uma possibilidade de comparação da diferença entre a tensão de restrição para os casos apresentados na Figura 5.18, pois as condições de pré-falta são iguais. Conforme já discutido antes, a tensão de restrição para o ensaio com uso do TPC IEEE apresenta um atraso que impacta na atuação da função TD21. Porém, para os eventos de falta com valores de resistência de falta

Figura 5.19. Diferença entre os módulos da tensão de operação para o caso de tensões primárias e IEEE, para falta em 60% da LT e resistência de falta de 0Ω .



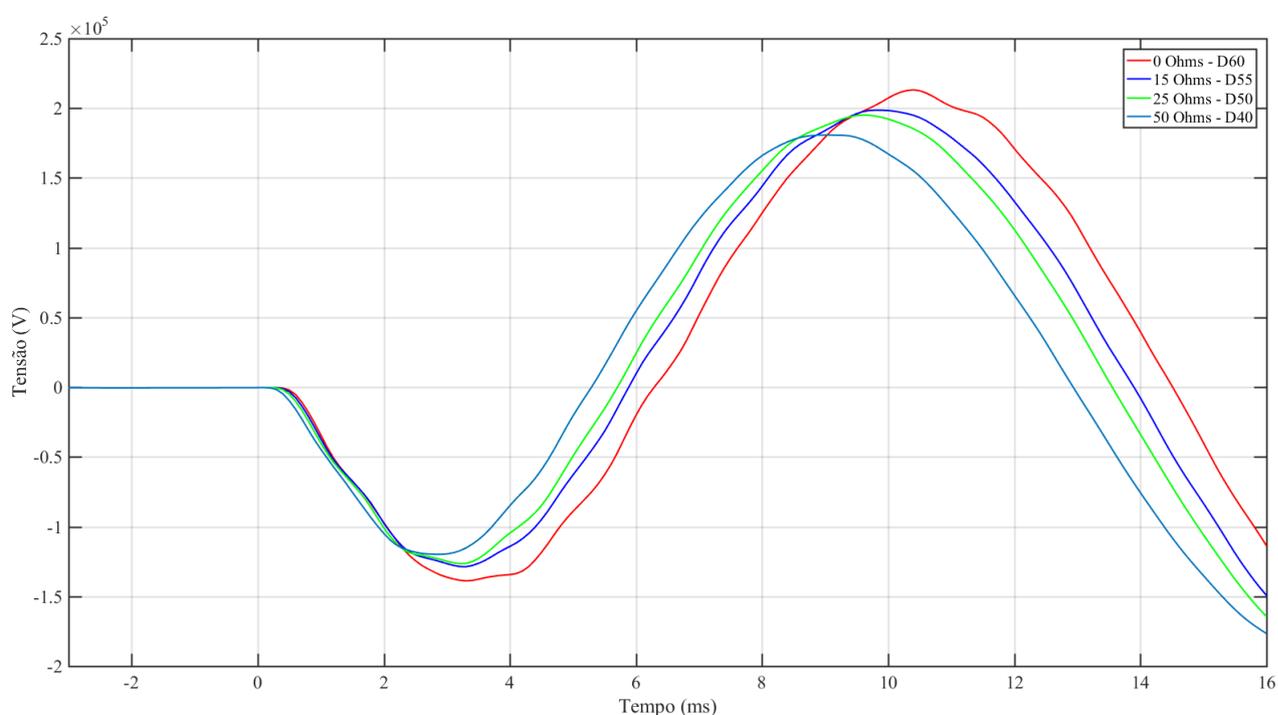
Fonte: Autoria própria.

iguais à 0 e 15Ω verificou-se um subbalcance, diferente dos eventos de sobrealcance observados anteriormente. Para o segundo evento de subbalcance os resultados obtidos são equivalentes aos apresentados antes, optando-se assim em suprimi-los do texto.

Diante dos resultados de subbalcance e sobrealcance obtidos, verifica-se que o fator determinante para ocorrência dessa diferença é a fase da corrente de falta, conforme discutido a seguir. Sabe-se que a tensão de restrição proveniente do ensaio com o TPC IEEE está atrasada em relação à tensão de restrição proveniente do ensaio com valores primários. Sabe-se também que a tensão de restrição não sofre alteração com a variação da resistência de falta. Conforme apresentado na Figura 5.7, a corrente de falta altera sua fase conforme o valor de resistência de falta é alterado. A Figura 5.20 apresenta a tensão de operação para quatro ensaios diferentes, sendo 2 com subbalcance e 2 com sobrealcance, todos utilizando a tensão proveniente do TPC IEEE. Os eventos com subbalcance são os que foram utilizados os valores de resistência de falta de 0 e 15Ω e os de sobrealcance os de 25 e 50Ω . Nota-se que para os casos de sobrealcance, a tensão de restrição está adiantada em relação aos casos de subbalcance. Este fenômeno aliado ao atraso na tensão de restrição para os ensaios com o TPC IEEE proporciona a diferença entre o subbalcance e o sobrealcance, pois a tensão de restrição se mantém inalterada para todos os casos, mas a tensão de operação é adiantada a cada variação positiva da resistência de falta.

Dessa forma, comparando os ensaios com tensão primária, para casos com valor de resistência maior a tensão de operação pode superar a tensão de restrição antes e ocasionar o sobrealcance, mesmo apresentando valores absolutos menores, conforme apresentado na Figura 5.15. Porém, para valores baixos de resistência a defasagem na tensão de operação não é capaz de proporcionar sobrealcance, sendo observado um subalcance para casos com resistência de falta de 0 e 15 Ω .

Figura 5.20. Comparação entre as tensões de operação para diferentes valores de resistência e locais de falta.



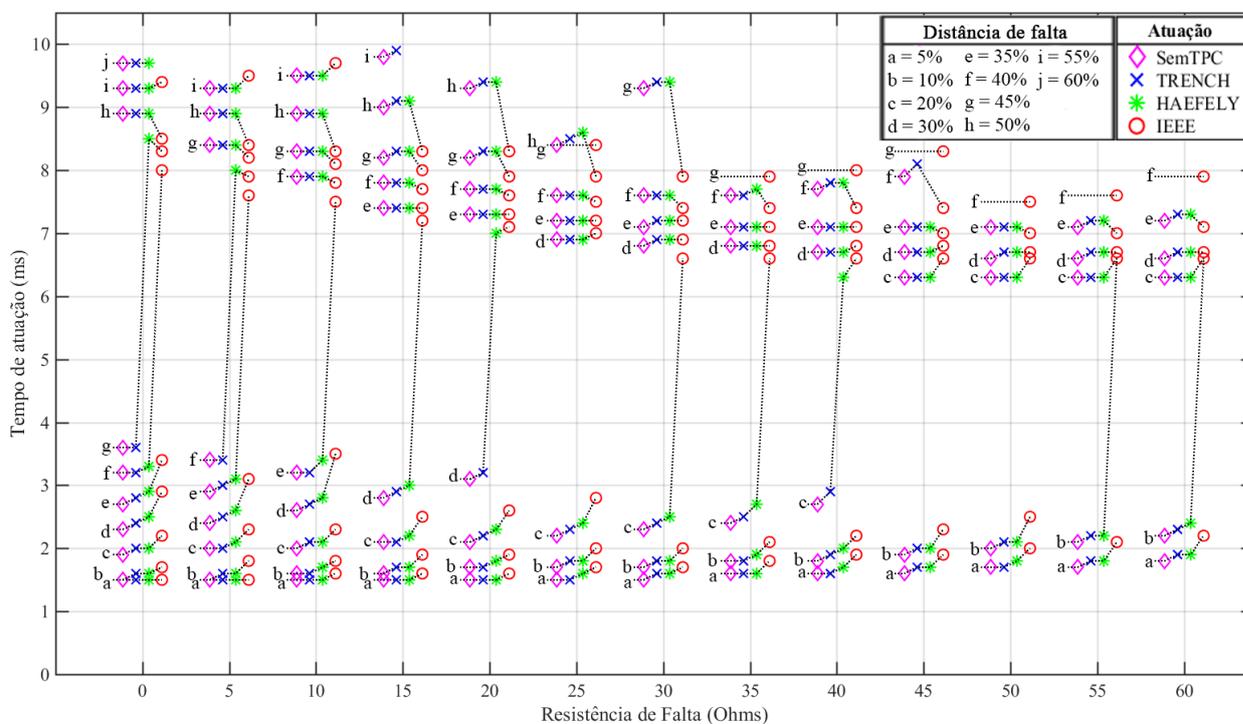
Fonte: Autoria própria.

Outro ponto importante de se observar é o instante da atuação da função TD21, que para o caso de resistência de falta de 0 Ω e curto-circuito em 60% da linha ocorreu em 9,7 ms após a falta. Já para o caso de resistência de falta de 15 Ω e curto-circuito em 55% da linha a atuação ocorreu em 9,8 ms para ensaios com a tensão primária. Estes valores estão próximos do limite do tempo de atuação observado nos ensaios realizados, sendo possível um bloqueio da atuação para tempos superiores.

5.3.1.5 Tempo de Atuação da Função TD21

A Figura 5.21 apresenta os tempos de atuação da função TD21 para os diferentes pontos de falta e resistência de falta utilizando a tensão primária e as tensões provenientes dos TPC. Baseado nos resultados apresentados na Figura 5.21, observa-se que para faltas em 5 % da LT o tempo de atuação não apresentou diferenças consideráveis. Quando se utilizou a tensão primária, o tempo para atuação da proteção para uma falta em 5 % da LT e resistência de falta de 0 Ω foi de 1,5 ms. Já para uma falta com resistência de falta de 60 Ω o tempo para atuação foi de 1,8 ms. Para as mesmas características apresentadas anteriormente, os tempos para atuação utilizando as tensões provenientes dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE são iguais à 1,5 ms para um ensaio com resistência de falta de 0 Ω , com tempos de atuação de 1,9 ms, 1,9 ms e 2,2 ms e para um ensaio com resistência de falta de 60 Ω , respectivamente. A função de proteção TD21 teve o maior tempo para atuação quando se utilizou o TPC TRENCH com uma falta em 55% da linha e resistência de falta de 15 Ω , alcançando 9,9 ms.

Figura 5.21. Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.



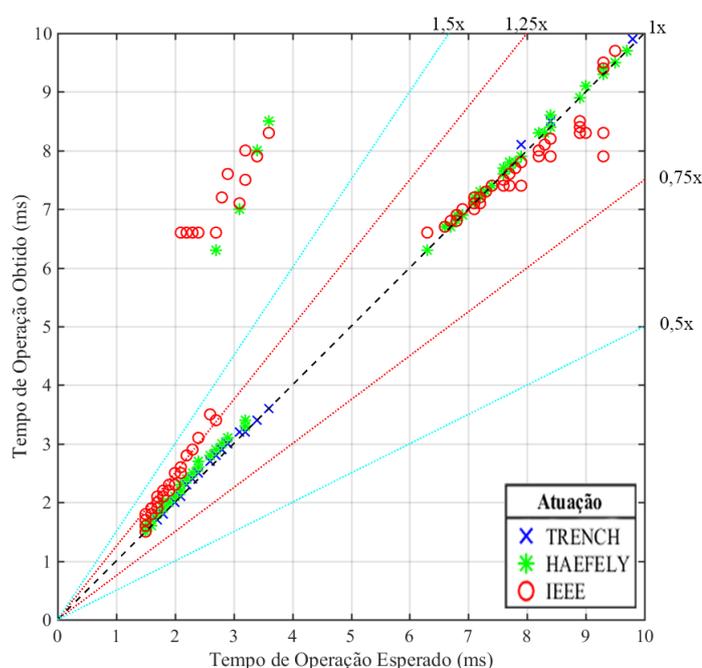
Fonte: Autoria própria.

Nota-se da Figura 5.21 que existe um intervalo de tempo que não ocorre atuação da função

TD21, entre 3,8 e 6,2 ms. Isto é devido à característica senoidal dos valores de corrente e tensão e às características da tensão de operação e restrição que compõem a lógica de atuação da função TD21. Observando a Figura 5.17, nota-se que existe uma região de corte que não permite que esta tensão chegue ao valor zero, impedindo que a tensão de operação supere a de restrição e a lógica da função TD21 seja iniciada. Esta região está sempre próxima do cruzamento da tensão pelo zero, sendo este o motivo de não ocorrerem atuações para a faixa de tempo apresentada. Outro ponto importante, é o fato de não ocorrer nenhuma atuação com tempo superior a 9,9 ms.

A Figura 5.22 apresenta a comparação entre o tempo de atuação da função TD21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão primária, considerado "valores esperados", e no eixo Y, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão secundária dos TPC, considerados "valores obtidos". Esta Figura permite comparar os tempos de atuação, verificando se os valores obtidos apresentam diferenças em relação aos valores esperados para o caso de análise de tensões primárias. As linhas auxiliares ajudam a mostrar quantas vezes o valor obtido foi maior, menor, ou ainda igual, ao tempo esperado.

Figura 5.22. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que somente os resultados obtidos para o TPC IEEE apresentaram tempo infe-

rior aos resultados esperados, obtidos das tensões primárias. De forma geral, o TPC IEEE apresentou os resultados mais discrepantes considerando que os valores esperados são os que utilizaram tensão primária. Os resultados dos demais TPC apresentam desempenho próximo do valor esperado, sendo que o TPC HAEFELY apresenta maior discrepância que os casos do TPC TRENCH. Pode-se observar ainda que alguns casos provenientes do TPC HAEFELY e IEEE apresentaram uma diferença muito grande em relação ao tempo esperado de atuação, com casos atuando entre 6 e 9 ms sendo que era esperado um tempo de atuação entre 2 e 4 ms. Dessa região, onde são obtidas as maiores diferenças entre o tempo de atuação esperado, da Figura 5.22 e observando a Figura 5.21, pode-se inferir que estes casos estão separados pela região onde não ocorrem atuações, ou seja, o ensaio com uso da tensão primária atua no primeiro lóbulo da tensão de operação e o ensaio com uso da tensão proveniente do secundário do TPC atua somente no segundo lóbulo da tensão de operação. Para os demais casos, verifica-se que grande parte deles apresentam tempos de atuação de até 1,25 vezes superior aos esperados, exceto por cinco casos do TPC IEEE que estão na região entre 1,25 vezes e 1,5 vezes de incremento no tempo de atuação.

5.3.2 Resultados 411L

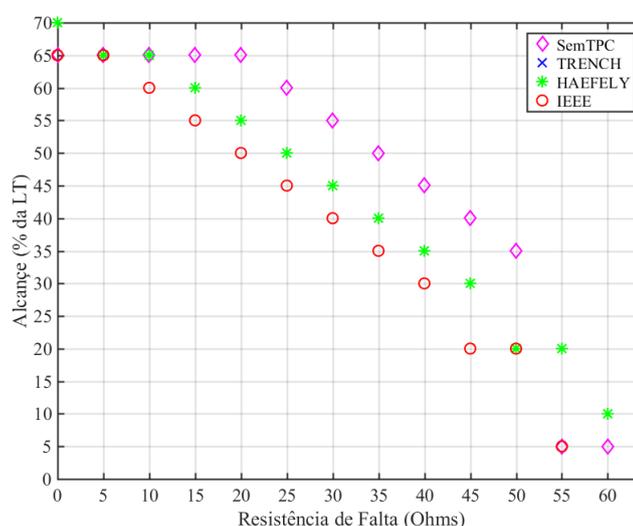
Conforme apresentado anteriormente, as simulações realizadas e ensaiadas utilizando o relé 411L utilizaram a reprodução dos sinais de tensão e corrente por meio da mala de teste Doble F6150sv, conforme descrito na seção 5.1. Dessa forma, foram coletados os resultados utilizando como valores de entrada a tensão considerando o valor primário e os valores secundários provenientes dos modelos digitais dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, apresentados no Capítulo 4.

Conforme apresentado na seção 5.1, no relé 411L não foram realizados todos os ensaios executados no relé T400L. Foram escolhidos os casos que foram julgados mais significativos incluindo todos os casos de resistência de falta, sem no entanto realizá-los para todos os locais de falta. Tomou-se o cuidado de realizar os ensaios necessários para verificação do alcance máximo obtido pela função PH21 para todos os cenários de resistência de falta.

5.3.2.1 Alcance da Função PH21

Com base nos resultados de atuação do relé 411L foram encontrados os alcances máximos obtidos para os ensaios utilizando os valores de tensão primária e secundária como entrada, conforme apresentado na Figura 5.23. Neste trabalho, os valores obtidos dos ensaios com a tensão primária são tratados como valores esperados, sendo este o padrão de comparação.

Figura 5.23. Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.



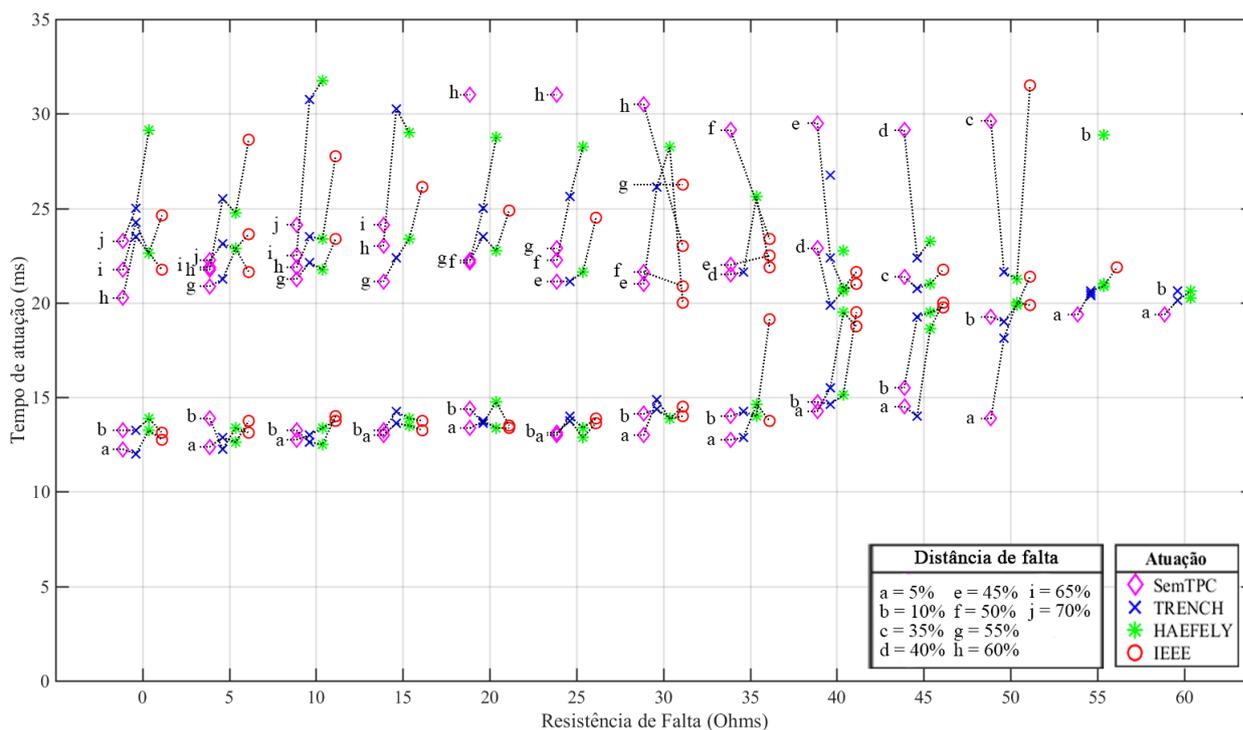
Fonte: Autoria própria.

Verifica-se na Figura 5.23 que o alcance máximo obtido pela função de proteção PH21 diminui com o aumento da resistência de falta. Tal característica ocorre para todos os casos. Nota-se também que quando comparado o alcance utilizando a tensão primária como valor padrão e as tensões provenientes dos TPC, ocorreu sobrealcance quando do uso da tensão do TPC TRENCH e HAEFELY para o caso de resistência de falta igual à 0, 55 e 60 Ω . De outra forma, ocorreram subalcances quando do uso das tensões do TPC TRENCH e HAEFELY para resistência de falta de 15 à 50 Ω , e quando do uso das tensões do TPC IEEE para resistência de falta de 0 Ω e de 10 à 50 Ω . Do total de 13 cenários simulados, foram verificados sobrealcances em 3 eventos para o TPC TRENCH e HAEFELY. Adicionalmente, foram verificados subalcances em 8 eventos para o TPC TRENCH e HAEFELY, e em 10 eventos para o TPC IEEE.

5.3.2.2 Tempo de Atuação da Função PH21

A Figura 5.24 apresenta os tempos de atuação da função PH21 para cada ensaio simulado, levando em consideração os resultados obtidos utilizando como tensão de entrada valores primários e secundários provenientes dos TPC estudados.

Figura 5.24. Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.



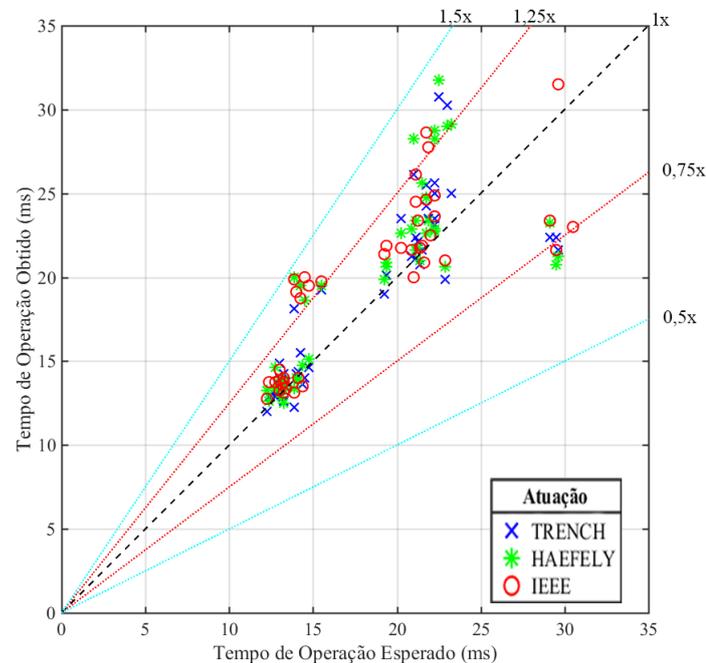
Fonte: Autoria própria.

Nota-se da Figura 5.24 que os tempos de atuação para faltas em 5% da LT são da ordem de 12 ms para resistência de falta igual a 0 Ω , chegando à cerca de 20 ms para eventos com resistência de falta de 60 Ω . Já o tempo de operação para os casos de atuação do alcance máximo são da ordem de 30 ms.

A Figura 5.25 apresenta a comparação entre o tempo de atuação da função PH21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão primária, considerado "valores esperados", e no eixo Y, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão secundária dos TPC, considerados "valores obtidos". Esta figura permite comparar os tempos de atuação, verificando se os valores obtidos apresentam diferenças em relação aos valores esperados. As linhas auxiliares ajudam a mostrar quantas vezes o valor obtido foi maior, menor, ou ainda

igual, ao tempo esperado.

Figura 5.25. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que os tempos de atuação referentes aos ensaios com uso de TPC não possuem uma característica ordenada. Desta forma, nota-se que existem atuações mais rápidas e mais lentas que o "esperado". Sendo assim, verifica-se que as respostas dos TPC resultam em diferenças nas atuações da função de proteção PH21, porém sem necessariamente existir uma causa bem definida que seja comum a todos os casos.

5.4 VARIAÇÃO DO *SOURCE-TO-LINE IMPEDANCE RATIO* (SIR)

O SIR é a relação entre a impedância equivalente da fonte terminal e a impedância da LT e é muitas vezes utilizado como parâmetro para avaliar o comprimento da LT e força das fontes (THOMPSON; SOMANI, 2015). De fato, uma importante característica é que o SIR pode impactar na corrente de curto-circuito a que a LT estará submetida. O ONS, em seu submódulo 2.6, "Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações", define o SIR como a divisão da impedância da fonte atrás do ponto de aplicação da proteção pela impedância total da LT protegida. Para os cálculos realizados neste trabalho, considerou-se a impedância das linhas laterais e da linha protegida, e a impedância da fonte foi considerada com aquela anterior à respectiva linha lateral. Na Figura 5.1 pode-se observar o sistema utilizado para a realização dos ensaios. Desta forma, considera-se que neste trabalho o SIR da fonte S é definido por (5.1). O SIR da fonte R pode ser calculado de forma análoga.

$$SIR = \frac{Z_{fonte}}{Z_{linha}}, \quad (5.1)$$

onde Z_{fonte} é o valor de impedância da fonte de tensão S e Z_{linha} é a impedância das linhas de transmissão LTD, LT1 e LTE.

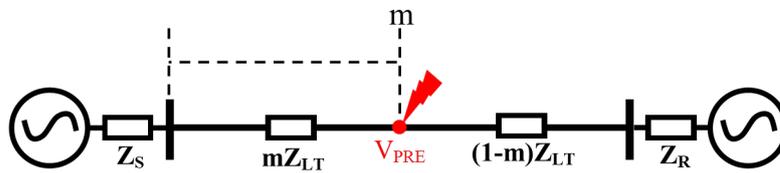
Para o sistema simplificado apresentado na Figura 5.1, o valor do SIR influi diretamente na corrente de curto-circuito, pois como a impedância da LT em estudo possui um valor já definido, a variação da impedância da fonte afeta de forma direta no valor da impedância vista pelo curto-circuito em caso de falta, ou seja, quão menor a impedância da fonte, menor o valor do SIR e maior a corrente de curto-circuito. Vale destacar que a corrente de carga foi mantida igual para todos os casos simulados, fazendo com que durante a pré-falta a tensão e corrente no ponto de medição do relé seja sempre a mesma. Isto é importante para comparação dos casos simulados, pois a tensão e corrente de pré-falta são os elementos formadores da tensão de restrição, utilizada pela função TD21.

Para os ensaios apresentados nesta seção foi utilizado o sistema elétrico da Figura 5.1 realizando curtos-circuitos na fase A com ângulo de incidência na tensão da fase A de 90° da tensão no ponto de falta, um carregamento com abertura angular entre as barras Local e Remota de 5° e uma resistência de falta de 0Ω . Então, foi realizada a variação do SIR da fonte S com os

valores de 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 e da mesma forma foi realizada a variação do SIR da fonte R com os mesmos valores, totalizando 25 cenários de simulação e 375 casos simulados. Por simplificação, o SIR da fonte S é chamado de SIR_1 e o SIR da fonte R é chamado de SIR_2 .

Abaixo, é realizado um estudo com o intuito de verificar a alteração na corrente lida pelo relé devido à variação do SIR das fontes 1 e 2. Considere a Figura 5.26 onde é apresentado um sistema fictício com duas fontes e uma LT, no qual ocorre uma falta franca a uma distância m do terminal S. Para o cálculo da corrente de curto-circuito, pode-se utilizar o princípio de Thévenin, calculando a tensão V_{PRE} , que é a tensão de Thévenin, e a impedância de Thévenin.

Figura 5.26. Sistema fictício.



Fonte: Autoria própria.

Para o cálculo da impedância de Thévenin tem-se que:

$$Z_{th} = (Z_S + mZ_{LT}) // ((1 - m)Z_{LT} + Z_R) \quad (5.2)$$

Então:

$$Z_{th} = \frac{(Z_S + mZ_{LT}) \cdot ((1 - m)Z_{LT} + Z_R)}{(Z_S + mZ_{LT}) + ((1 - m)Z_{LT} + Z_R)} \quad (5.3)$$

Colocando o termo Z_{LT} , tem-se:

$$Z_{th} = \frac{Z_{LT}(\frac{Z_S}{Z_{LT}} + m) \cdot Z_{LT}((1 - m) + \frac{Z_R}{Z_{LT}})}{Z_{LT}(\frac{Z_S}{Z_{LT}} + \frac{Z_R}{Z_{LT}} + 1)} \quad (5.4)$$

Mas, $SIR_1 = \frac{Z_S}{Z_{LT}}$ e $SIR_2 = \frac{Z_R}{Z_{LT}}$, substituindo em (5.4) tem-se:

$$Z_{th} = \frac{-m^2 + m(1 + SIR_2 - SIR_1) + SIR_2SIR_1 + SIR_1}{SIR_1 + SIR_2 + 1} Z_{LT} \quad (5.5)$$

Desta forma, obtêm-se a impedância de Thévenin para uma falta no ponto m e pode-se calcular a corrente de curto-circuito para a falta. Para o sistema apresentado na Figura 5.26,

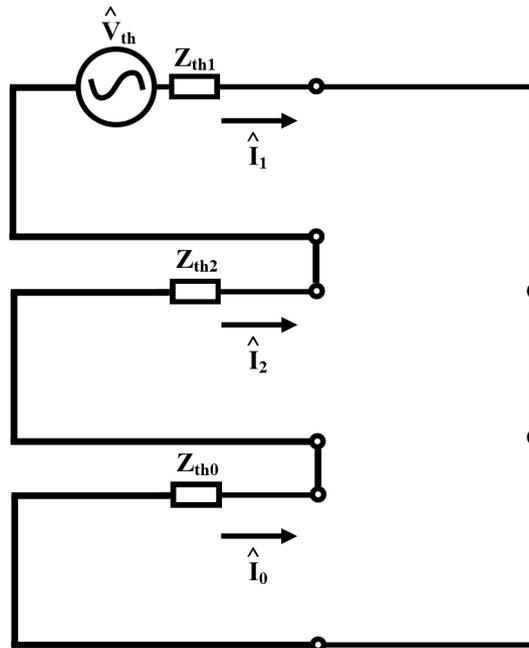
(5.5) é válida no domínio de seqüência obtendo o circuito apresentado na Figura 5.27. Dessa forma, considerando a resistência de falta igual a zero, pode-se obter a corrente de curto-circuito monofásico na fase A, como:

$$\hat{I}_F = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_0 = 3\hat{I}_1 = \frac{3\hat{V}_{PRE}}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{th0}} \quad (5.6)$$

Que pode ser escrita como:

$$\hat{I}_F = \frac{3\hat{V}_{PRE}}{\frac{-m^2+m(1+SIR_2-SIR_1)+SIR_2SIR_1+SIR_1}{SIR_1+SIR_2+1}(Z_{LT1} + Z_{LT2} + Z_{LT0})} \quad (5.7)$$

Figura 5.27. Sistema fictício no domínio de seqüência para um curto-circuito AT.



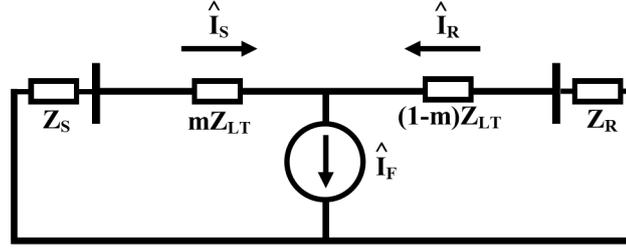
Fonte: Autoria própria.

Considere a Figura 5.28 que mostra as correntes do sistema sob falta apresentado na Figura 5.26. Desta forma, é interessante obter o valor da corrente \hat{I}_S , que é a corrente a ser lida pelo relé instalado no terminal S. Para encontrar o valor da corrente \hat{I}_S , pode-se utilizar a regra do divisor de corrente.

Utilizando a regra do divisor de corrente tem-se que:

$$\hat{I}_S = \hat{I}_F \frac{(1-m)Z_{LT} + Z_R}{Z_S + Z_R + Z_{LT}} \quad (5.8)$$

Figura 5.28. Sistema fictício.



Fonte: Autoria própria.

Multiplicando o numerador e denominador por $\frac{1}{Z_{LT}}$ tem-se:

$$\hat{I}_S = \hat{I}_F \frac{(1-m) + \frac{Z_R}{Z_{LT}}}{\frac{Z_S}{Z_{LT}} + \frac{Z_R}{Z_{LT}} + 1} \quad (5.9)$$

Mas, $SIR_1 = \frac{Z_S}{Z_{LT}}$ e $SIR_2 = \frac{Z_R}{Z_{LT}}$, substituindo em (5.9) tem-se:

$$\hat{I}_S = \frac{(1-m) + SIR_2}{SIR_1 + SIR_2 + 1} \hat{I}_F \quad (5.10)$$

A Equação (5.10) é válida para os circuitos de seqüência e a corrente \hat{I}_S da fase A pode ser escrita como:

$$\hat{I}_S = \hat{I}_{S1} + \hat{I}_{S2} + \hat{I}_{S0} = \frac{(1-m) + SIR_2}{SIR_1 + SIR_2 + 1} (\hat{I}_{F1} + \hat{I}_{F2} + \hat{I}_{F0}) = \frac{(1-m) + SIR_2}{SIR_1 + SIR_2 + 1} \hat{I}_F \quad (5.11)$$

Substituindo (5.7) em (5.11) e considerando o SIR de seqüência positiva igual ao de seqüência zero, tem-se:

$$\hat{I}_S = \frac{(1-m) + SIR_2}{SIR_1 + SIR_2 + 1} \frac{3\hat{V}_{PRE}}{\frac{-m^2 + m(1 + SIR_2 - SIR_1) + SIR_2 SIR_1 + SIR_1}{SIR_1 + SIR_2 + 1} (Z_{LT1} + Z_{LT2} + Z_{LT0})} \quad (5.12)$$

Rearranjando (5.12), temos:

$$\hat{I}_S = \frac{3\hat{V}_{PRE}}{(Z_{LT1} + Z_{LT2} + Z_{LT0})} \frac{1 - m + SIR_2}{-m^2 + m(1 - SIR_1 + SIR_2) + SIR_1 + SIR_1 SIR_2} \quad (5.13)$$

Considerando o sistema em estudo neste trabalho, para qualquer situação de falta a tensão \hat{V}_{PRE} e a impedância de seqüência da linha será sempre igual, pois a tensão nas barras S e

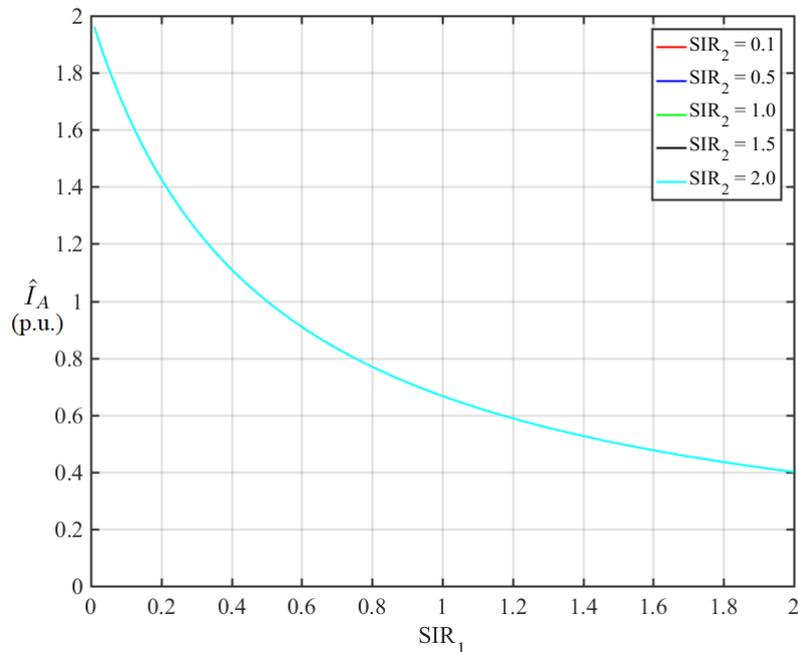
R e as linhas são mantidas inalteradas para quaisquer casos simulados. Isto é realizado para garantir que o carregamento será sempre o mesmo para todos os ensaios realizados, tornando assim a corrente de pré-falta sempre igual para todos os casos. Diante do exposto, nota-se que \hat{V}_{PRE} é influenciada somente pelo local da falta, sendo:

$$\hat{V}_{PRE} = \hat{V}_L - \hat{I}_S(mZ_{LT}), \quad (5.14)$$

Ou seja, considerando um mesmo local de falta m , \hat{V}_{PRE} será igual para qualquer variação de SIR. Dessa forma, pode-se analisar a corrente \hat{I}_S para dois casos, a variação do SIR_1 com o SIR_2 fixo e a variação do SIR_2 com o SIR_1 fixo. Para tanto, as Figuras 5.29 e 5.30 apresentam gráficos mostrando a alteração da corrente \hat{I}_S devido à variação do SIR. Para fins de simplificação utiliza-se a corrente \hat{I}_A , que é igual à:

$$\hat{I}_A = \frac{\hat{I}_S}{\frac{3\hat{V}_{PRE}}{(Z_{LT1}+Z_{LT2}+Z_{LT0})}}. \quad (5.15)$$

Figura 5.29. Valor da corrente I_A para uma falta em 50% da LT, com SIR_1 variando e o SIR_2 fixo.

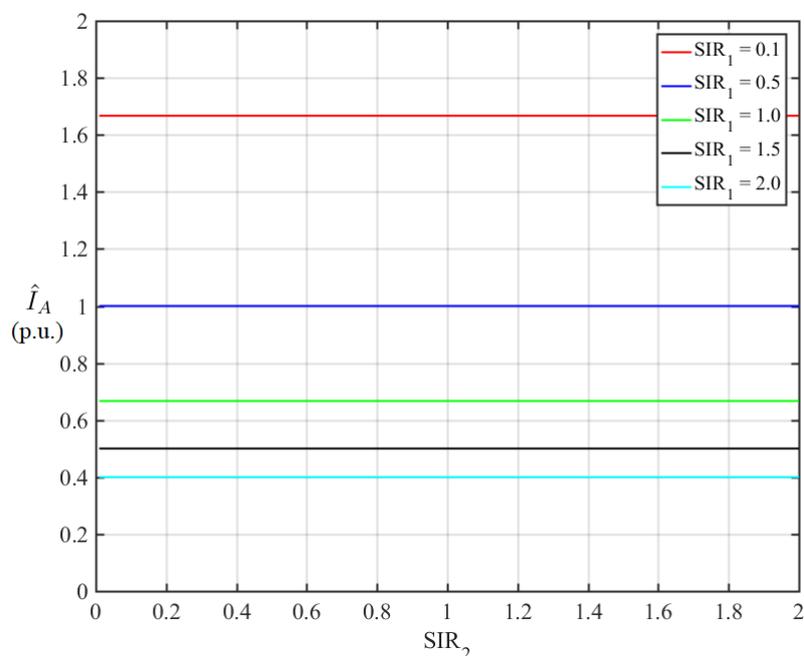


Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.29 mostra que o valor da corrente \hat{I}_A diminui conforme o valor de SIR_1 aumenta, porém para um mesmo valor de SIR_1 , a corrente \hat{I}_A não é alterada com a mudança do SIR_2

tornando os gráficos sobrepostos. Já a Figura 5.30 mostra que o valor da corrente \hat{I}_A não é alterado com o aumento do valor de SIR_2 , porém muda conforme é alterado o valor de SIR_1 .

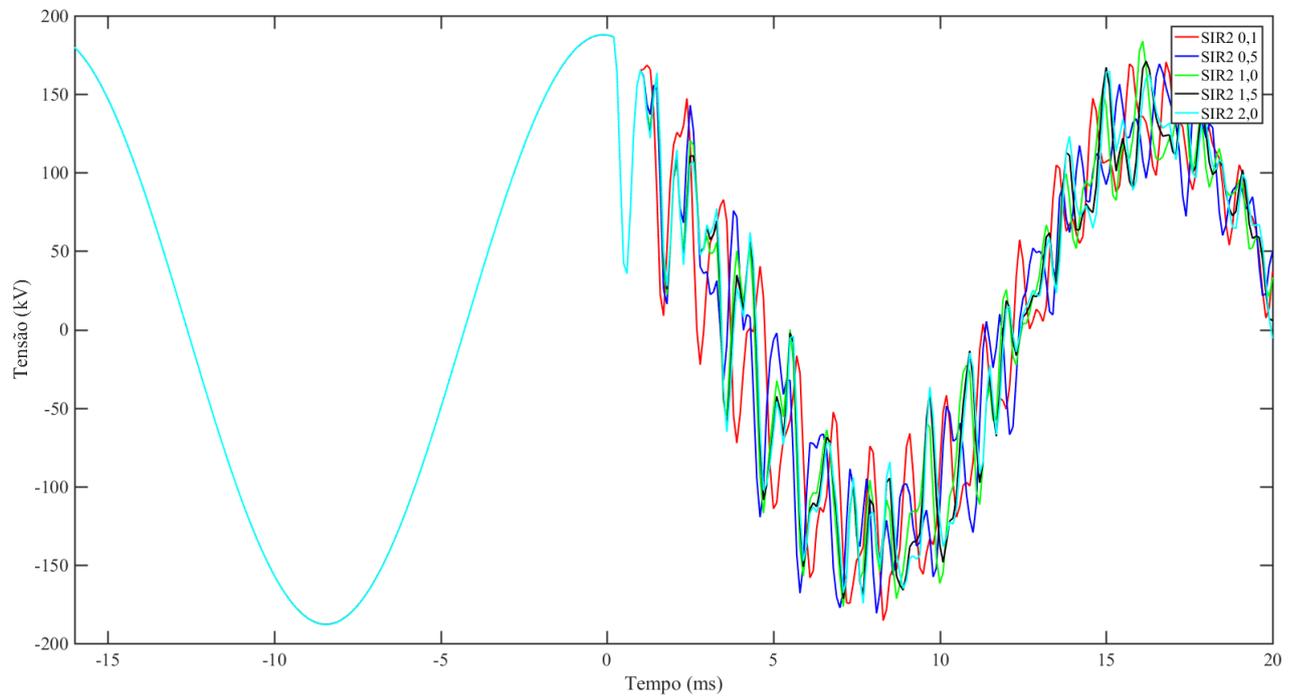
Figura 5.30. Valor da corrente \hat{I}_A para uma falta em 50% da LT, com SIR_2 variando e o SIR_1 fixo.



Fonte: Autoria própria.

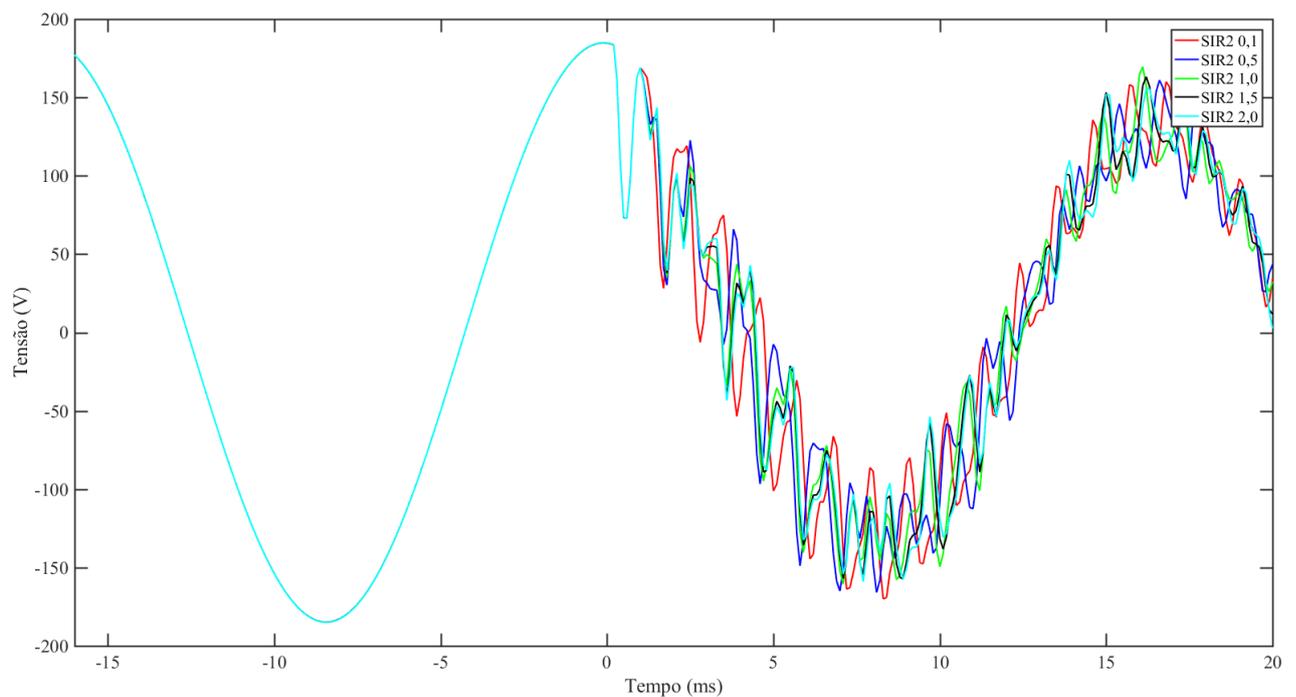
É interessante verificar a influência que as respostas transitórias dos TPC possuem sobre diferentes características de SIR. Desta forma, as Figuras 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34 apresentam os sinais de tensão provenientes do primário do TPC, do secundário do TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, respectivamente, sob diferentes condições de SIR_2 considerando o SIR_1 igual a 0,1, para uma falta em 50% da LT. Já as Figuras 5.36, 5.37, 5.38 e 5.39 apresentam os sinais de tensão provenientes do primário do TPC, do secundário do TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, respectivamente, sob diferentes condições de SIR_1 considerando o SIR_2 igual a 0,1, para uma falta em 50% da LT.

Figura 5.31. Tensão medida sem o uso de TPC pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.



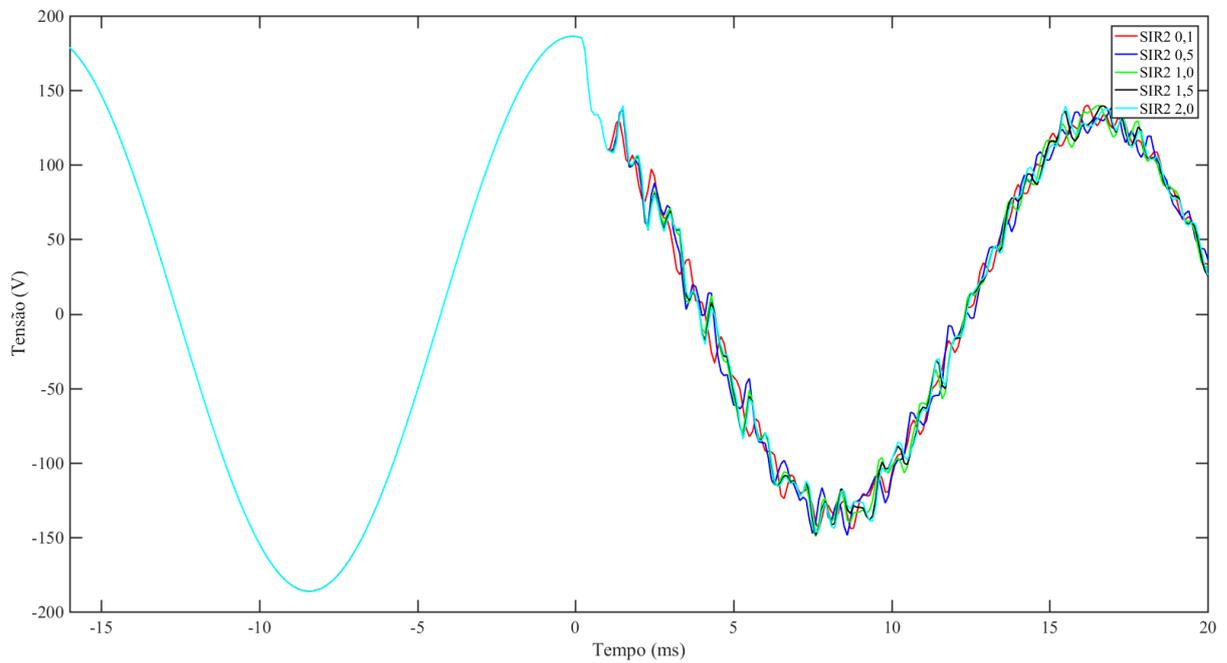
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.32. Tensão medida com o uso do TPC TRENCH pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.



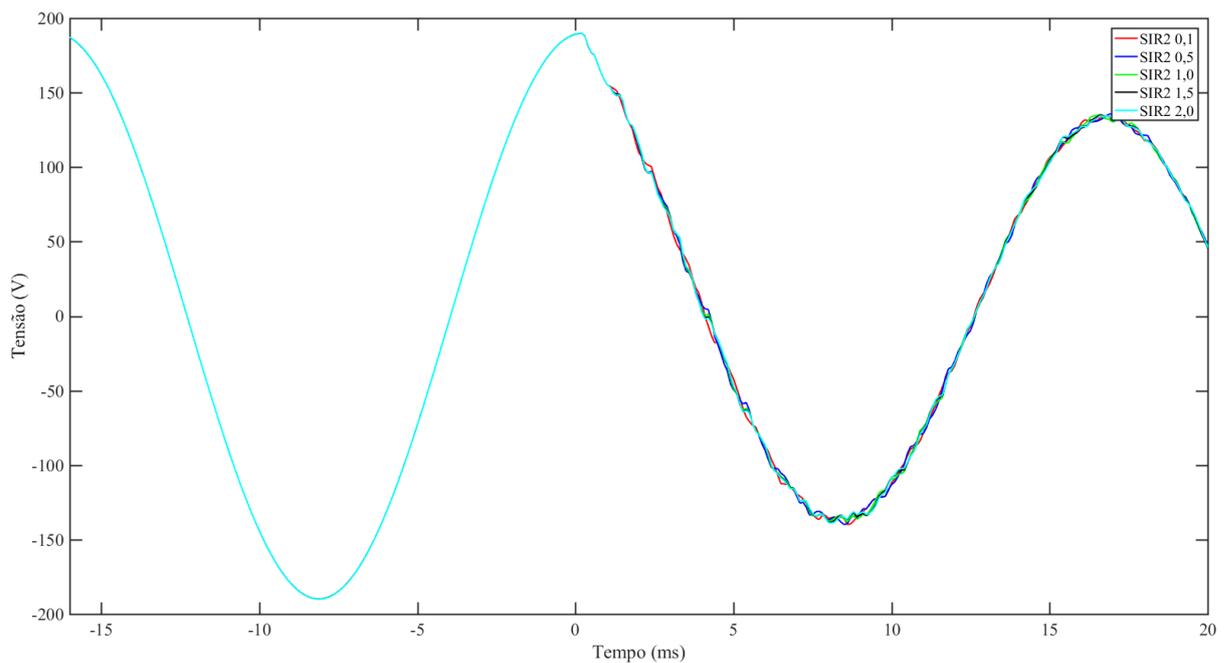
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.33. Tensão medida com o uso do TPC HAEFELY pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.



Fonte: Autoria própria.

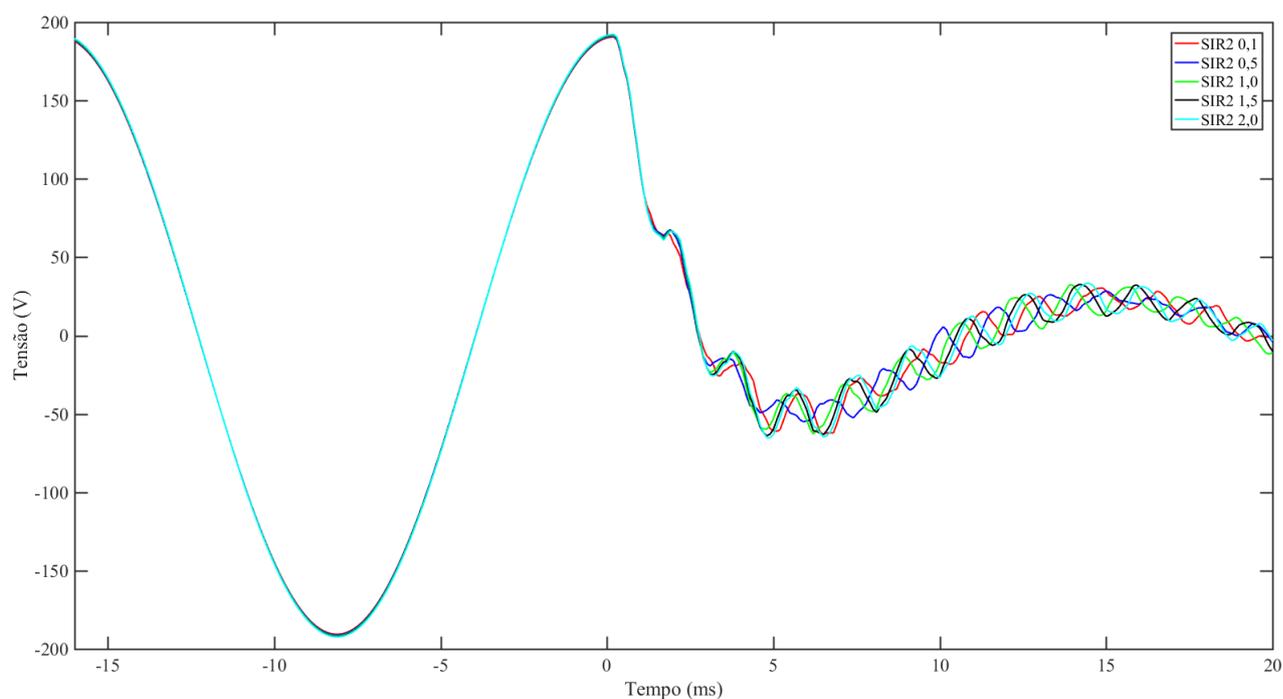
Figura 5.34. Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.



Fonte: Autoria própria.

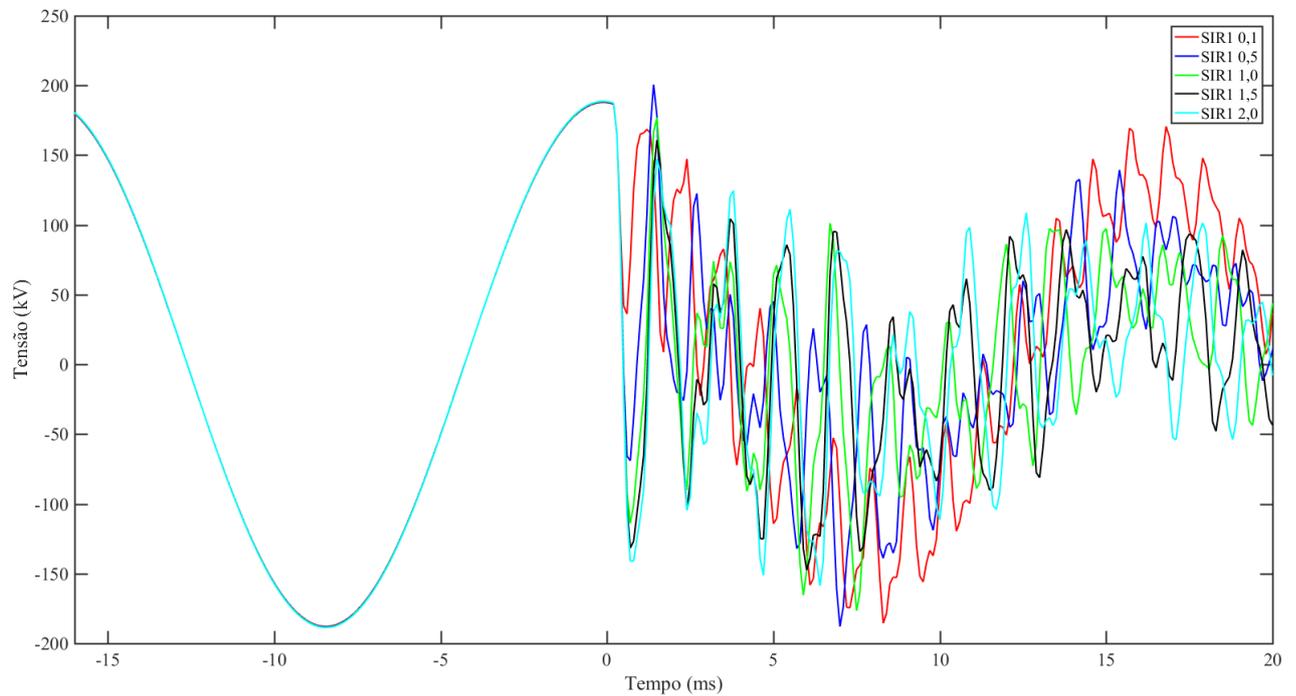
Nota-se das Figuras 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34 que quando observado cada caso separadamente, a variação do SIR_2 não ocasiona mudança significativa nos sinais de tensão, notando-se somente diferenças nos transitórios do sinal após a falta sem alteração dos máximos e mínimos alcançados em cada intervalo. Porém, quando se observa a comparação da resposta para os casos cujos ensaios foram realizados com uso da tensão proveniente dos TPC, nota-se atenuação dos sinais transitórios ocorridos após a falta, sendo os mais afetados os provenientes do TPC IEEE, seguido dos TPC HAEFELY e TRENCH. Conforme apresentado na Figura 5.29, o valor da corrente vista pelo relé de proteção não sofre variação quando mantido o SIR_1 invariável e alterado o valor do SIR_2 , sendo portanto mantida a mesma queda de tensão e, conseqüentemente, a mesma leitura de tensão. As diferenças ocasionadas nos transitórios ocorridos após a falta são provenientes das interações com as impedâncias do sistema do lado R. Da Figura 5.29 verifica-se também que para um aumento no SIR_1 tem-se uma diminuição na corrente vista pelo relé e conseqüente aumento na impedância entre a fonte S e o ponto de medição. Para exemplificar isto, a Figura 5.35 apresenta os sinais de tensão provenientes do TPC IEEE para uma falta em 50% da LT com o SIR_1 fixo e igual a 2,0 e o SIR_2 variando.

Figura 5.35. Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 2,0.



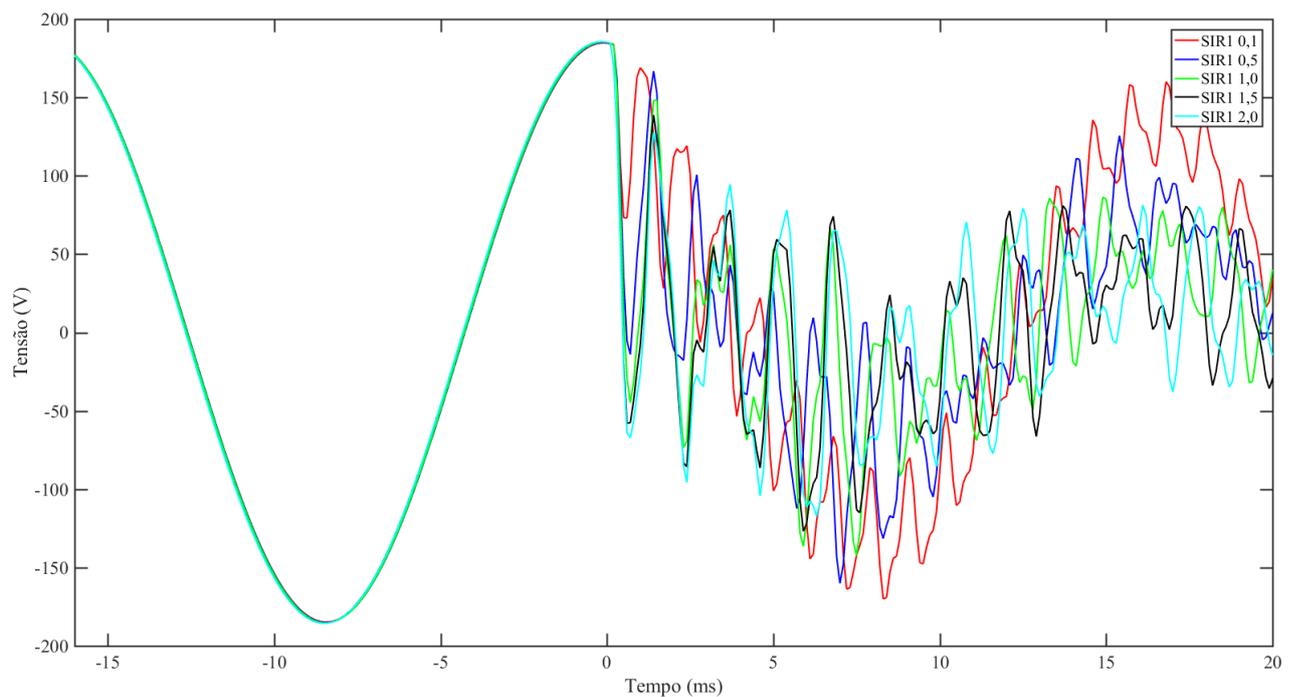
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.36. Tensão medida sem o uso de TPC pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.



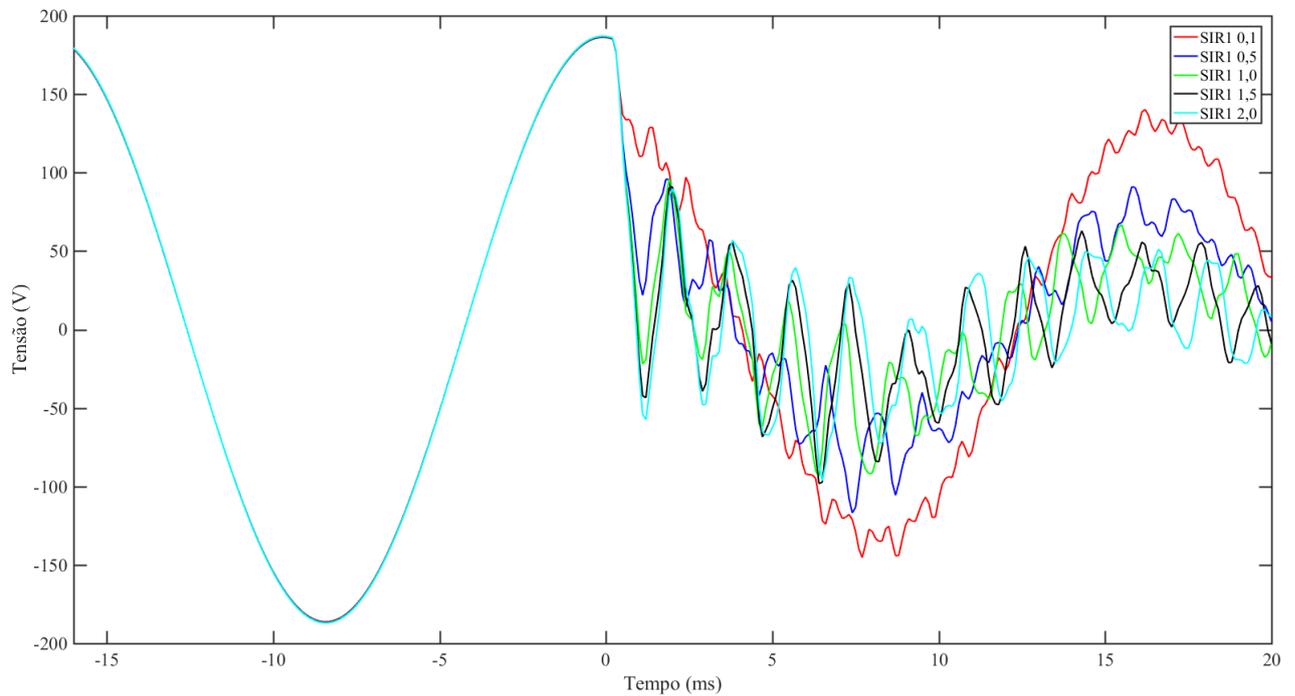
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.37. Tensão medida com o uso do TPC TRENCH pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.



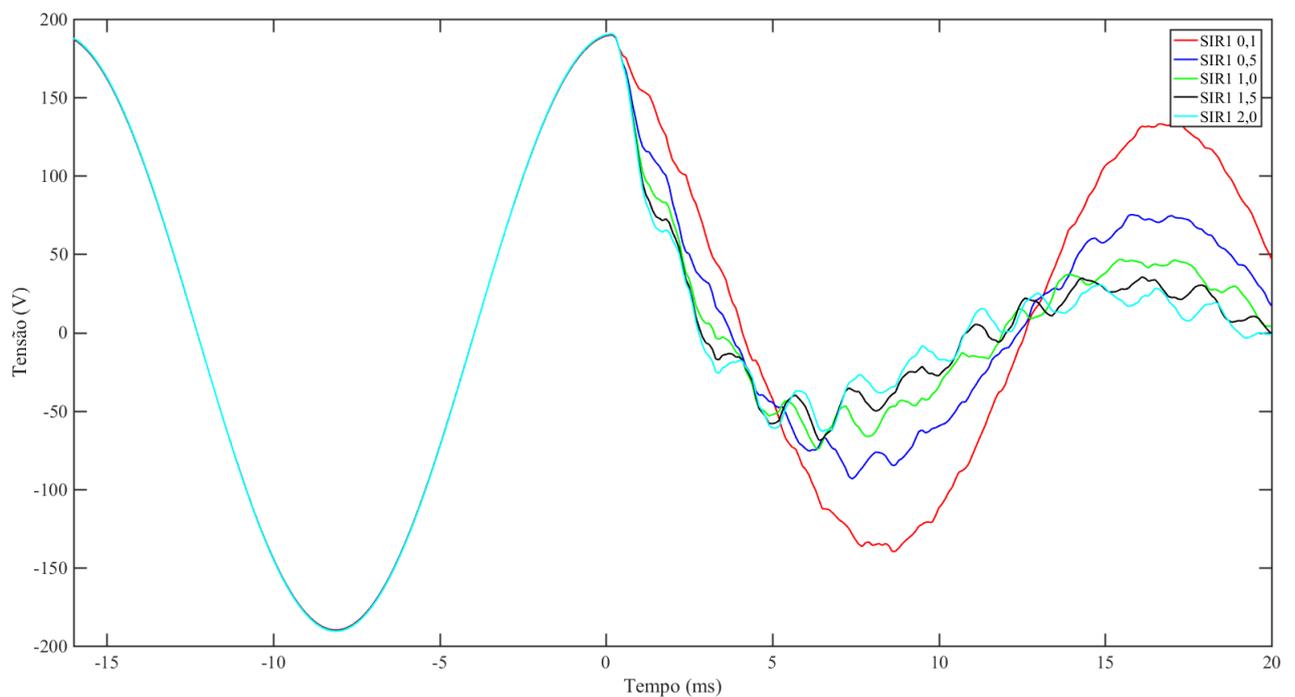
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.38. Tensão medida com o uso do TPC HAEFELY pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.



Fonte: Autoria própria.

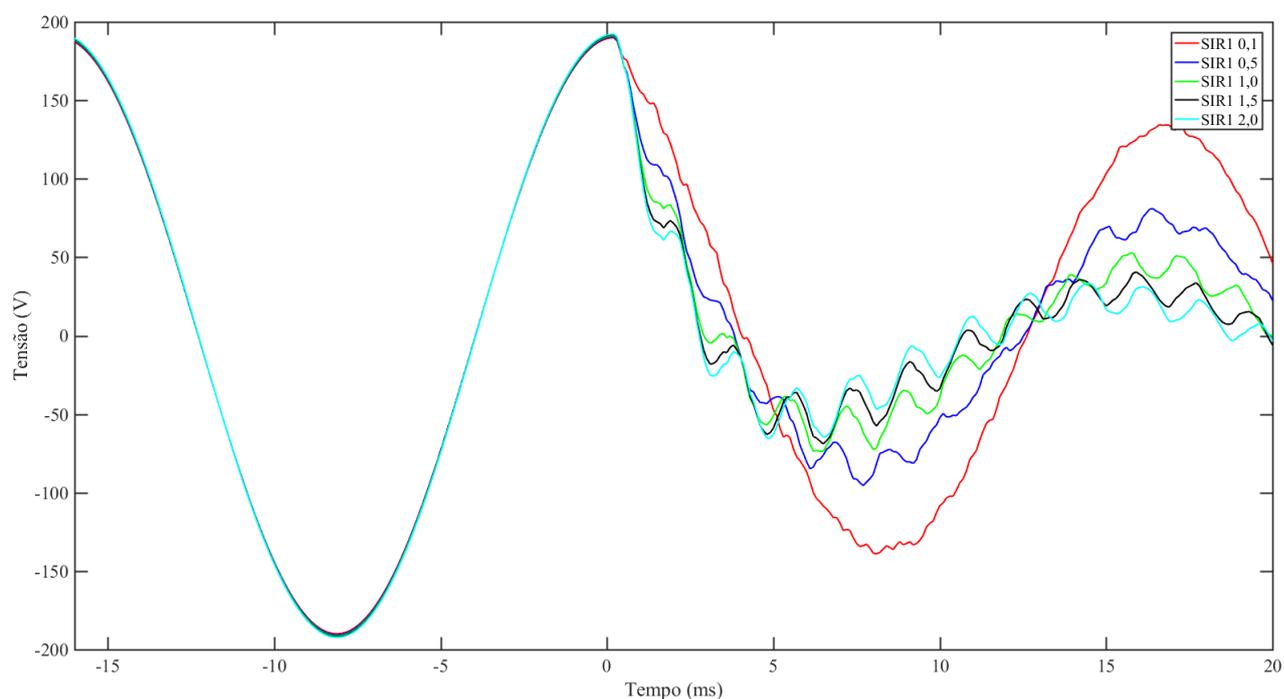
Figura 5.39. Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.



Fonte: Autoria própria.

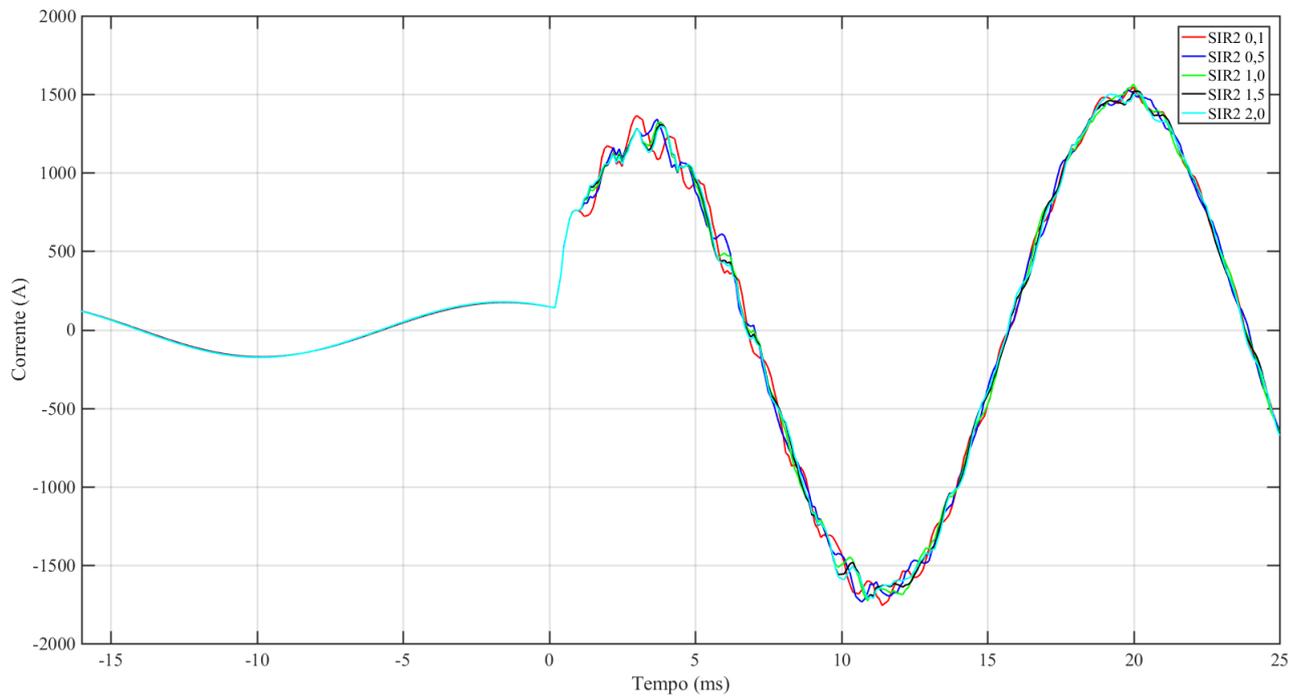
Nota-se das Figuras 5.36, 5.37, 5.38 e 5.39 que quanto menor o SIR_1 , menor o afundamento inicial da tensão e menor a variação absoluta da tensão. Novamente, verifica-se que os sinais de tensão para os casos cujos ensaios foram realizados com uso dos TPC, possuem atenuação dos sinais transitórios ocorridos após a falta, sendo os mais afetados os provenientes do TPC IEEE, seguido dos TPC HAEFELY e TRENCH. Conforme apresentado pela Figura 5.30, o aumento do SIR_1 provoca diminuição da corrente vista pelo relé, porém ocasiona também um aumento na impedância do sistema, ocasionando assim maiores quedas de tensão. Esta característica pode ser vista na Figura 5.30. Para exemplificar o aumento que o SIR_2 provoca na tensão, a Figura 5.40 mostra os sinais de tensão provenientes do TPC IEEE para uma falta em 50% da LT com o SIR_2 fixo e igual a 2,0 e o SIR_1 variando. Comparando-se com a Figura 5.39 não é possível notar diferenças consideráveis.

Figura 5.40. Tensão medida com o uso do TPC IEEE pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 2,0.

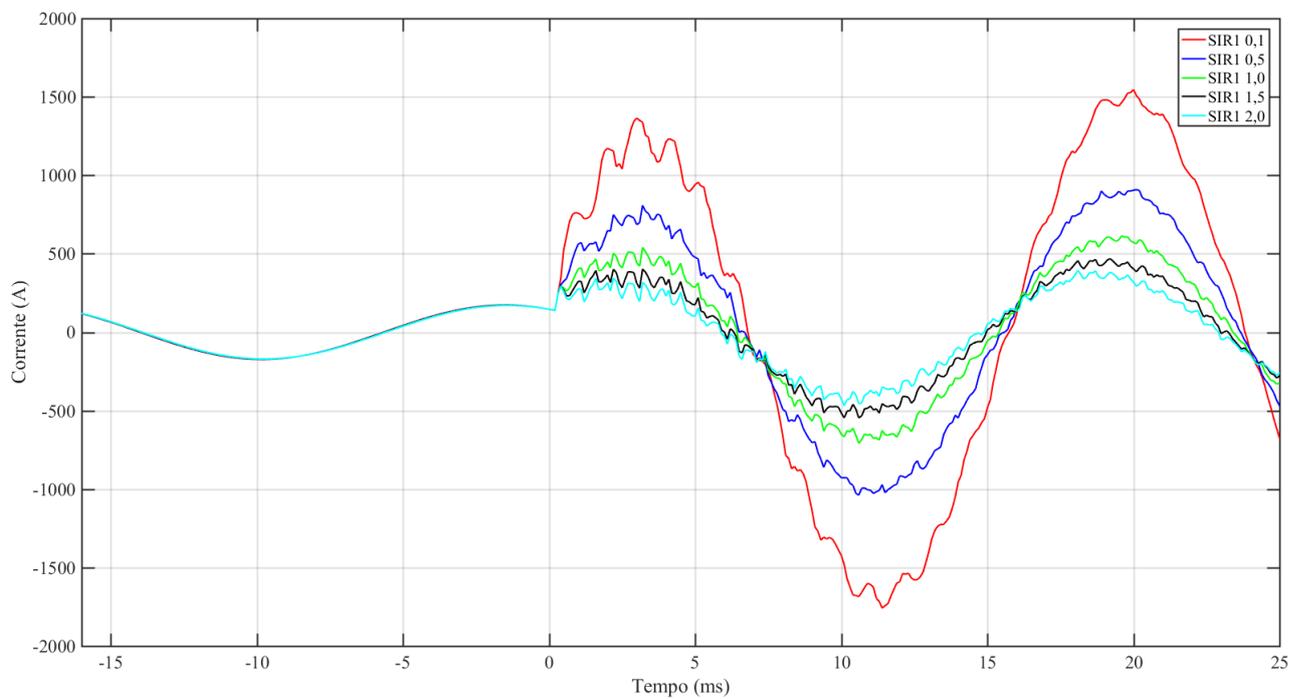


Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.41 apresenta as diferenças causadas nos sinais de corrente para uma falta em 50% da linha realizando a variação do SIR da fonte 2 e mantido fixo o SIR da fonte 1, igual à 0,1. Já a Figura 5.42 apresenta as diferenças causadas nos sinais de corrente para uma falta em 50% da linha realizando a variação do SIR da fonte 1 e mantido o SIR da fonte 2 igual 0,1.

Figura 5.41. Corrente medida pelo relé para diferentes valores do SIR_2 , com o SIR_1 igual à 0,1.

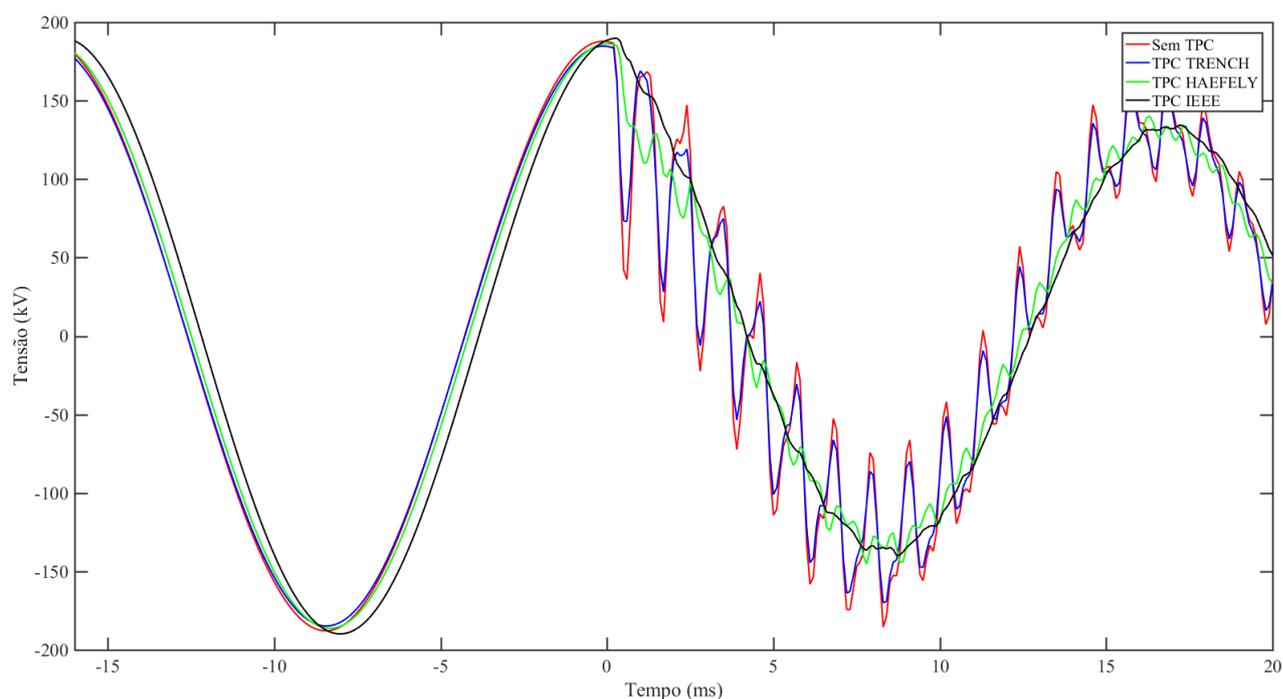
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.42. Corrente medida pelo relé para diferentes valores do SIR_1 , com o SIR_2 igual à 0,1.

Fonte: Autoria própria.

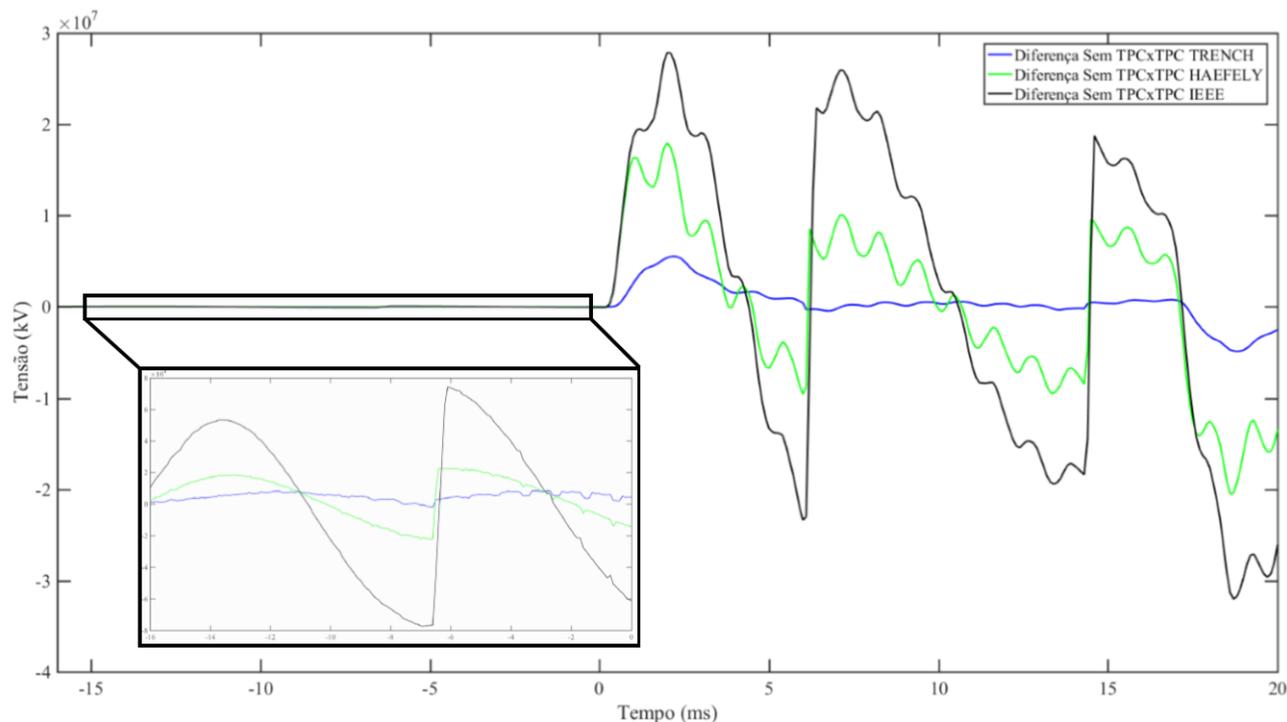
A Figura 5.43 apresenta os sinais de tensão obtidos do primário e do secundário dos diversos TPC estudados. Da Figura observa-se que o sinal de tensão secundária que mais se aproxima do valor primário é do TPC TRENCH, apresentando pequenas atenuações. Já o TPC HAEFELY apresenta um sinal de tensão com significativas diferenças em relação à tensão primária. Por fim, o TPC IEEE é o que apresenta as maiores diferenças em relação à tensão primária, com atenuação de praticamente todo o transitório. Nota-se, também, que existe defasagem e diferença de amplitude da tensão secundária dos TPC em relação a tensão primária, sendo que o TPC IEEE apresenta os piores resultados.

Figura 5.43. Comparação das tensões utilizadas nos ensaios, para uma falta em 50% da linha com o SIR da fonte 1 e 2 iguais a 0,1.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.44 apresenta a diferença entre o módulo das tensões provenientes do primário e secundário dos diversos TPC, normalizadas para tensão primária. Verifica-se que após a falta as diferenças são significativas, sendo o pior caso para o TPC IEEE. Diferenças também podem ser vistas na tensão de pré-falta, em menor intensidade. Estas diferenças impactam na tensão de restrição da função TD21.

Figura 5.44. Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.43.

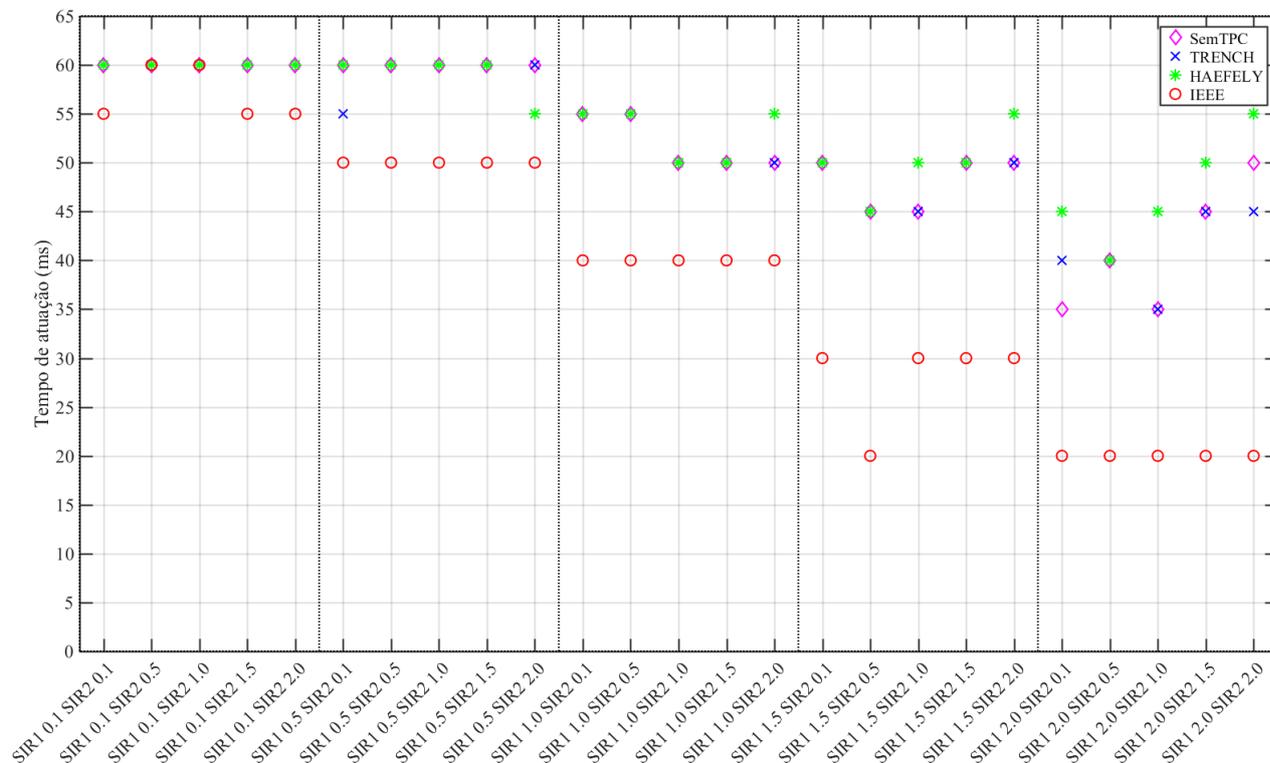
Fonte: Autoria própria.

5.4.1 Resultados T400L

Conforme apresentado anteriormente, as simulações realizadas e ensaiadas no relé T400L utilizaram a funcionalidade de *Playback*, descrita na seção 5.1. Dessa forma, foram coletados os resultados utilizando como valores de entrada a tensão considerando o valor primário e os valores secundários provenientes dos modelos digitais dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, apresentados no Capítulo 4.

5.4.1.1 Alcance da Função TD21

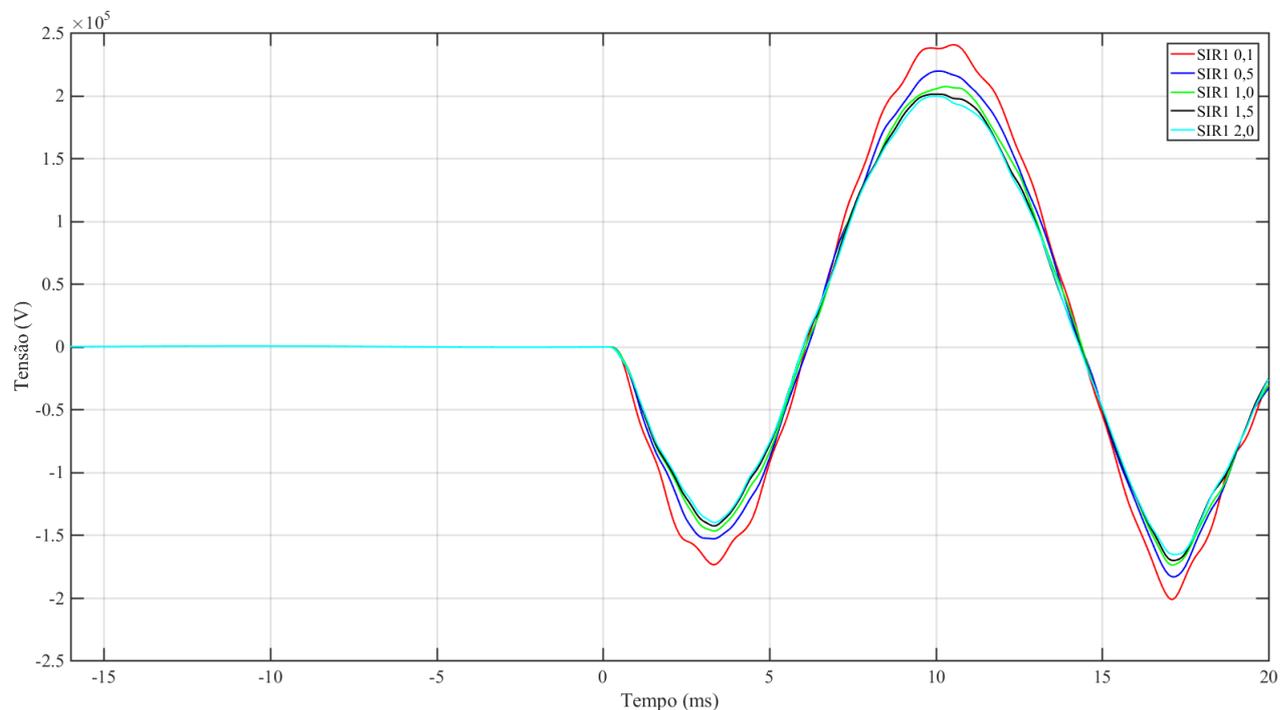
Com base nos resultados de atuação do relé T400L foram encontrados o alcance máximo obtido para os ensaios utilizando os valores de tensão como entrada, conforme apresentado na Figura 5.45. Neste trabalho, os valores obtidos dos ensaios com a tensão primária são referenciados como "valor esperado". Desta forma, pode-se dividir a Figura 5.45 em cinco blocos, sendo mantidos fixos os valores de SIR_1 em cada bloco.

Figura 5.45. Alcance obtido para diferentes valores de *SIR*.

Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser visto nas Figuras 5.29 e 5.30, quando o valor de SIR_1 , aumenta a corrente diminui. Já nas Figuras 5.36, 5.37, 5.38 e 5.39 verificou-se que quanto maior o SIR_1 , maior o afundamento da tensão. Estes eventos impactam diretamente no valor da tensão de operação, alterando o valor do alcance da função TD21. A Figura 5.46 apresenta o valor da tensão de operação para uma falta em 50% da LT, considerando diferentes valores de SIR_1 , mantido fixo o valor de SIR_2 igual à 2,0 e considerando os ensaios com tensão primária. Verifica-se que a tensão de operação decresce conforme o valor de SIR_1 diminui. Desta forma, espera-se que o alcance da função TD21 diminua conforme é realizado o aumento do SIR_1 . Este efeito pode ser verificado na Figura 5.45. Baseado na Figura 5.45 serão analisados os casos de subalcance e sobrealcance da função TD21, considerando o alcance obtido nos ensaios com uso da tensão primária como a referência para definição de sobre e subalcance.

Figura 5.46. Tensão de operação para uma falta em 50% da LT para diferentes valores de SIR_1 e SIR_2 igual à 2,0.



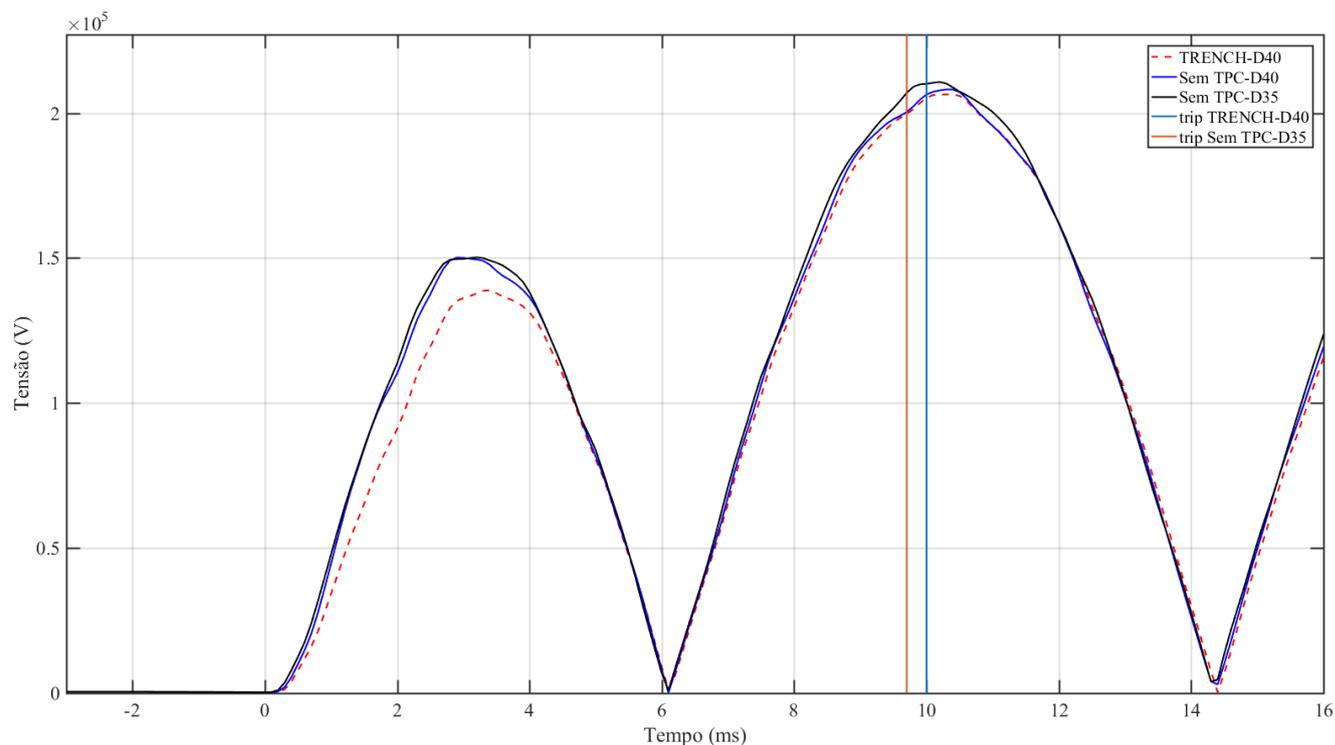
Fonte: Autoria própria.

5.4.1.2 Sobrealcance Devido às Tensões do TPC TRENCH

Conforme verificado na Figura 5.45, o relé T400L sobrealcançou, quando comparado ao valor esperado, para o caso onde a tensão utilizada no ensaio foi proveniente do TPC TRENCH para uma falta em 40% da linha com um SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente. No caso observado o sobrealcance foi de 5%, que é o passo de cálculo para a região de atuação encontrada. Na Figura 5.47 são mostradas a tensão de operação para três casos com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente, o primeiro sendo o ensaio com tensões do TPC TRENCH para uma falta em 40% da linha, e os demais para um ensaio com tensão primária e falta em 40% e 35% da linha. Também é apresentado o instante de atuação para os respectivos casos.

Na Figura 5.47 verifica-se que a tensão de operação do ensaio com TPC TRENCH é a menor entre as três, sendo que no primeiro lóbulo, entre 0 e 6 ms, esta apresenta valores significativamente menores que os demais casos. Já no segundo lóbulo, valores entre 6 e 14 ms, a tensão de operação proveniente do ensaio com TPC TRENCH é muito próxima das demais,

Figura 5.47. Comparação entre as tensões de operação para um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente.



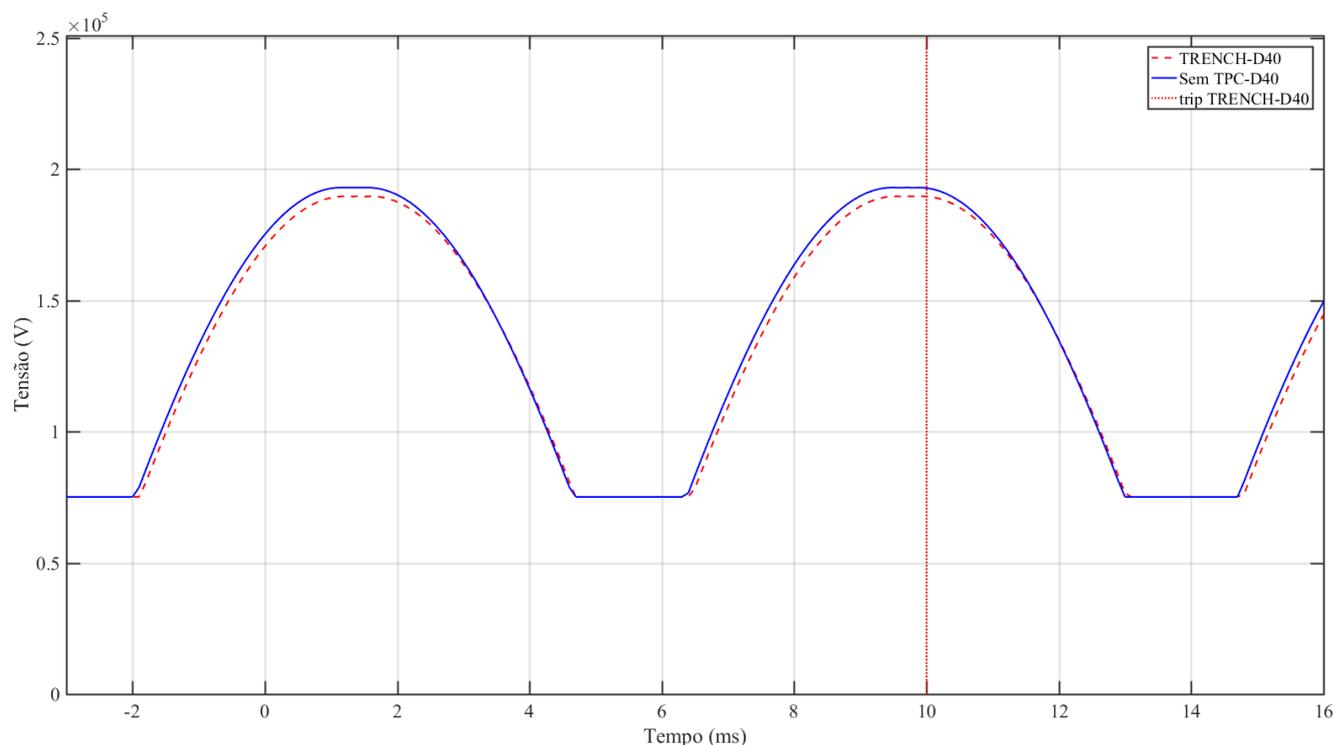
Fonte: Autoria própria.

sendo ainda a menor em praticamente todo o intervalo. Desta forma, observando somente a tensão de operação, o ensaio com tensão proveniente do primário para falta em 40% da linha deveria ter uma resposta no mínimo igual ao caso em estudo.

A Figura 5.48 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2, que proporciona uma possibilidade de comparação da diferença entre a tensão de restrição para os casos de falta em 40% da linha sendo utilizada a tensão proveniente do secundário do TPC TRENCH e do primário. Nota-se que a tensão de restrição proveniente do uso do TPC TRENCH apresenta valores inferiores quando comparada com a tensão de restrição utilizando as tensões primárias.

A Figura 5.49 apresenta uma comparação da diferença dos módulos da tensão de operação e restrição para os casos apresentados nas Figuras 5.47 e 5.48. Nota-se que apesar da tensão de operação, no intervalo destacado, ser maior para o ensaio que utiliza tensões primárias, a tensão de restrição também é maior neste intervalo. Desta forma, a lógica de operação da função TD21 para o ensaio com tensão primária, pode não ter reunido as condições de atuação, sendo uma

Figura 5.48. Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 40% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente.

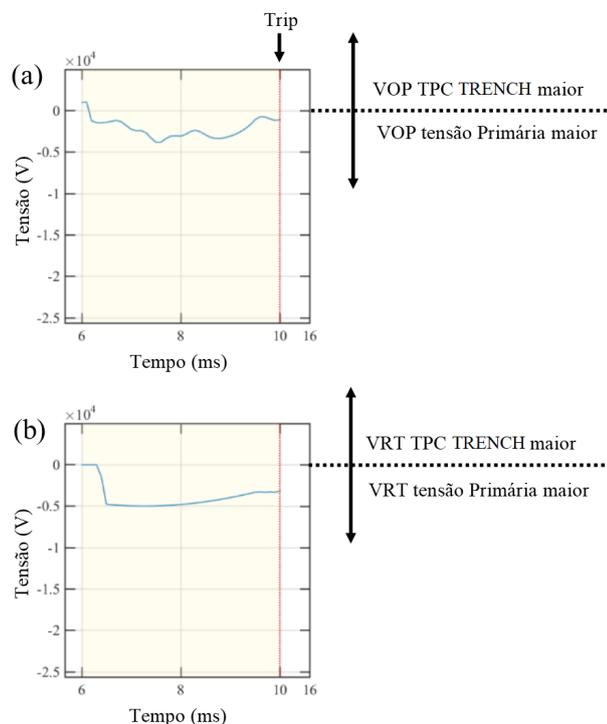


Fonte: Autoria própria.

delas a de ultrapassagem da tensão de restrição pela tensão de operação. Apesar de não ser possível afirmar que os valores apresentados pela tensão de restrição são exatamente os mesmos utilizados pelo relé T400L, a curva apresentada possibilita uma boa forma de comparação entre os casos simulados, mostrando as regiões onde verificam-se as diferenças ocasionadas pela resposta do TPC.

Neste caso, verifica-se que a tensão de pré-falta apresentou diferenças quando comparada às tensões primária e secundária, que mesmo com a tensão de operação sendo maior para o caso dos ensaios com tensão primária, uma atuação sobrealçada da função TD21 para uso de tensões do TPC TRENCH foi verificada. Nota-se porém que este foi um caso isolado ocorrendo somente uma vez para todos os ensaios realizados.

Figura 5.49. Comparação para uma falta em 40% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso TRENCH e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso TRENCH e sem TPC.



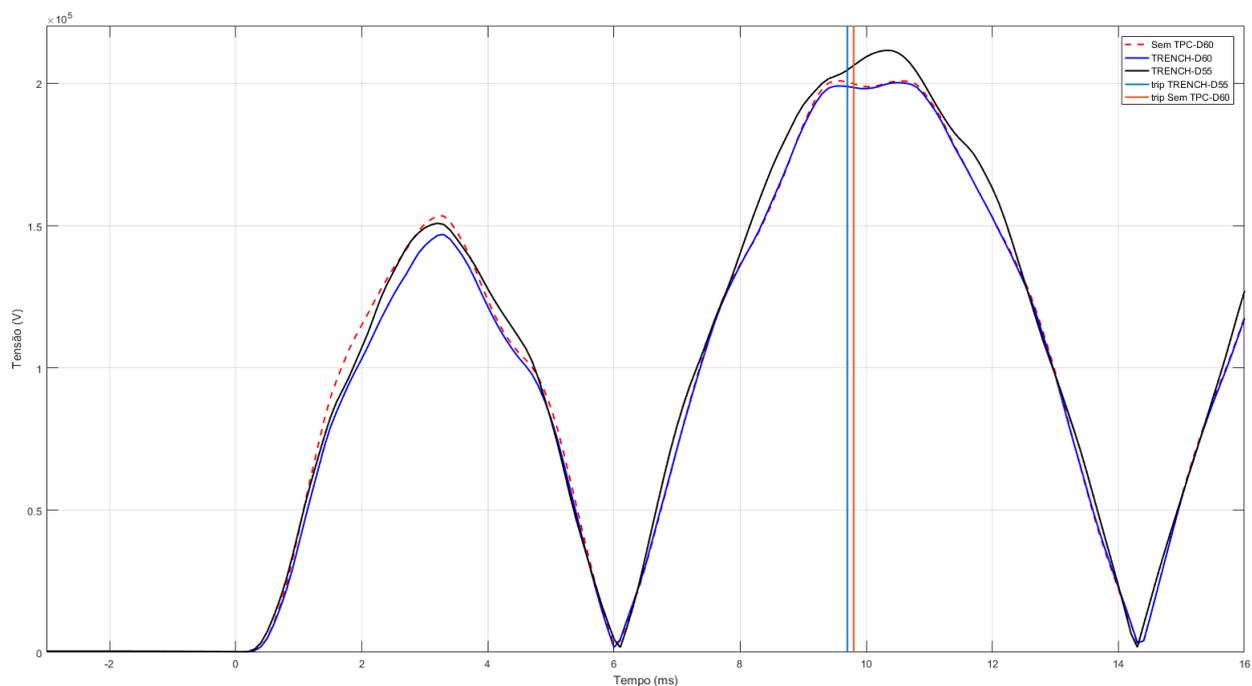
Fonte: Autoria própria.

5.4.1.3 Sublance Devido às Tensões do TPC TRENCH

Conforme verificado na Figura 5.45, o relé T400L subalcançou, quando comparado ao valor esperado, para o caso onde a tensão utilizada no ensaio foi proveniente do TPC TRENCH para uma falta em 55% da linha com um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente. No caso observado o sobrealcance foi de 5%, que é o passo de cálculo para a região de atuação encontrada. Também, foi observado um sublance para uma falta em 45% da linha com um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 para ambos os casos. Na Figura 5.50 são apresentadas a tensão de operação para três casos com *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente, o primeiro sendo o ensaio com tensões primárias para uma falta em 60% da linha, e os demais para um ensaio com tensão proveniente do TPC TRENCH e falta em 60% e 55% da linha. Também é ilustrado o instante de atuação para os devidos casos.

Na Figura 5.50 verifica-se que a tensão de operação para o ensaio com tensões primárias é maior que os demais ensaios em quase todo o período do primeiro lóbulo, sendo inferior no

Figura 5.50. Comparação entre as tensões de operação para um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.



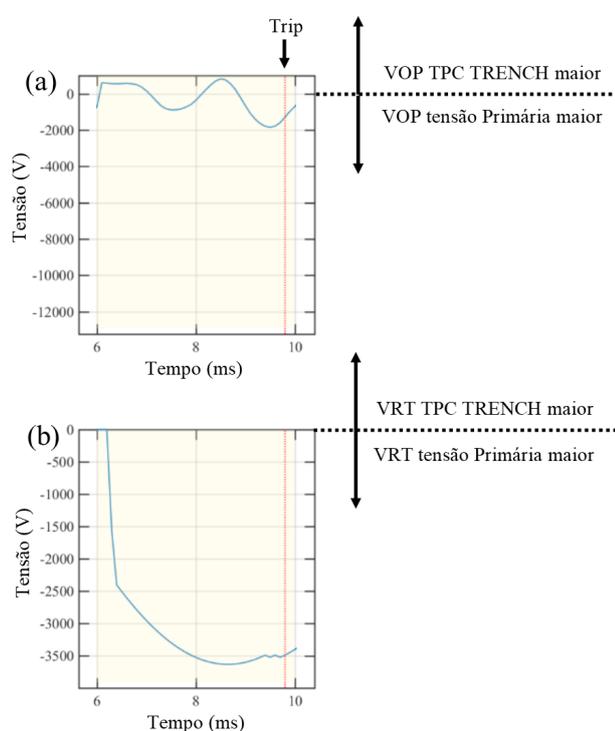
Fonte: Autoria própria.

segundo lóbulo para o caso de falta em 55% da linha e uso de tensões do TPC TRENCH. Quando comparado o ensaio com tensões primárias e provenientes do TPC TRENCH para uma falta em 60% da linha, o primeiro ensaio apresenta tensão de operação superior em praticamente todo o intervalo apresentado. Novamente, pode-se utilizar a implementação da tensão de restrição apresentada na Figura 5.48 como uma forma de comparação entre as tensões de restrição dos casos ensaiados com uso de tensão primária e secundária proveniente do TPC TRENCH.

A Figura 5.51 apresenta uma comparação da diferença dos módulos da tensão de operação e restrição para o caso apresentado na Figura 5.50. Nota-se, na região destacada, que a tensão de operação para o ensaio com tensão primária é superior em praticamente todo o intervalo de tempo. Já a tensão de restrição apresenta valores iguais ou superiores para o ensaio com tensão primária em todo o intervalo destacado. A atuação somente ocorreu para o caso onde foi utilizada a tensão primária, conforme o esperado da Figura 5.51 (a). Porém, no caso anterior onde foi verificado o sobrealcance para o ensaio com a tensão do TPC TRENCH, apresentado na Figura 5.49, verificou-se o resultado contrário, ou seja, um sobrealcance mesmo com a tensão de operação para o ensaio com a tensão primária superior ao caso com tensão do TPC TRENCH.

Comparando as Figuras 5.51 e 5.49, nota-se que a principal diferença é na ordem de grandeza dos valores apresentados. Outra importante diferença está no momento de atuação da função TD21, acontecendo antes para o caso de subalcance. Quando comparadas as Figuras 5.50 e 5.47, verifica-se que para o caso de subalcance (Figura 5.50) a tensão de operação alcança valores da ordem de 200 kV antes que o caso de sobrealcance (Figura 5.47), tendo sua atuação mais rápida.

Figura 5.51. Comparação para uma falta em 60% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso TRENCH e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso TRENCH e sem TPC.

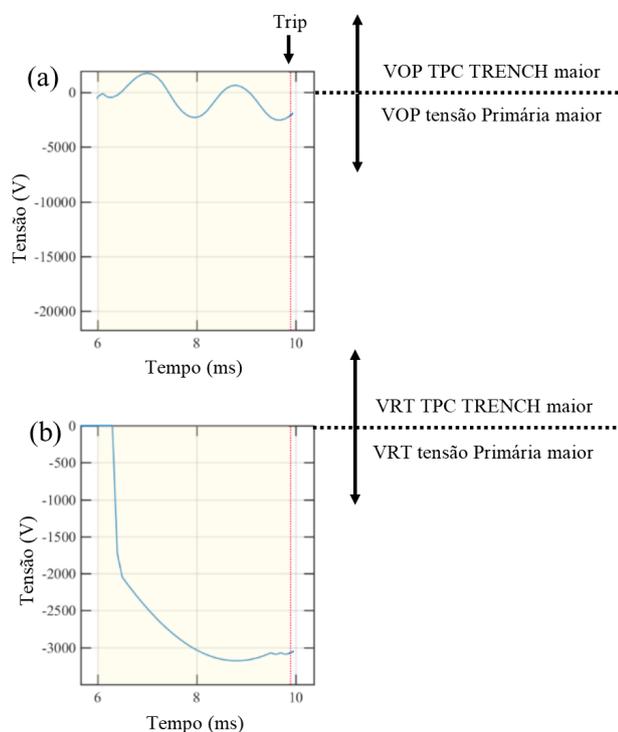


Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.52 apresenta uma comparação da diferença dos módulos da tensão de operação e restrição para o segundo caso de subalcance demonstrado na Figura 5.45. Na Figura 5.52 apresenta-se a diferença entre a tensão de operação (a) e de restrição (b) para uma falta em 50% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 2,0. Para este caso, verificou-se que o subalcance foi de 5% que é o passo de cálculo utilizado nesta região de simulação. Os resultados apresentados nas Figuras 5.52 e 5.51 são semelhantes, porém nota-se um aumento no valor da diferença entre as tensões de operação e diminuição na diferença da tensão de restrição para o caso apresentado na Figura 5.52, confirmando a atuação para o ensaio com uso das tensões primárias e consequente subalcance do ensaio com uso do TPC TRENCH. No caso do subalcance da

função TD21 apresentado quando do uso das tensões provenientes do TPC TRENCH, verifica-se que a tensão de pré-falta ocasiona uma diferença na tensão de restrição. Também, verifica-se uma diferença na tensão de operação entre os ensaios com tensão primária e secundária, sendo que estes dois fatores influenciam de forma direta na resposta da função TD21, tornando a mesma subalcançada quando do uso das tensões provenientes do TPC TRENCH. Quando se compara com o caso de sobrealcance, Figura 5.49, vê-se que existe uma maior diferença na tensão de restrição, porém de forma bastante similar aos casos de subalcance.

Figura 5.52. Comparação para uma falta em 50% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 para ambos os casos: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso TRENCH e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso TRENCH e sem TPC.



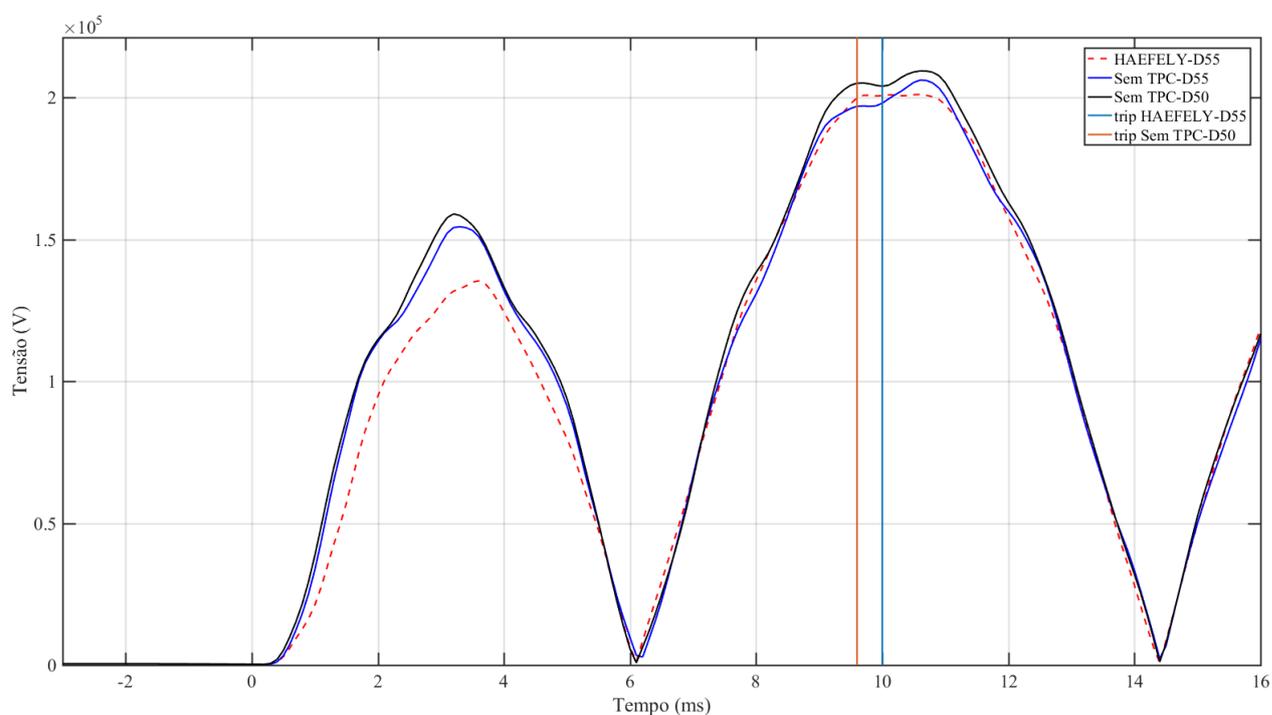
Fonte: Autoria própria.

5.4.1.4 Sobrealcance Devido às Tensões do TPC HAEFELY

Conforme verificado na Figura 5.45, o relé T400L sobrealcançou, quando comparado ao valor esperado, para o caso onde a tensão utilizada no ensaio foi proveniente do TPC HAEFELY para faltas em 55% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, 50% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 1,5 e 1,0, 55% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 1,5 e 2,0, 45% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, 45% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 1,0, 50% com SIR da fonte 1 e 2 iguais

à 2,0 e 1,5, e 55% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 2,0, respectivamente. Os casos para faltas em 45% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1 e 45% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 1,0 obtiveram um sobrealcançe de 10%, para os demais casos o sobrealcançe foi de 5%. Na Figura 5.53 são apresentadas as tensões de operação para três casos com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente, o primeiro sendo o ensaio com tensões secundárias do TPC HAEFELY para uma falta em 55% da linha, e os demais para um ensaio com tensão proveniente do primário e falta em 55% e 50% da linha. Também, é indicado o instante de atuação para os referidos casos.

Figura 5.53. Comparação entre as tensões de operação para um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente.

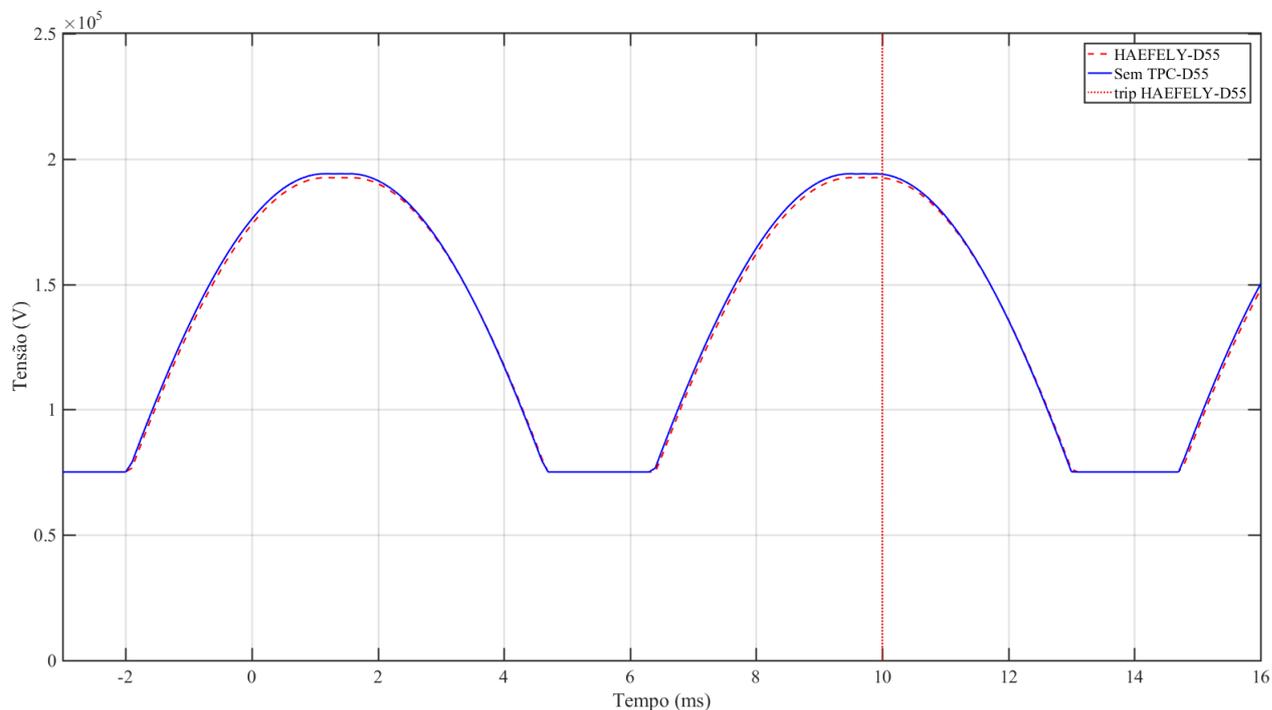


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.53 verifica-se que no primeiro lóbulo da tensão de operação, entre 0 e 6 ms, a tensão de operação proveniente do ensaio com o TPC HAEFELY é inferior às demais, sendo que no segundo lóbulo, entre 6 e 14 ms, em diversos momentos esta tensão é superior à sua equivalente para o ensaio com tensão primária. A Figura 5.54 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2, onde nota-se que a tensão de restrição para o ensaio com tensões primárias é superior à tensão de restrição quando do uso do TPC HAEFELY.

A Figura 5.55 apresenta uma comparação da diferença dos módulos da tensão de operação

Figura 5.54. Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um SIR da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente.

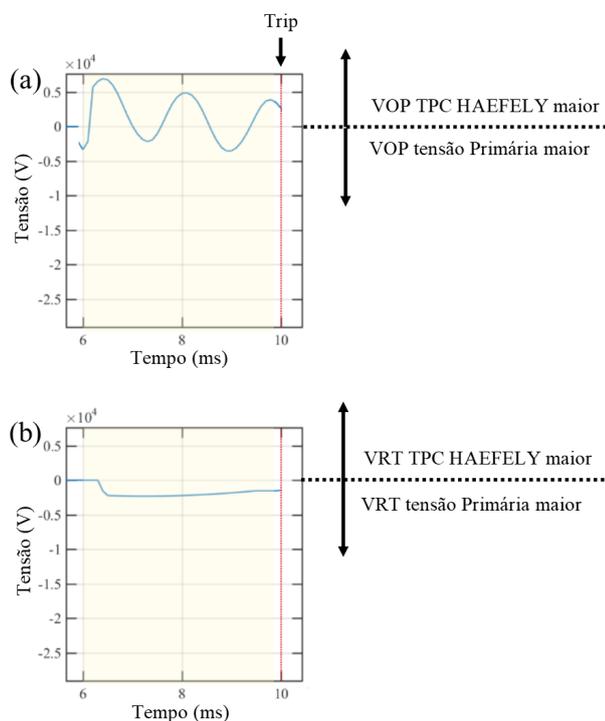


Fonte: Autoria própria.

e restrição para os casos de falta em 55% da linha e SIR da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente, com uso de tensões primárias e secundárias provenientes do TPC HAEFELY. Nota-se na área destacada que, em diversos momentos, a tensão de operação para o ensaio com tensão do TPC HAEFELY é superior à tensão de operação para o ensaio com tensão primária, inclusive no momento da atuação da função TD21. Já a tensão de restrição é maior para o ensaio com uso da tensão primária. Desta forma, vê-se claramente que a atuação sobrealcançada é ocasionada pela tensão de operação, que é formada em parte pela tensão incremental, neste caso verifica-se que os transitórios de resposta do TPC ocasionaram o sobrealcance.

A Figura 5.56 apresenta uma comparação da tensão de operação e restrição para um segundo caso de subalcançe encontrado na Figura 5.45. Na Figura 5.56 apresenta-se a diferença entre tensão de operação (a) e de restrição (b) para uma falta em 45% da LT e um SIR da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente. Para este caso o subalcançe verificado foi de 10% que são dois passos de cálculo de diferença. Os resultados apresentados nas Figuras 5.55 e 5.56 são semelhantes. Porém, para o caso apresentado na Figura 5.56, nota-se que a tensão de operação, próximo aos 6 ms, inicia a subida antes, quando comparado com o caso apresentado na Figura

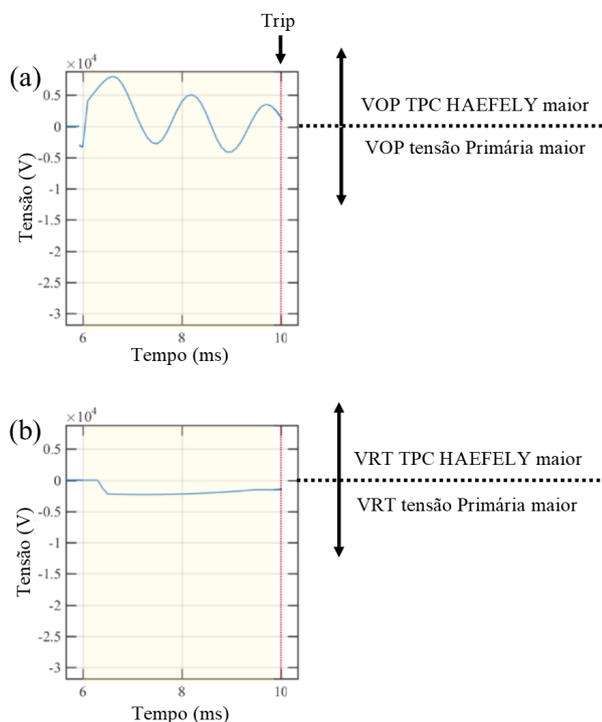
Figura 5.55. Comparação para uma falta em 55% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 1,0 e 2,0, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.



Fonte: Autoria própria.

5.55. Diante do exposto nas Figuras 5.55 e 5.56, com a tensão de operação maior para o ensaio com uso de tensão secundária proveniente do TPC HAEFELY e a tensão de restrição menor para esses casos, quando comparado com os ensaios com tensão primária, nota-se que a função TD21 sobrealçaria para estes casos. Os demais casos de sobrealcance quando utilizada a tensão secundária do TPC TRENCH apresentam resultados parecidos com os reportados nesta seção, sendo portanto omitidos.

Figura 5.56. Comparação para uma falta em 45% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 2,0 e 0,1, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.



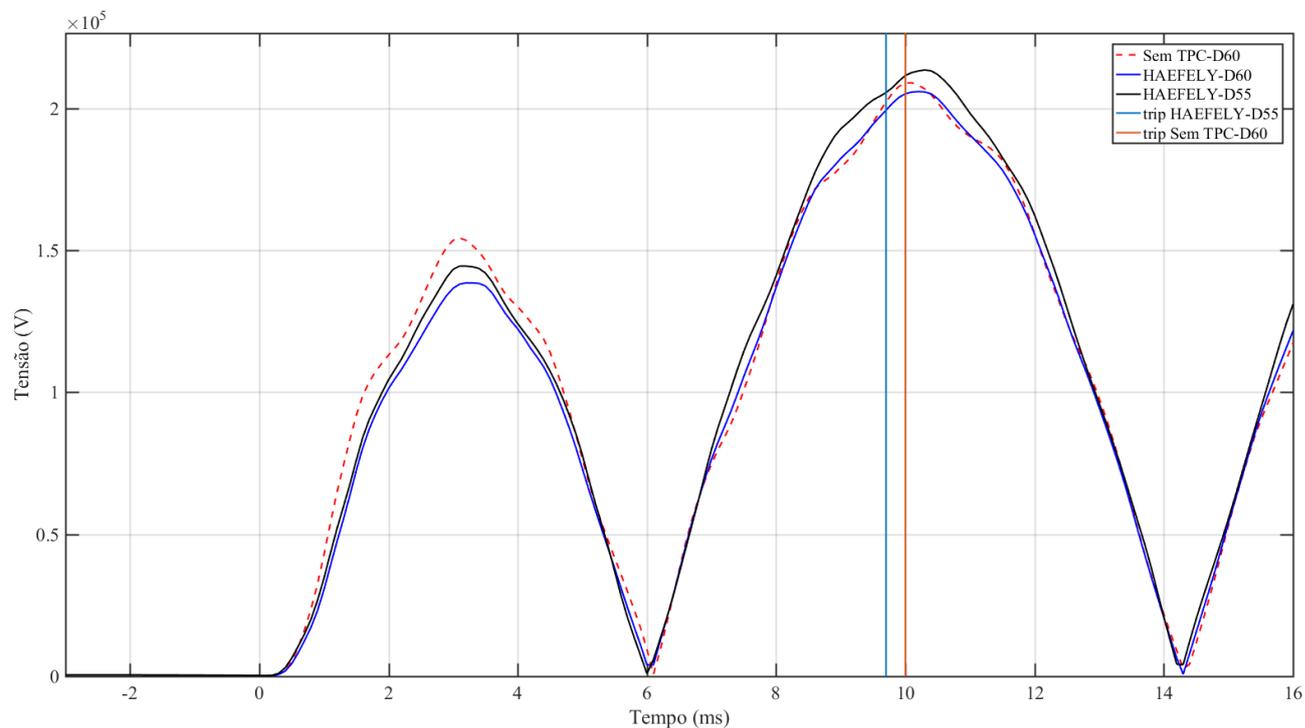
Fonte: Autoria própria.

5.4.1.5 Sublance Devido às Tensões do TPC HAEFELY

Conforme apresentado na Figura 5.45, o relé T400L subalcançou para um caso, quando comparado ao valor esperado, para o caso onde a tensão utilizada no ensaio foi proveniente do TPC HAEFELY para faltas em 55% com SIR da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0. Para este caso foi verificado um sublance de 5%, sendo que ocorreu atuação da função TD21 em 60% quando utilizada a tensão primária. A Figura 5.57 apresenta a tensão de operação para três casos com SIR das fontes Local e remota iguais à 0,5 e 2,0, respectivamente. O primeiro caso é referente ao ensaio com tensões primárias, considerando uma falta em 60% da LT. O segundo e terceiro dizem respeito a um ensaio com tensões provenientes do TPC HAEFELY para faltas em 60% e 55% da LT. Também, é apresentado o momento de atuação para os devidos casos.

Na Figura 5.57 observa-se que a tensão de operação do ensaio para falta em 60% da LT e uso de tensões do TPC HAEFELY apresenta, para o segundo lóbulo entre 6 e 14 ms, valores próximos dos obtidos para o ensaio com tensão primária e falta em 60% da linha, alternando

Figura 5.57. Comparação entre as tensões de operação para um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0, respectivamente.



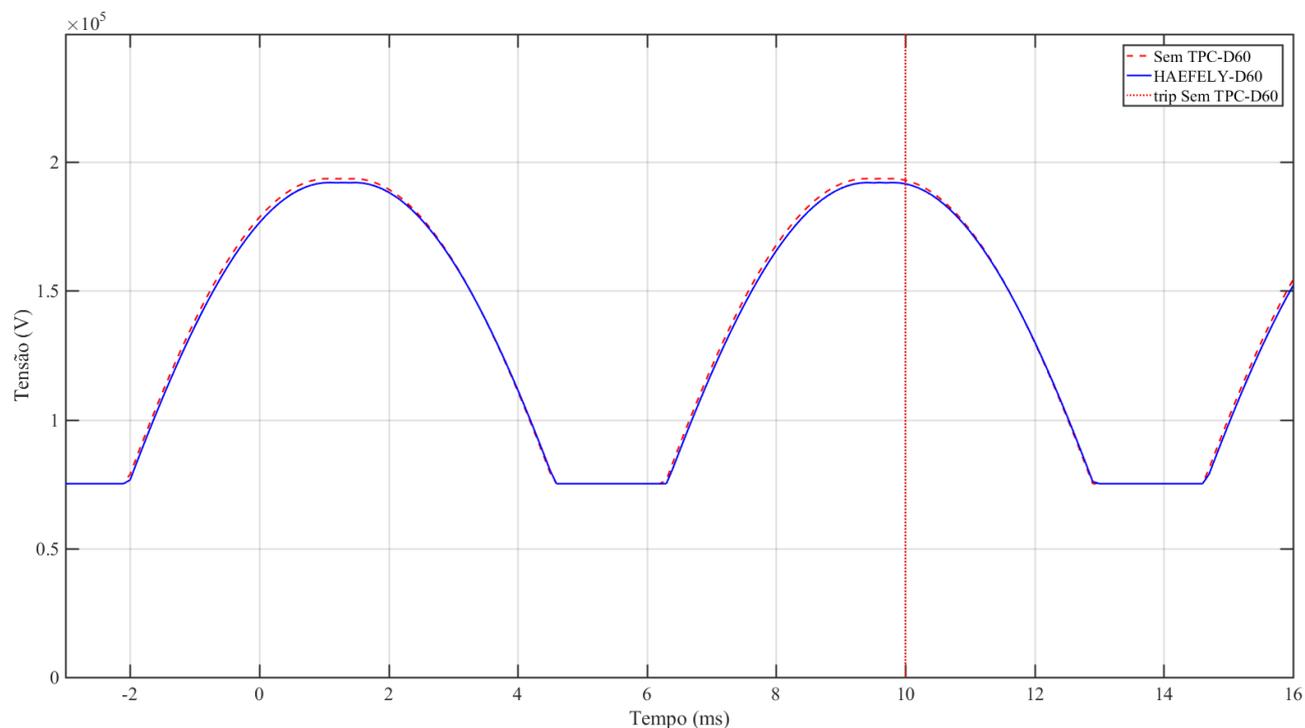
Fonte: Autoria própria.

o maior sinal dentro do intervalo. A Figura 5.58 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2, onde nota-se que a tensão de restrição para o ensaio com tensões primárias é superior à tensão de restrição quando do uso do TPC HAEFELY, conforme já visto na Figura 5.54.

Na Figura 5.59 é apresentada uma comparação da diferença dos módulos da tensão de operação e restrição para uma falta em 60% da LT e SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0. Nota-se que no intervalo destacado a tensão de restrição é maior para o caso com uso de tensões primárias, já a tensão de operação apresenta variação em relação ao maior valor, porém no momento da atuação o valor da tensão de operação é maior para o caso com uso de tensões primárias. Desta forma, a lógica da função TD21 pode ter sido sensibilizada somente para o caso do ensaio com uso de tensões primárias, tornando o ensaio com uso de tensões provenientes do TPC HAEFELY subalcançado.

Dos resultados obtidos, verifica-se que em somente um caso foi verificado o subalcançe para uso das tensões do TPC HAEFELY. Para a comparação apresentada, nota-se que a diferença

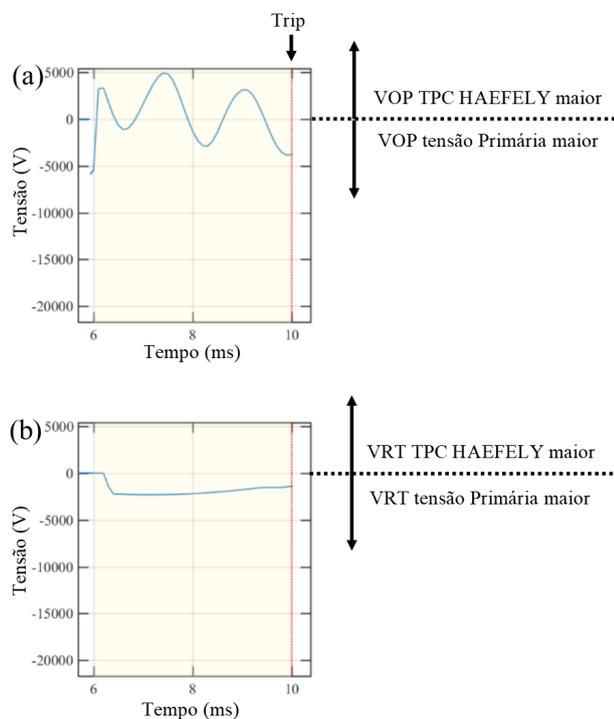
Figura 5.58. Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0, respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

na tensão de operação deve ser o motivo da diferença nas atuações, sendo portanto oriunda dos valores de pós-falta e mostrando que a resposta transitória do TPC pode ter ocasionado em um evento de subalcançe. Vale destacar que a diferença de alcance apresentada foi de 5%, que é o passo de cálculo da simulação, sendo portanto possível que a diferença de alcance seja de 1% ou de 9%, devido aos passos discretos de faltas simuladas.

Figura 5.59. Comparação para uma falta em 60% da linha e um *SIR* das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 2,0, respectivamente: (a) Diferença entre a tensão de operação para o caso HAEFELY e sem TPC; (b) Diferença entre a tensão de restrição para o caso HAEFELY e sem TPC.



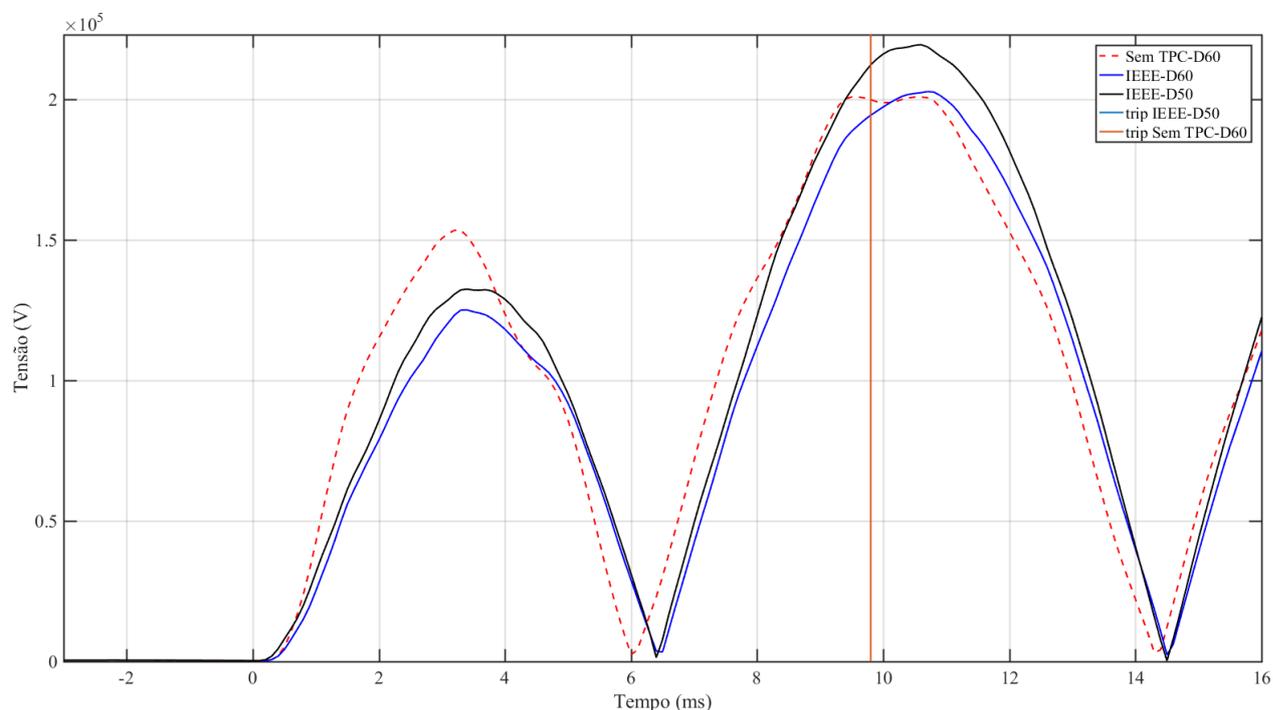
Fonte: Autoria própria.

5.4.1.6 Sublance Devido às Tensões do TPC IEEE

Conforme verificado na Figura 5.45 o relé T400L subalcançou, quando comparado ao valor esperado, para os casos onde a tensão utilizada no ensaio foi proveniente do TPC IEEE. Somente para o ensaio com *SIR* das fontes 1 e 2 iguais à 0,1 e 0,5, e o ensaio com *SIR* das fontes 1 e 2 iguais à 0,1 e 1,0, não foi verificado sublance. Dos ensaios realizados, 3 casos subalcançaram em 5%, 8 casos em 10%, 5 casos em 15%, 4 casos em 20%, 2 casos em 25% e 1 caso subalcançou em 30%. Na Figura 5.60 é apresentada a tensão de operação para 3 casos diferentes, o primeiro para um ensaio com uso de tensões primárias e falta em 60% da LT, o segundo e terceiro utilizando tensões provenientes do TPC IEEE para faltas em 60% e 50% da LT. Todos os casos apresentados possuem *SIR* das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.

Nota-se na Figura 5.60 uma característica diferente do verificado nos casos anteriores, onde eram utilizadas as tensões provenientes dos TPC TRENCH e HAEFELY. Pode-se verificar que a tensão de operação dos ensaios com tensão do TPC IEEE apresenta uma diferença

Figura 5.60. Comparação entre as tensões de operação para um *SIR* da fonte 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.

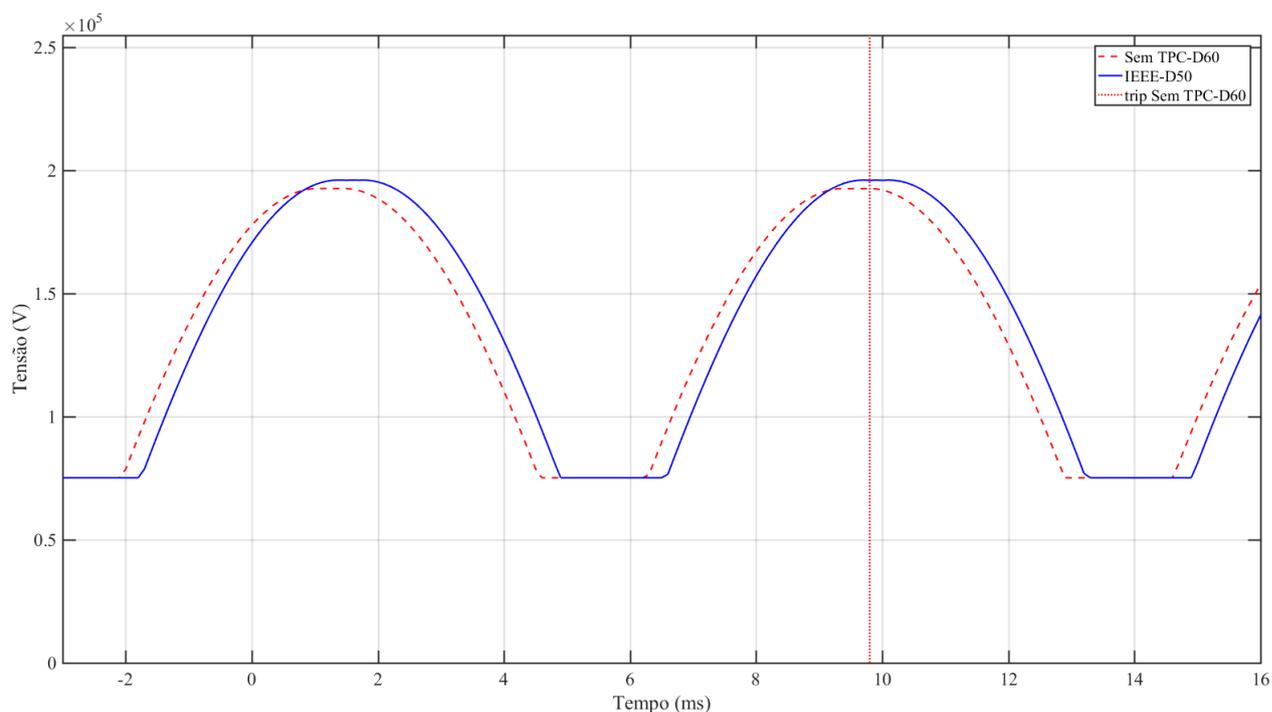


Fonte: Autoria própria.

de fase significativa em relação à tensão de operação com uso de valores primários. Esta característica pode ser explicado pela resposta em frequência do TPC IEEE apresentada na Figura 4.14, onde os sinais de alta frequência, pós-falha, apresentam atenuação e defasagem. Já a Figura 5.61 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2, onde também nota-se uma defasagem considerável entre as tensões de restrição para os ensaios com tensão primária e do TPC IEEE. Desta forma, não é possível comparar de forma adequada a atuação dos casos apresentados, pois para cada caso a comparação entre a tensão de operação e restrição é diferente no tempo, e não somente na amplitude. Para os casos que utilizaram tensão secundária dos TPC TRENCH e HAEFELY, verifica-se que as maiores diferenças apresentadas na tensão de operação e restrição são de amplitude, sendo pouco perceptíveis as diferenças de fase, conforme pôde ser visto nas seções anteriores. Uma característica importante que deve ser observada na Figura 5.60 é o fato de após o instante da falta, após 0 ms, os valores da tensão de operação iniciam a subida ao mesmo tempo. A lógica do relé T400L utiliza um mecanismo de identificação de falta que, devido à característica apresentada anteriormente, faz com que o relé inicie a lógica de proteção no mesmo instante. A *Word Bit* que declara a existência de

falta e inicia a proteção é a FLT, que no caso de falta na fase A para Terra chama-se AGFLT. Para os casos apresentados na Figura 5.60, a Word Bit AGFLT é ativada em 0,8 ms após o início da falta. Desta forma, para o relé, o início da falta ocorre no mesmo instante para os casos com uso da tensão primária e secundária proveniente do TPC IEEE. Nota-se, também, que a atuação para o caso de falta em 50% da LT com uso de tensão do TPC IEEE ocorre 9,8 ms após a falta, e em todos os ensaios realizados não foram verificados tempos de atuação superiores a 10,1 ms, podendo assim, inferir que a lógica da função TD21 sendo satisfeita para os casos de falta superiores a 50% da LT. Assim, o tempo de atuação excederia o valor limite de atuação verificado nos ensaios, sendo esta atuação bloqueada.

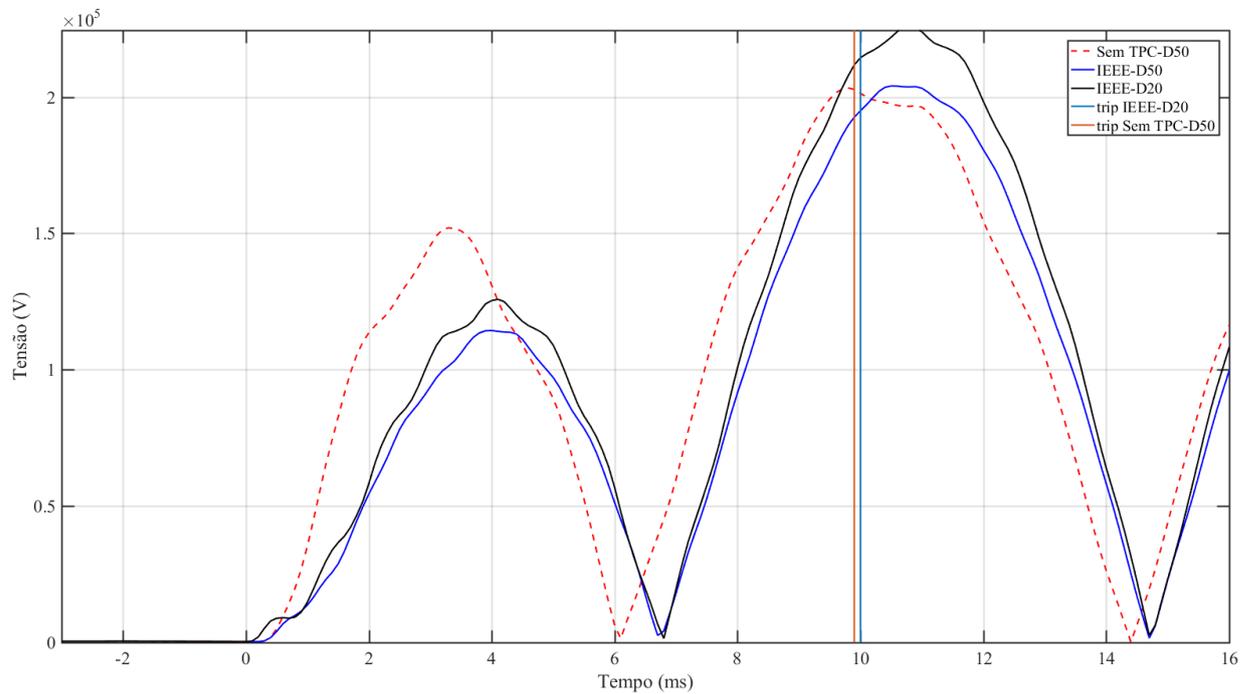
Figura 5.61. Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um *SIR* das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

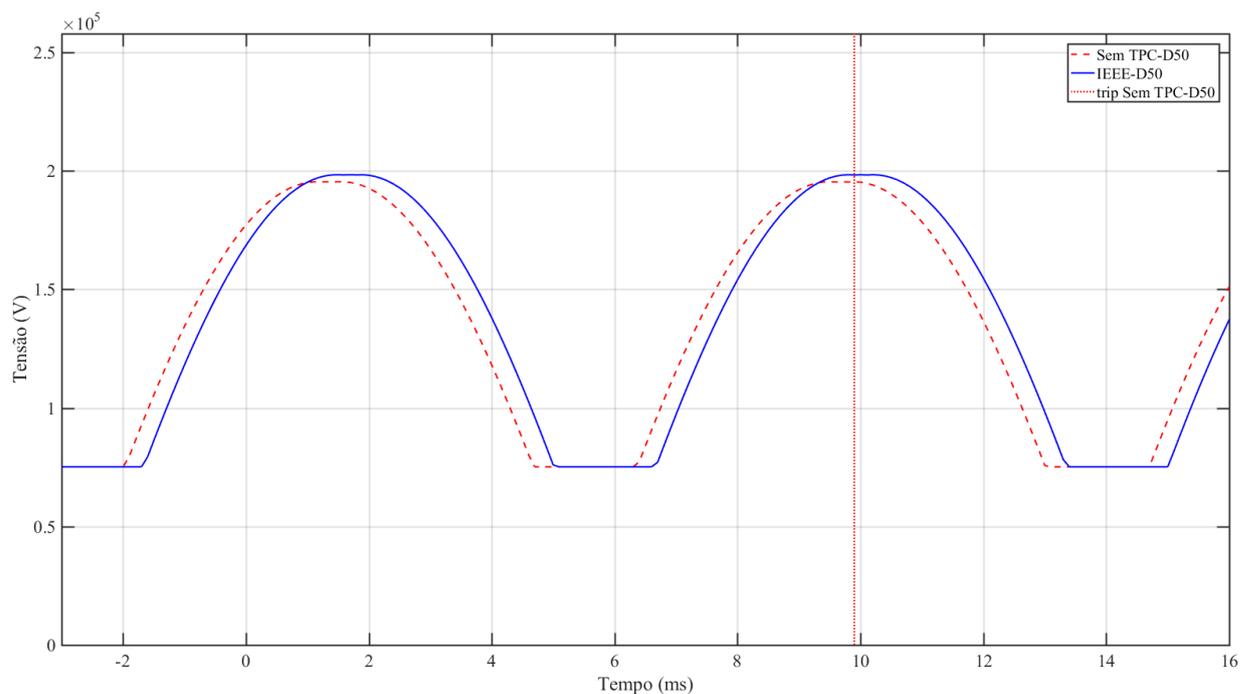
As Figuras 5.62 e 5.63 apresentam os resultados obtidos para outro evento de subalcançe verificado. Os resultados verificados levam às mesmas conclusões apresentadas anteriormente.

Figura 5.62. Comparação entre as tensões de operação para um *SIR* das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.63. Comparação entre a tensão de restrição estimada para uma falta em 60% da linha e um *SIR* das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,1, respectivamente.

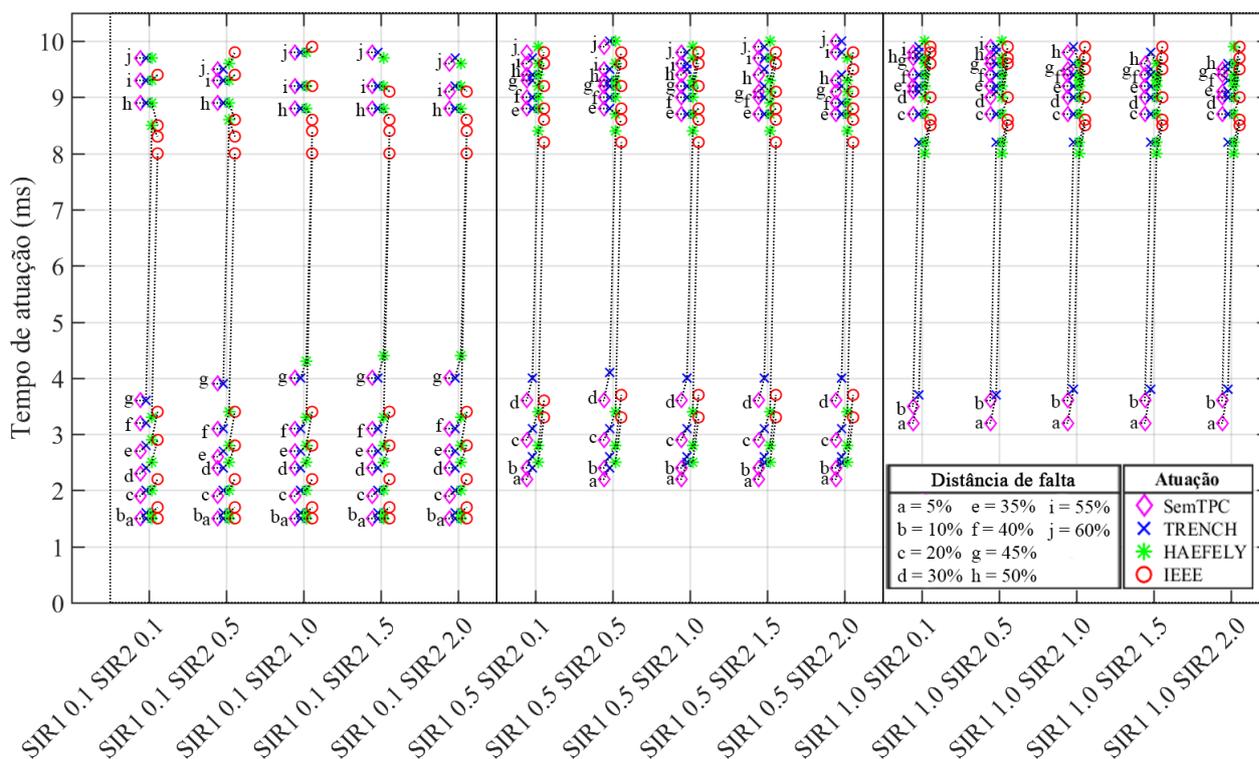


Fonte: Autoria própria.

5.4.1.7 Tempo de Atuação da Função TD21

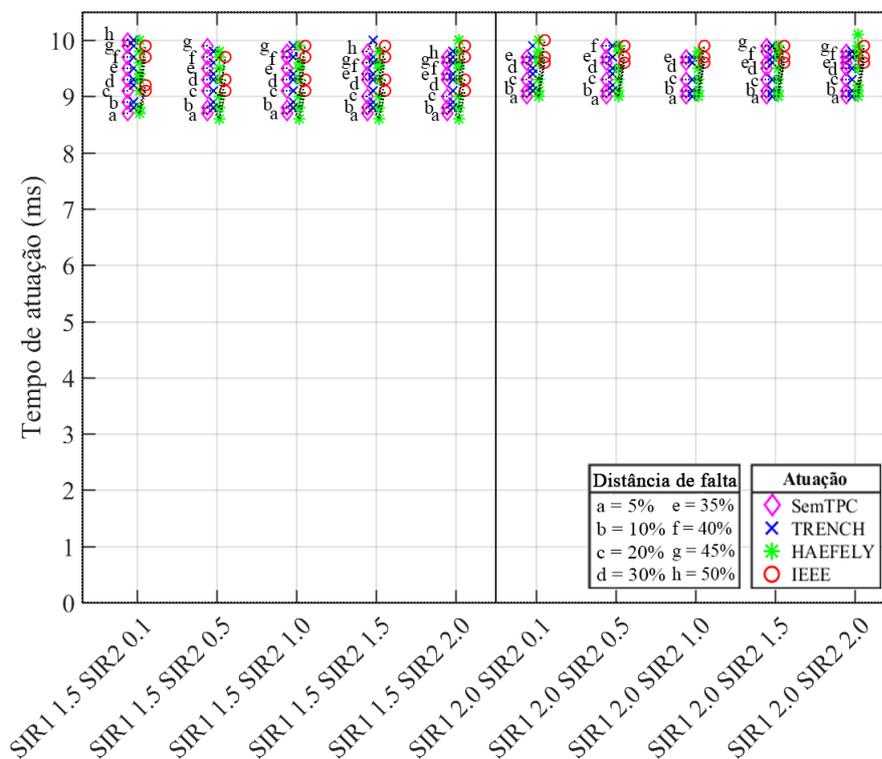
As Figuras 5.64 e 5.65 apresentam os tempos de atuação da função TD21 para cada ensaio simulado, levando em consideração os resultados obtidos utilizando como tensão de entrada valores primários e secundários provenientes dos TPC estudados. Novamente, pode-se dividir as Figuras 5.64 e 5.65 em blocos, nos quais são mantidos fixos os valores de SIR_1 em cada um.

Figura 5.64. Tempos de atuação para diferentes valores de SIR .



Fonte: Autoria própria.

Baseando-se nos resultados apresentados nas Figuras 5.64 e 5.65, observa-se que o ensaio com tempo de atuação mais elevado foi para uma falta em 55% da linha e SIR das fontes 1 e 2 iguais a 2,0, para o ensaio com tensão do TPC HAEFELY, ocorrendo em 10,1 ms. O menor tempo de atuação obtido foi de 1,5 ms para o caso de SIR_1 e 2 de 0,1, quando a tensão primária foi a utilizada e a falta ocorreu em 5% da linha. Também, é possível notar que os tempos de atuação para os casos de falta mais próximos ao ponto de medição apresentam incremento conforme se aumenta o valor do SIR da fonte 1, até o momento em que as atuações para os casos de SIR_1 iguais à 1,5 e 2,0, possuem tempo de atuação inicial superior a 8,5 ms. A Figura 5.66 apresenta a tensão de operação para uma falta em 5% da linha para casos com

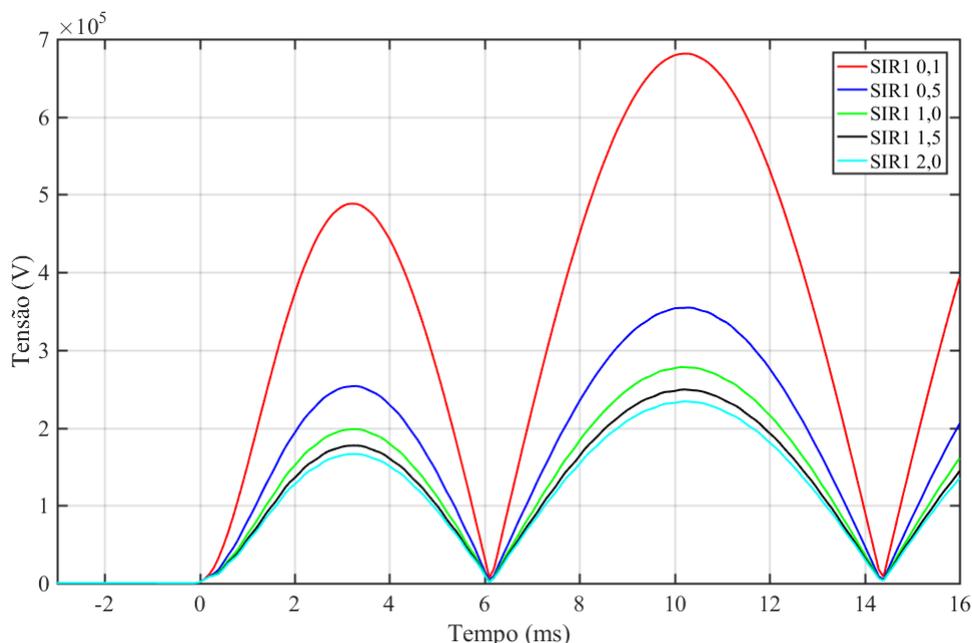
Figura 5.65. Tempos de atuação para diferentes valores de *SIR*.

Fonte: Autoria própria.

SIR da fonte 1 de 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 e mantido fixo o SIR da fonte 2, igual à 0,1, com sinais de tensão provenientes do primário dos TPC. Desta Figura, pode-se afirmar que o valor da tensão de operação diminui conforme se aumenta o valor do SIR da fonte 1, e que o valor máximo do primeiro lóbulo, entre 0 e 6 ms, é menor que o valor máximo apresentado no segundo lóbulo, entre 6 e 14 ms. Sendo assim, considerando que para os casos apresentados a tensão de restrição é igual, pode-se inferir que para o primeiro lóbulo os valores da tensão de operação somente são capazes de sensibilizar a função TD21 quando o SIR da fonte 1 é menor ou igual à 1. Mesmo nesses casos, somente dois eventos de atuação são observados, quando a tensão primária é usada. Para ensaios com tensões provenientes dos TPC, somente no caso de uso de tensão proveniente do TPC TRENCH é observada atuação durante o primeiro lóbulo. Vale destacar que o TPC TRENCH apresenta os sinais com maior similaridade à tensão primária. Outra importante constatação é do tempo máximo de atuação observado não ser maior que 10,1 ms após a falta, mostrando que a função não atua para tempos superiores a este, conforme discutido anteriormente. De acordo com o observado na Figura 5.45, o alcance da função TD21 diminui conforme se incrementa o valor do SIR_1 , corroborando com o aumento no tempo inicial

de atuação e no bloqueio de atuação para tempos superiores à 10,1 ms após o início da falta.

Figura 5.66. Tensões de operação para diferentes valores de SIR_1 .

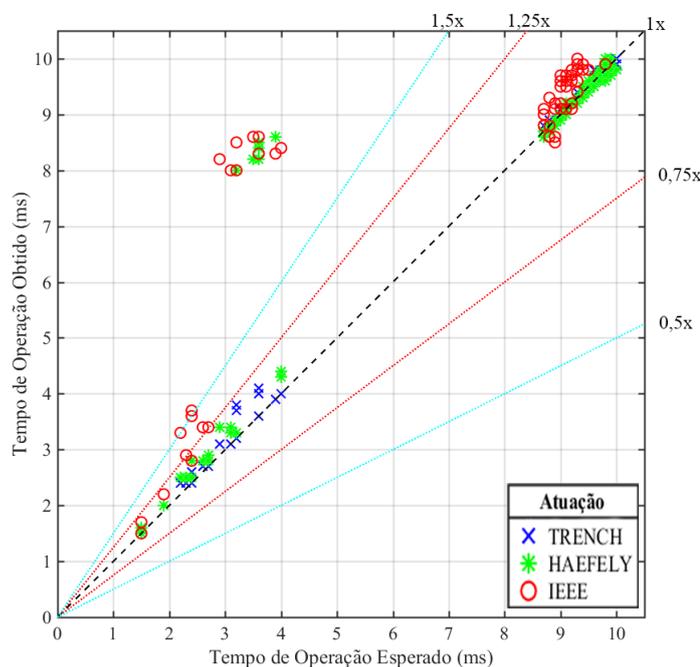


Fonte: Autoria própria.

Outra característica interessante observada nas Figuras 5.64 e 5.65 é a existência de um intervalo de tempo onde não ocorrem atuações, entre cerca de 4,5 e 8 ms. Observando a tensão de restrição apresentada na Figura 5.63 nota-se que existe uma região de corte que não permite que essa tensão chegue ao valor zero. Dessa forma, existe uma região onde a tensão de operação não é capaz de superar a tensão de restrição, quando se aproxima do cruzamento pelo zero. Por este motivo existe uma região onde não ocorrem eventos de atuação, sendo necessário que a tensão de operação alcance o valor limite mínimo da tensão de restrição para que o relé atue. Nota-se da Figura 5.66 que entre 4,5 e 8 ms, a tensão de operação está em seu período de decaimento e posterior crescimento, passando pelo zero neste intervalo.

A Figura 5.67 apresenta a comparação entre os tempos de atuação da função TD21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão primária, considerados "valores esperados", e no eixo Y, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão secundária dos TPC, considerados "valores obtidos". Esta figura permite comparar os tempos de atuação, verificando se os valores obtidos apresentam diferenças em relação aos valores esperados. As linhas auxiliares ajudam a mostrar quantas vezes o valor obtido foi maior, menor, ou ainda igual, ao tempo esperado.

Figura 5.67. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de *SIR*.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que o TPC IEEE apresentou os resultados mais discrepantes. Nota-se também, que alguns casos provenientes do TPC HAEFELY e IEEE apresentaram uma diferença muito grande em relação ao tempo esperado de atuação, com casos atuando entre 8 e 9 ms sendo que era esperado um tempo de atuação entre 3 e 4 ms. Baseado na região onde são obtidas as maiores diferenças entre o tempo de atuação, da Figura 5.67 e observando as Figuras 5.64 e 5.65, pode-se inferir que estes casos estão separados pela região onde não ocorrem atuações, ou seja, o ensaio com uso da tensão primária atua no primeiro lóbulo da tensão de operação e o ensaio com uso da tensão proveniente do secundário do TPC atua somente no segundo lóbulo da tensão de operação. Para os demais casos, verifica-se que grande parte deles apresentam tempos de atuação de até 1,25 vezes superior aos esperados, exceto por três casos do TPC IEEE que estão na ordem de 1,5 vezes de incremento no tempo de atuação.

5.4.2 Resultados 411L

Conforme apresentado anteriormente, as simulações realizadas e ensaiadas com o relé 411L utilizaram a reprodução dos sinais de tensão e corrente por meio da mala de teste Doble F6150sv,

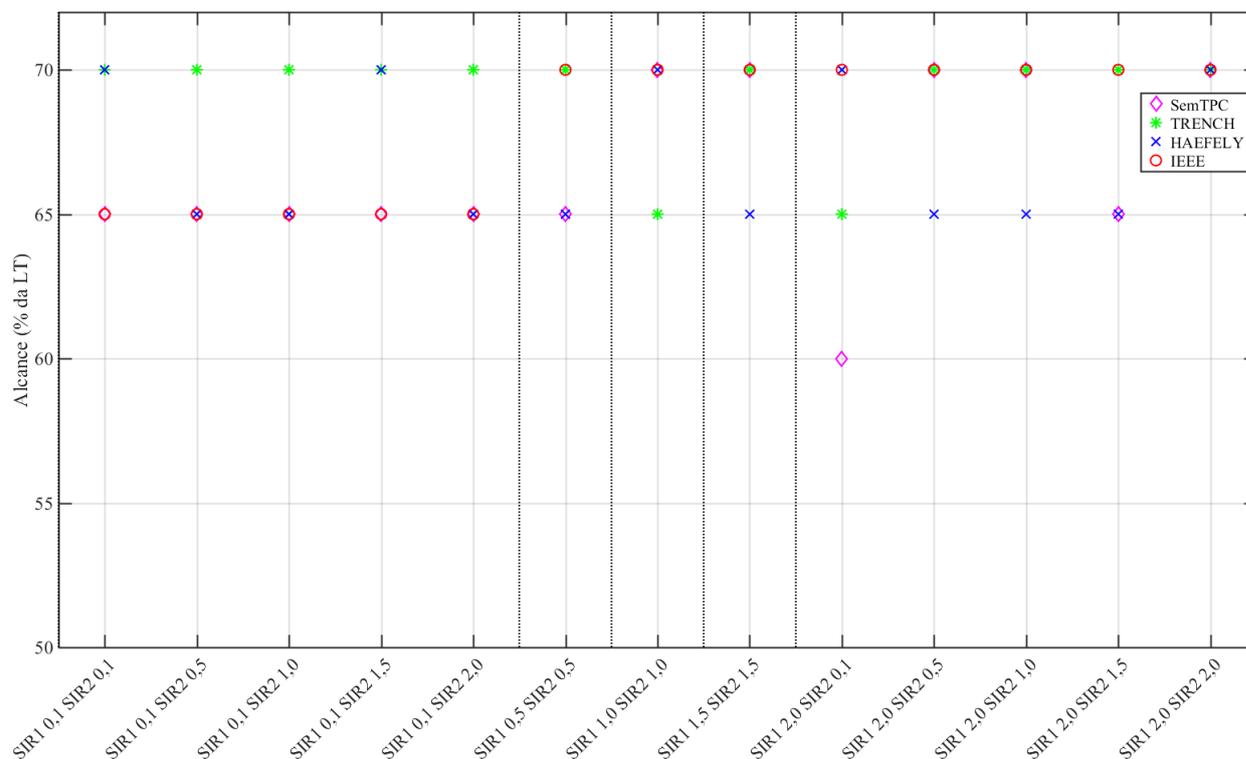
conforme descrito na seção 5.1. Dessa forma, foram coletados os resultados utilizando como valores de entrada a tensão considerando o valor primário e os valores secundários provenientes dos modelos digitais dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, apresentados no capítulo 4.

Conforme apresentado na seção 5.1, no relé 411L não foram realizados todos os ensaios executados no relé T400L. Foram escolhidos os casos julgados mais significativos e então realizados os ensaios. Dessa forma, foram realizados ensaios para um SIR da fonte 1 igual à 0,1 com o SIR da fonte 2 igual à 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0, um SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,5, e também iguais à 1,0 e 1,5. Por fim, foram realizados ensaios com o SIR da fonte 1 igual à 2,0 e SIR da fonte 2 igual à 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0.

5.4.2.1 Alcance da Função PH21

Com base nos resultados de atuação do relé 411L foram encontrados o alcance máximo obtido para os ensaios utilizando os valores de tensão como entrada, conforme apresentado na Figura 5.68. Neste trabalho, os valores obtidos dos ensaios com a tensão primária são considerados o valor esperado, sendo este o padrão de comparação.

Verifica-se na Figura 5.68 que o alcance não é afetado de forma significativa, variando entre 70 e 65%, exceto para um caso com SIR_1 igual à 2,0 e SIR_2 igual à 0,1 onde o alcance foi de 60%. Nota-se também que quando comparado o alcance utilizando a tensão primária como valor padrão e as tensões provenientes dos TPC, ocorreu sobrealcance quando do uso da tensão do TPC HAEFELY para todos os casos onde o SIR da fonte 1 é igual à 0,1. Também, foi verificado sobrealcance quando do uso da tensão do TPC HAEFELY e IEEE para o caso com SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,5 e 0,5, 2,0 e 0,1 e 2,0 e 1,5. Para o TPC TRENCH também foi verificado sobrealcance para SIR das fontes 1 e 2 iguais à 0,1 e 0,1, e 0,1 e 1,5. De outra forma, ocorreram subalcance quando do uso das tensões do TPC TRENCH para SIR das fontes 1 e 2 iguais à 1,5 e 1,5, 2,0 e 0,5, e 2,0 e 1,0, e quando do uso das tensões do TPC HAEFELY para SIR das fontes 1 e 2 iguais à 1,0 e 1,0. Do total de 13 cenários simulados, foram verificados sobrealcance em 2 eventos para o TPC TRENCH, 7 eventos para o TPC HAEFELY e 3 para o TPC IEEE. Ademais, foram verificados subalcances em três eventos para o TPC TRENCH e em um evento para o TPC HAEFELY. Desta forma, o uso das tensões secundárias ocasionaram diversos

Figura 5.68. Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.

Fonte: Autoria própria.

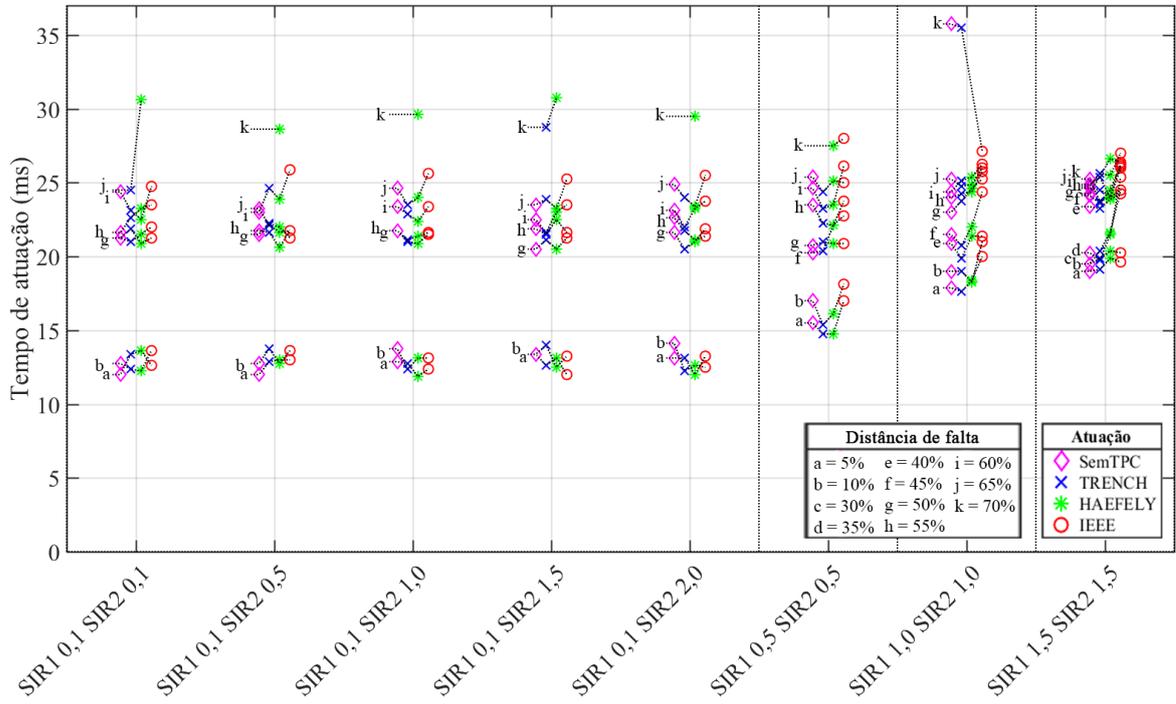
eventos de sobre e subalcançe, mostrando que as mesmas possuem influência na resposta da função PH21.

5.4.2.2 Tempo de Atuação da Função PH21

As Figuras 5.69 e 5.70 apresentam os tempos de atuação da função PH21 para cada ensaio simulado, levando em consideração os resultados obtidos utilizando como tensão de entrada valores primários e secundários provenientes dos TPC estudados.

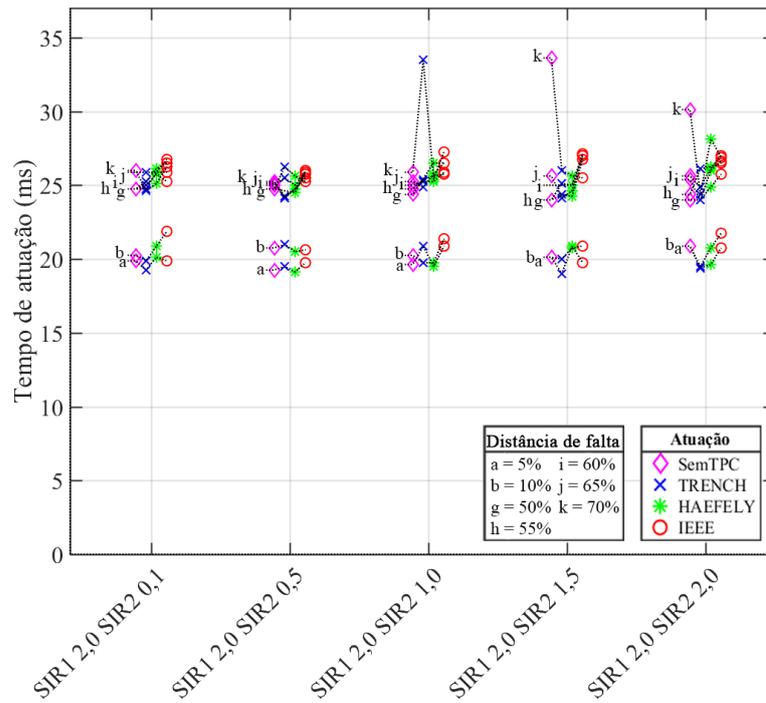
Nota-se das Figuras 5.69 e 5.70 que de forma geral, para menores valores de SIR da fonte 1 é verificado que a atuação ocorre de forma mais rápida. Verifica-se que para condições de SIR da fonte 1 igual à 0,1 os tempos de atuação para faltas em 5% da LT são da ordem de 12 ms para um SIR_1 de 0,1, 15 ms para um SIR_1 de 0,5, 18 ms para um SIR_1 de 1, chegando a 20 ms para um SIR_1 igual a 2,0. Novamente, destaca-se que existe um intervalo de tempo onde não se observam atuações. Diferentemente dos casos apresentados para a função TD21, neste caso não foram realizadas as simulações em todos os pontos de falta utilizados anteriormente. Outro

Figura 5.69. Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.70. Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.

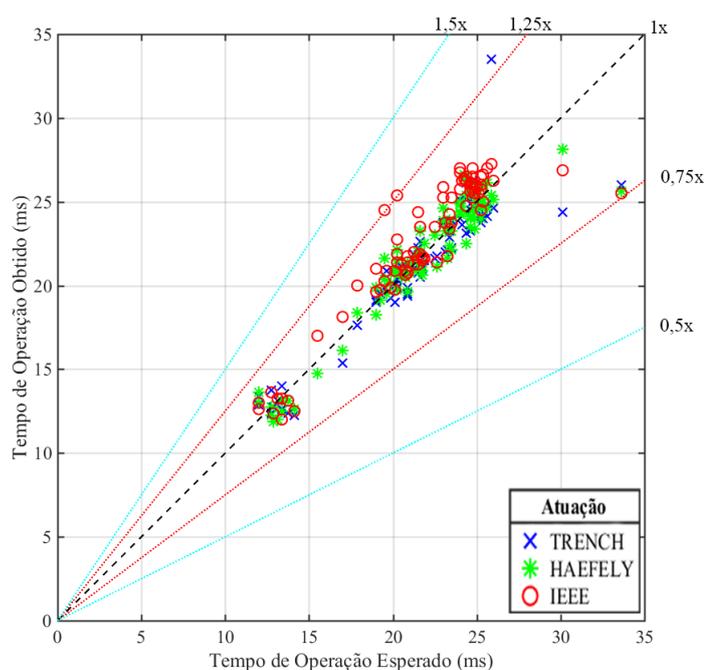


Fonte: Autoria própria.

ponto interessante é que as atuações para o alcance máximo ocorrem em tempos geralmente inferiores à 28 ms.

A Figura 5.71 apresenta a comparação entre o tempo de atuação da função PH21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão primária, considerado "valores esperados", e no eixo Y, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão secundária dos TPC, considerados "valores obtidos". Esta Figura permite comparar os tempos de atuação, verificando se os valores obtidos apresentam diferenças em relação aos valores esperados. As linhas auxiliares ajudam a mostrar quantas vezes o valor obtido foi maior, menor, ou ainda igual, ao tempo esperado.

Figura 5.71. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que os tempos de atuação referentes aos ensaios com uso de TPC não possuem uma característica ordenada. Desta forma, nota-se que existem atuações mais rápidas e mais lentas que o "esperado". Porém, os valores obtidos apresentam diferenças da ordem de 0,25 vezes superior ou inferior aos casos esperados, exceto por 2 casos do TPC IEEE e 1 caso do TPC TRENCH.

5.5 VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

O instante que uma determinada falta ocorre no sistema produz efeitos diretos na corrente de falta, devido à característica que o sistema elétrico possui. Quando uma falta ocorre, o circuito de falta é composto pela impedância da fonte e a impedância da linha. Até o ponto de falta, geralmente estas impedâncias são predominantemente reativas, com corrente de falta predominantemente indutiva. Devido a este fato, a depender do momento da ocorrência da falta, a corrente de falta pode apresentar uma componente contínua decrescente que reduz exponencialmente com o tempo até se tornar nula. Assim, o instante da falta pode ser caracterizado como o ângulo de incidência do evento, sendo interessante avaliar a resposta transitória dos TPC sobre as funções de proteção em diferentes cenários avaliados.

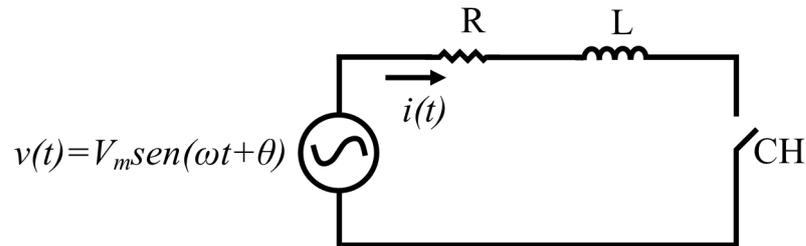
Neste trabalho, o ângulo de incidência da falta é medido na fase A da tensão no ponto de falta, ou seja, quando da ocorrência da falta, o ângulo da fase A da tensão no ponto de falta será igual ao ângulo de incidência utilizado na simulação do curto. Para os ensaios apresentados nesta seção foi utilizado o sistema apresentado na Figura 5.1, realizando curto-circuitos na fase A, um carregamento com abertura angular entre as barras Local e Remota de 5° , um SIR de 0,1 para ambas as fontes e uma resistência de falta de 0Ω . Então, foi realizada a variação do ângulo de incidência da falta entre os valores de 0° e 345° , com incrementos de 15° entre cada evento. Para todos os casos foi realizada a variação do local de falta ao longo da LT, totalizando 24 cenários de simulação e 360 casos simulados para cada tipo de TPC utilizado além dos casos ensaiados com tensão primária.

Na Figura 5.72 é apresentado um circuito RL com uma chave CH aberta, representando uma LT sujeita a um curto-circuito. O circuito apresentado pode ser utilizado para o entendimento da característica da corrente $i(t)$ para diferentes instantes de fechamento da chave CH. Pode-se fazer uma relação entre o ângulo de incidência da falta e o instante de fechamento da chave CH, ou seja, o ângulo da tensão no instante de fechamento da chave é o valor do ângulo de incidência da falta.

Observando a Figura 5.72 pode-se escrever a corrente do circuito como:

$$v = V_m \text{sen}(\omega t + \theta) = iR + L \frac{di}{dt} \quad (5.16)$$

Figura 5.72. Circuito RL.



Fonte: Autoria própria.

Resolvendo a equação diferencial para i e considerando que $X_L = \omega L$, tem-se:

$$v = \frac{V_m}{Z} \text{sen}(\omega t + \theta - \tan^{-1} \frac{X_L}{R}) - \frac{V_m}{Z} \text{sen}(\theta - \tan^{-1} \frac{X_L}{R}) e^{-\frac{tR}{L}} \quad (5.17)$$

onde $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$.

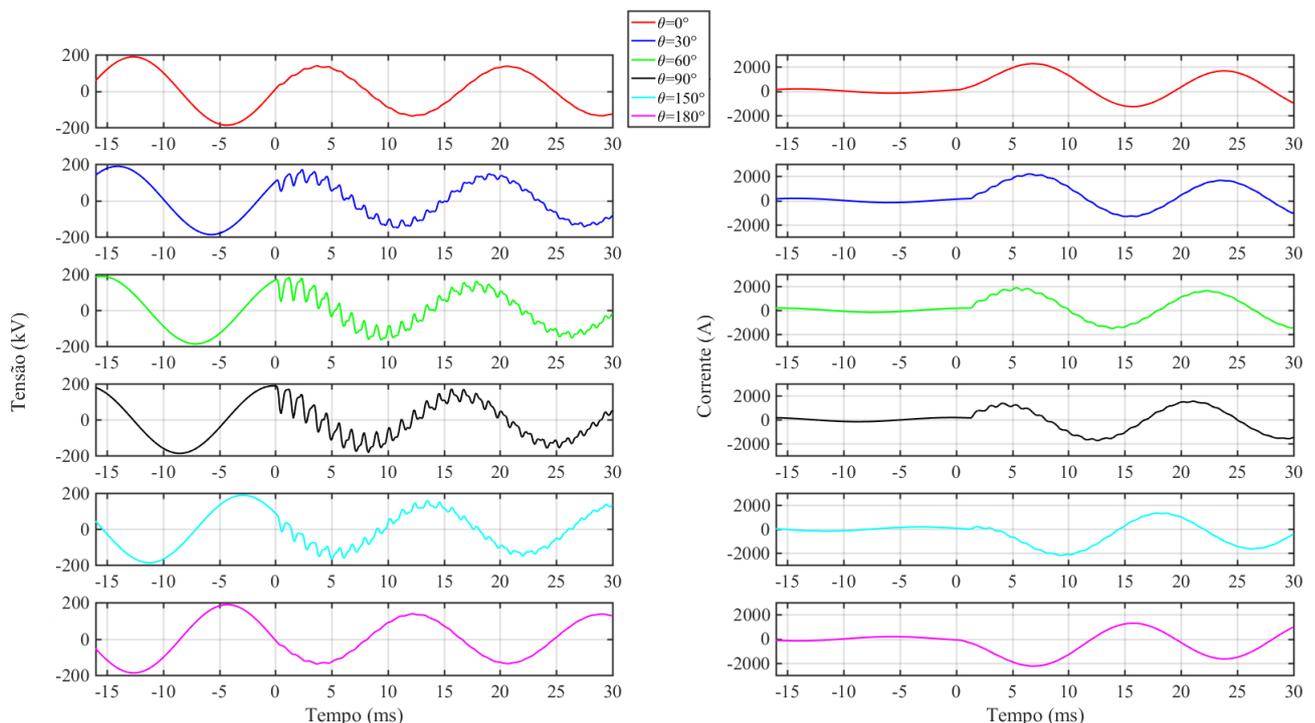
A primeira parcela de (5.17) corresponde à resposta do circuito devido a tensão de entrada, chamada de parcela *ac*. Já a segunda parcela diz respeito às condições iniciais, que dependem do instante em que a chave CH é fechada, chamada de parcela *dc*. A magnitude da parcela *dc* depende do ângulo de incidência da falta, variando de 0, quando $\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$, até o valor máximo, quando $\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} \pm \frac{\pi}{2}$. Desta forma, a depender do instante da falta pode-se exigir uma mudança instantânea elevada na amplitude da corrente. Para prover essa mudança instantânea no sinal da corrente, surge uma corrente aperiódica decrescente, ou parcela *dc*. Sabendo que as linhas de transmissão apresentam um valor de X_L muito maior que R , o valor de $\tan^{-1} \frac{X_L}{R}$ é aproximadamente igual a 90° , e o menor valor de corrente *dc* irá surgir quando o valor de θ for igual a 90° , além de seus múltiplos, e o maior valor *dc* quando o valor de θ for igual a 0° e seus múltiplos.

Outra característica importante em relação ao ângulo de incidência da falta é a quantidade de transitórios que os sinais apresentam. Considerando que os sistemas elétricos possuem elementos resistivos, indutivos e também capacitivos, a interação entre estes elementos e a mudança abrupta da tensão e corrente, ocasionam reações que respondem a estes eventos. Considerando uma falta sólida, para o caso do ângulo de incidência da falta ocorrer em 90° , a tensão irá para o zero no instante da falta, e tem-se o maior degrau de tensão possível. Dessa forma, em resposta a este degrau de tensão, os elementos que constituem o sistema elétrico, apresentam interações que ocasionam nos transitórios mais acentuados. De outra

forma, caso a falta ocorra com um ângulo de incidência de 0° , não existe o degrau de tensão citado anteriormente e, a resposta do sistema não apresenta transitórios consideráveis.

A Figura 5.73 apresenta os sinais de tensão e corrente para diferentes valores de ângulo de incidência da falta, considerando uma falta em 50% da LT com sinais provenientes do primário. Conforme discutido anteriormente, nota-se da figura que os transitórios são acentuados, quanto mais próximo ao ângulo de incidência igual à 90° a falta ocorre, sendo praticamente inexistentes para faltas com ângulo de incidência iguais à 0° e 180° . Outro ponto a se observar é no valor máximo da corrente em cada intervalo de tempo, nota-se que para $\theta = 0^\circ$ o primeiro semiciclo da corrente apresenta valor absoluto maior que o segundo. Já para $\theta = 90^\circ$ verifica-se o contrário, onde o primeiro semiciclo da corrente apresenta valor absoluto menor que o segundo. Para $\theta = 150^\circ$ a corrente de falta tem início positivo, cruzando rapidamente o zero e assumindo valores negativos.

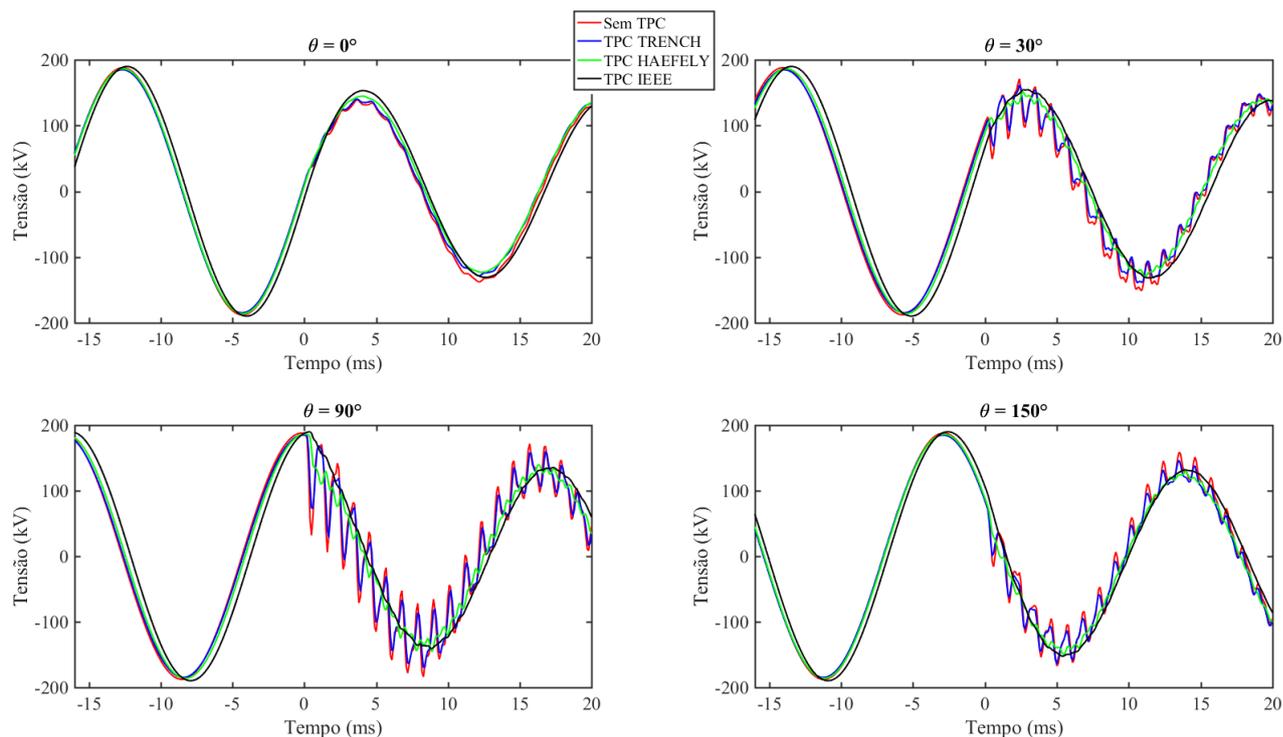
Figura 5.73. Tensões e correntes para diferentes valores de ângulo de incidência θ .



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.74 apresenta os sinais de tensão obtidos do primário e do secundário dos diversos TPC estudados. Da figura observa-se que o sinal de tensão secundária que mais se aproxima do valor primário é do TPC TRENCH, apresentando pequenas atenuações. Já o TPC HAEFELY

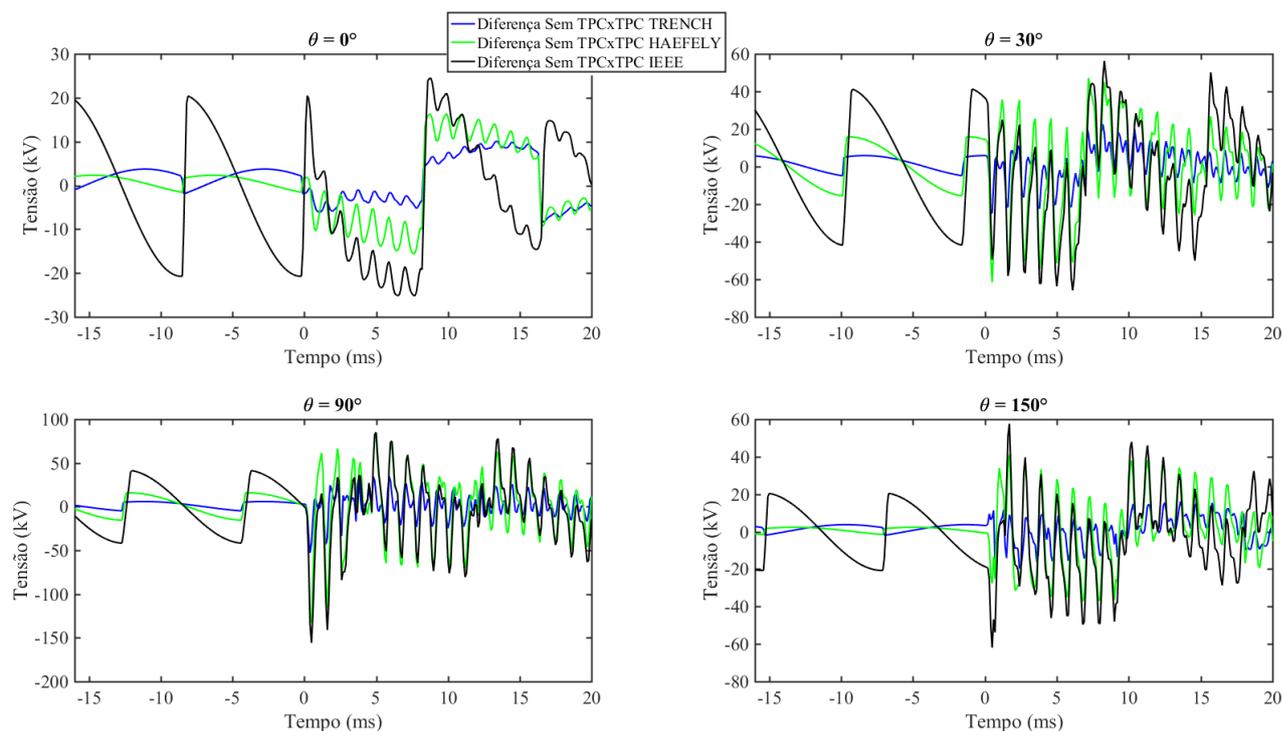
Figura 5.74. Comparação das tensões utilizadas nos ensaios para diferentes valores de ângulo de incidência θ .



Fonte: Autoria própria.

apresenta um sinal de tensão com significativas diferenças em relação à tensão primária. Por fim, o TPC IEEE é o que apresenta as maiores diferenças em relação à tensão primária, com atenuação de praticamente todo o transitório visto de forma mais clara no caso com $\theta = 90^\circ$. Nota-se, também, que existe defasagem e diferença de amplitude da tensão secundária dos TPC em relação a tensão primária, sendo que o TPC IEEE apresenta os resultados mais discrepantes.

A Figura 5.75 apresenta a diferença entre os módulos das tensões provenientes do primário e secundário dos diversos TPC. Verifica-se que após a falta as diferenças são significativas, sendo o pior caso para o TPC IEEE. Diferenças também podem ser vistas na tensão de pré-falta, que para o caso de $\theta = 0^\circ$ apresenta a mesma ordem de grandeza das diferenças pós-falta. Estas diferenças impactam na tensão de restrição da função TD21 e no valor mho medido pela função PH21.

Figura 5.75. Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.74.

Fonte: Autoria própria.

5.5.1 Resultados T400L

Os resultados dos ensaios utilizando o relé T400L foram obtidos conforme já apresentado nas seções anteriores. Sendo realizada nesta subseção a análise dos resultados obtidos para os ensaios considerando a variação do ângulo de incidência da falta.

5.5.1.1 Alcance da Função TD21

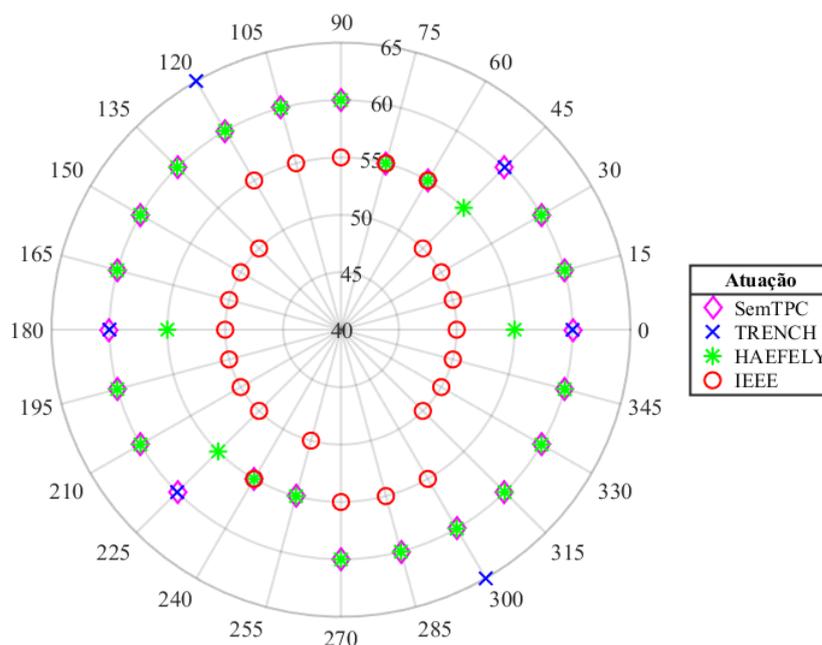
Com base nos resultados de atuação do relé T400L foram encontrados o alcance máximo obtido para os ensaios utilizando os valores de tensão como entrada, conforme apresentado na Figura 5.76.

Nota-se que os eventos que utilizaram a tensão do TPC IEEE só não subalcançaram em três casos, sem contudo sobrealcançar em qualquer evento. Os eventos que utilizaram a tensão do TPC HAEFELY não sobrealcançaram em nenhum evento, porém ocorreram quatro eventos de subalcançe. Somente os eventos que utilizaram a tensão do TPC TRENCH sobrealcançaram, em dois casos, sem subalcançar em nenhum evento.

Pode-se verificar que os alcances são iguais quando observados os quadrantes do ciclo trigonométrico, ou seja, os eventos presentes no primeiro quadrante do ciclo trigonométrico apresentam resultados iguais aos eventos presentes no terceiro quadrante e, os eventos do segundo quadrante apresentam resultados iguais aos do quarto quadrante. O único caso que foge a esta característica é o obtido para $\theta = 75^\circ$ e $\theta = 225^\circ$, onde o ensaio com tensão proveniente do TPC IEEE subalcançou.

Os ensaios com tensão primária apresentaram diferença no alcance obtido somente para os casos de θ iguais à 60° , 75° , 240° e 225° , sendo este valor de apenas 5%, mostrando assim que o ângulo de incidência da falta não afeta de forma considerável no alcance da função TD21. Já comparando os resultados utilizando tensões secundárias notam-se diferenças em diversos casos, mostrando que as tensões secundárias dos TPC alteram o resultado da função TD21.

Figura 5.76. Alcance obtido para diferentes valores de ângulo de incidência.

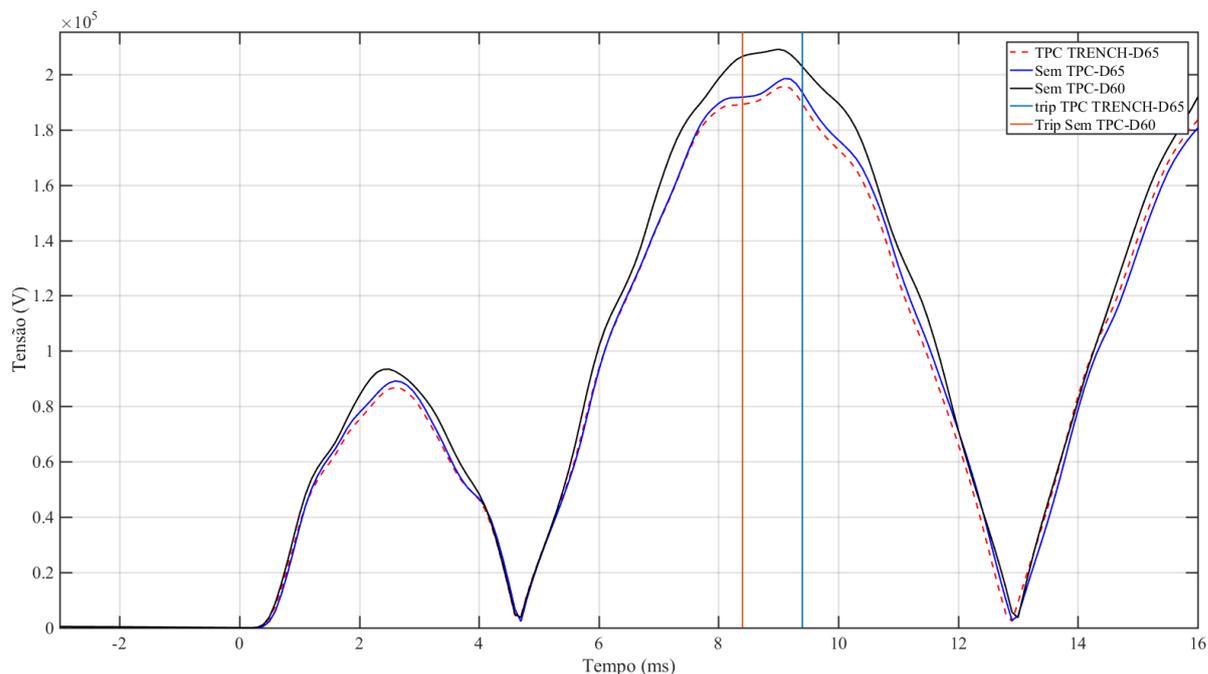


Fonte: Autoria própria.

5.5.1.2 Sobrealcance Devido às Tensões do TPC TRENCH

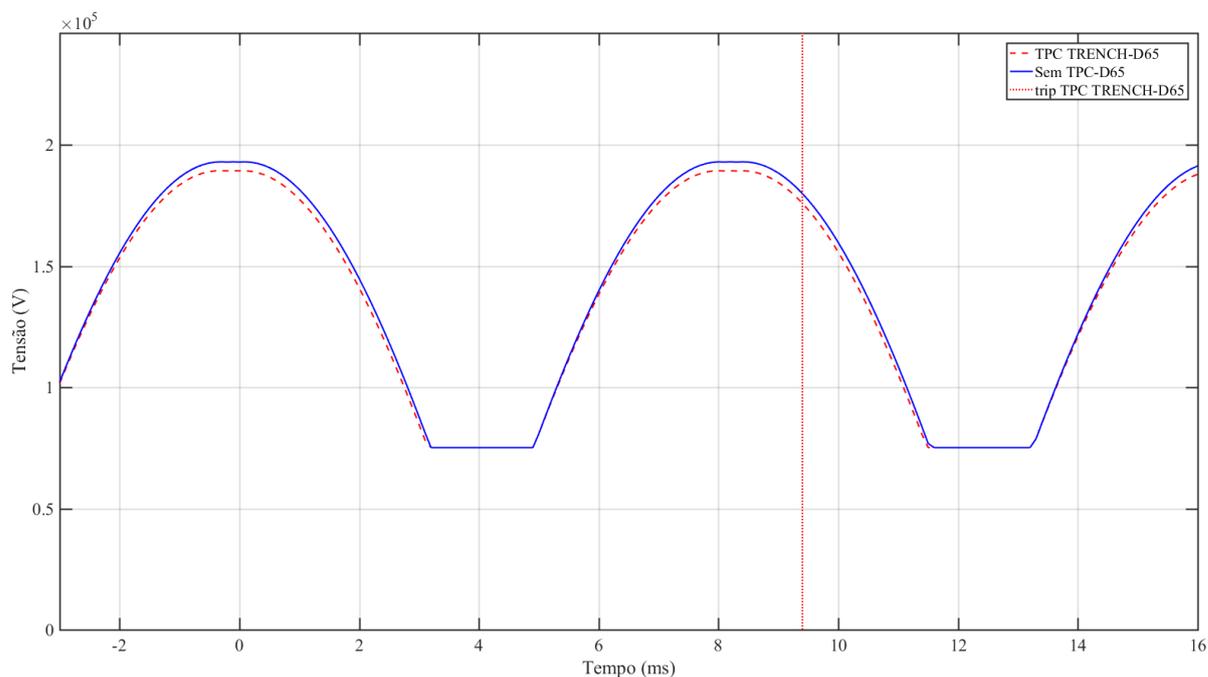
Conforme verificado na Figura 5.76, o relé T400L sobrealcançou, quando comparado ao valor esperado (tensão primária), quando utilizada a tensão proveniente do TPC TRENCH para uma falta em 65% da linha e um ângulo de incidência de 120° . A mesma característica foi verificada no respectivo ensaio do quarto quadrante, para $\theta = 300^\circ$. Na Figura 5.77 é apresentada a tensão de operação para três casos diferentes: o primeiro para um ensaio com uso de tensões provenientes do TPC TRENCH e falta em 65% da LT, o segundo e terceiro utilizando tensões primárias para faltas em 65% e 60% da LT. Todos os casos apresentados possuem ângulo de incidência da falta de 120° . Também, é ilustrado o momento da atuação da proteção em cada caso. Nota-se da figura que a tensão de operação para o caso do TPC TRENCH é inferior às demais em praticamente todo o intervalo observado. Dessa forma, esperava-se que o ensaio com tensão primária para $\theta = 120^\circ$ também atuasse.

Figura 5.77. Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 120^\circ$.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.78 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2, possibilitando uma forma de comparação desta tensão para os casos com uso de tensão primária e secundária. Nota-se que a tensão proveniente do uso do TPC TRENCH apresenta valores inferiores quando comparada com a tensão de restrição utilizando tensões primárias. Sendo

Figura 5.78. Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\theta = 120^\circ$.

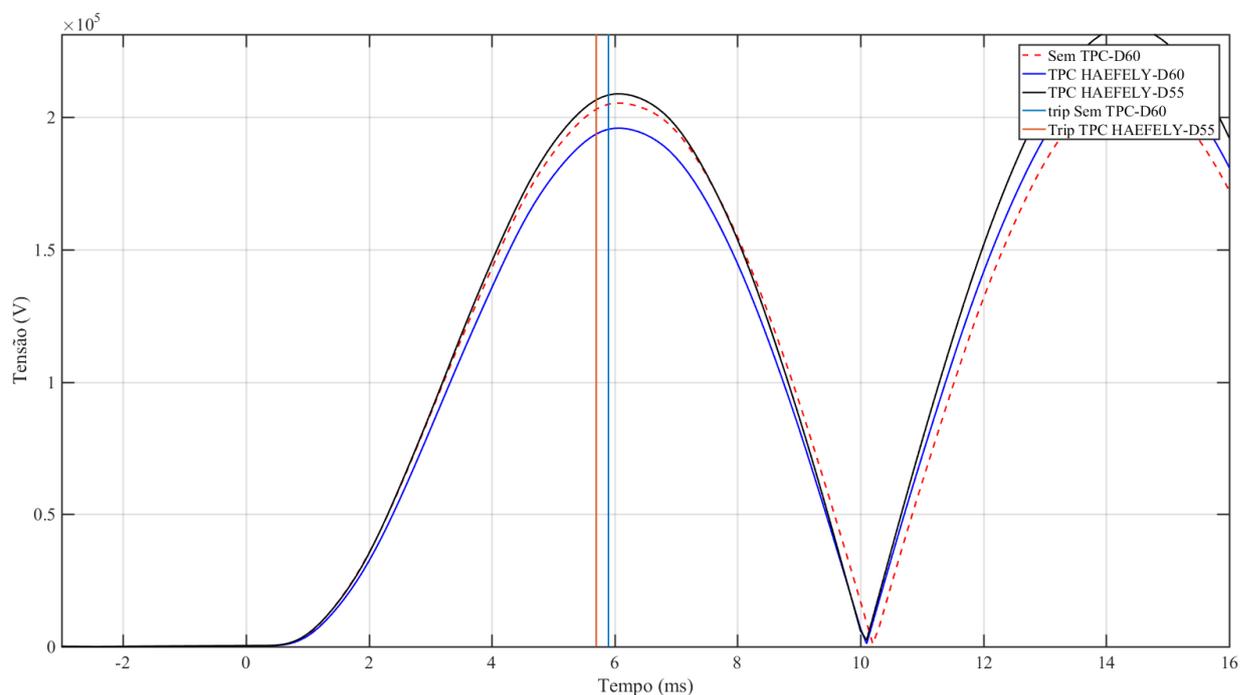
Fonte: Autoria própria.

assim, mesmo com a tensão de operação para o ensaio com tensão primária sendo superior, a tensão de restrição para este caso também se eleva, possibilitando a diferença de atuação entre os casos com uso de tensão primária e secundária do TPC TRENCH, conforme discutido em 5.4.1.2. Os resultados obtidos para $\theta = 300^\circ$ são idênticos aos já apresentados.

5.5.1.3 Sublance Devido às Tensões do TPC HAEFELY

Conforme verificado na Figura 5.76, o relé T400L sublançou, quando comparado ao valor esperado (tensões primárias), para o caso em que a tensão utilizada no ensaio foi proveniente do TPC HAEFELY para faltas em 55% e ângulos de incidência de 0° , 45° , 180° e 225° . Na Figura 5.79 é apresentada a tensão de operação para três casos diferentes, o primeiro para um ensaio com uso de tensões provenientes do primário e falta em 60% da LT, o segundo e terceiro utilizando tensões do TPC HAEFELY para faltas em 60% e 55% da LT. Todos os casos apresentados possuem ângulo de incidência da falta de 0° . Também é apresentado o momento da atuação do relé em cada caso.

A Figura 5.79 apresenta uma característica interessante e que ainda não havia sido apresen-

Figura 5.79. Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 0^\circ$.

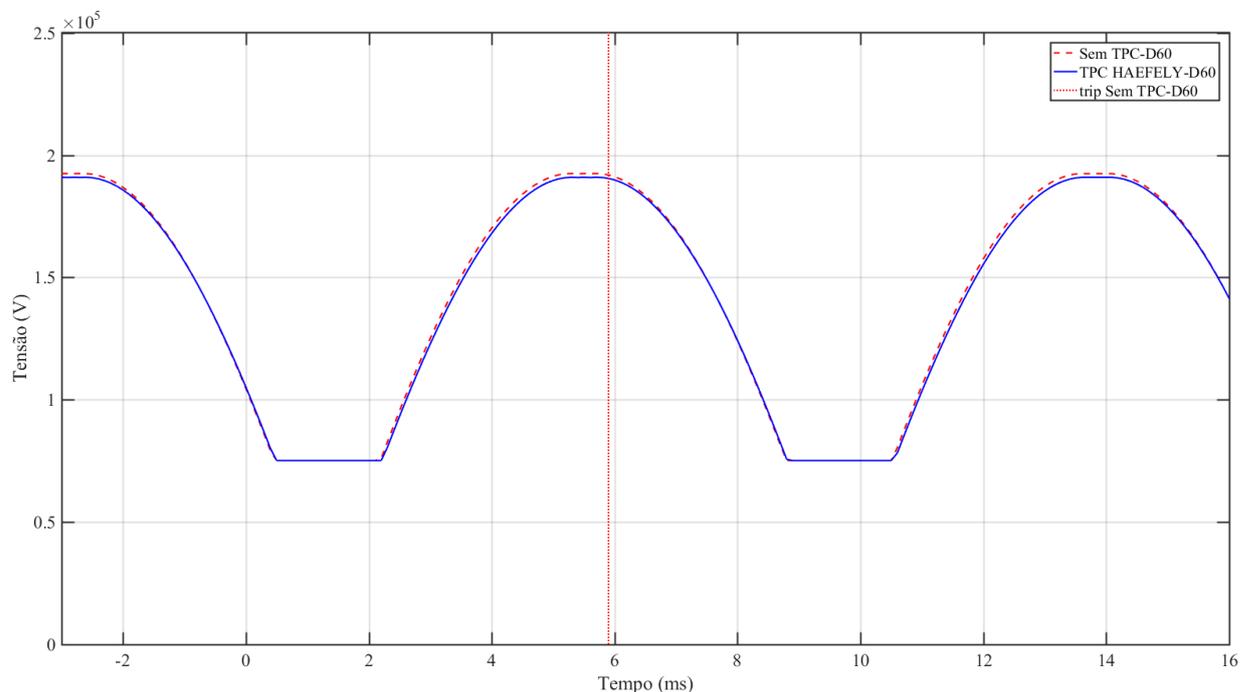
Fonte: Autoria própria.

tada nas condições anteriores. Neste caso, o primeiro lóbulo da tensão de operação apresenta uma largura maior que os demais casos vistos anteriormente, que eram da ordem de 6 ms, tendo este caso a largura de, aproximadamente, 10 ms. Isto é devido ao ponto da senoide onde ocorre a falta, neste caso 0° , sendo portanto percorrido todo o semiciclo da senoide até se iniciar o segundo lóbulo da tensão de operação. Para os casos já vistos anteriormente, o ângulo de incidência era de 90° e portanto seria percorrida a metade do semiciclo da senoide até se iniciar o segundo lóbulo da tensão de operação. Dessa forma, como não se tem eventos com atuação superiores à 10 ms, a atuação deverá ocorrer no primeiro lóbulo da tensão de operação. Outro ponto importante a se observar é o fato do primeiro lóbulo sofrer uma atenuação maior devido à característica da resposta em frequência do TPC HAEFELY.

A Figura 5.80 apresenta uma implementação da tensão de restrição, conforme seção 5.2. Nota-se que a tensão proveniente do uso do TPC HAEFELY apresenta valores inferiores quando comparada com a tensão de restrição utilizando tensões primárias, porém apresenta valores mais próximos que os da Figura 5.78. Diferentemente do caso de sobrealcançe visto para o TPC TRENCH, mesmo que a tensão de restrição para valores primários seja maior com uso de tensões do TPC HAEFELY, as condições de operação não foram capazes de sensibilizar a

função TD21 para o ensaio com uso de tensões secundárias do TPC HAEFELY.

Figura 5.80. Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\theta = 0^\circ$.



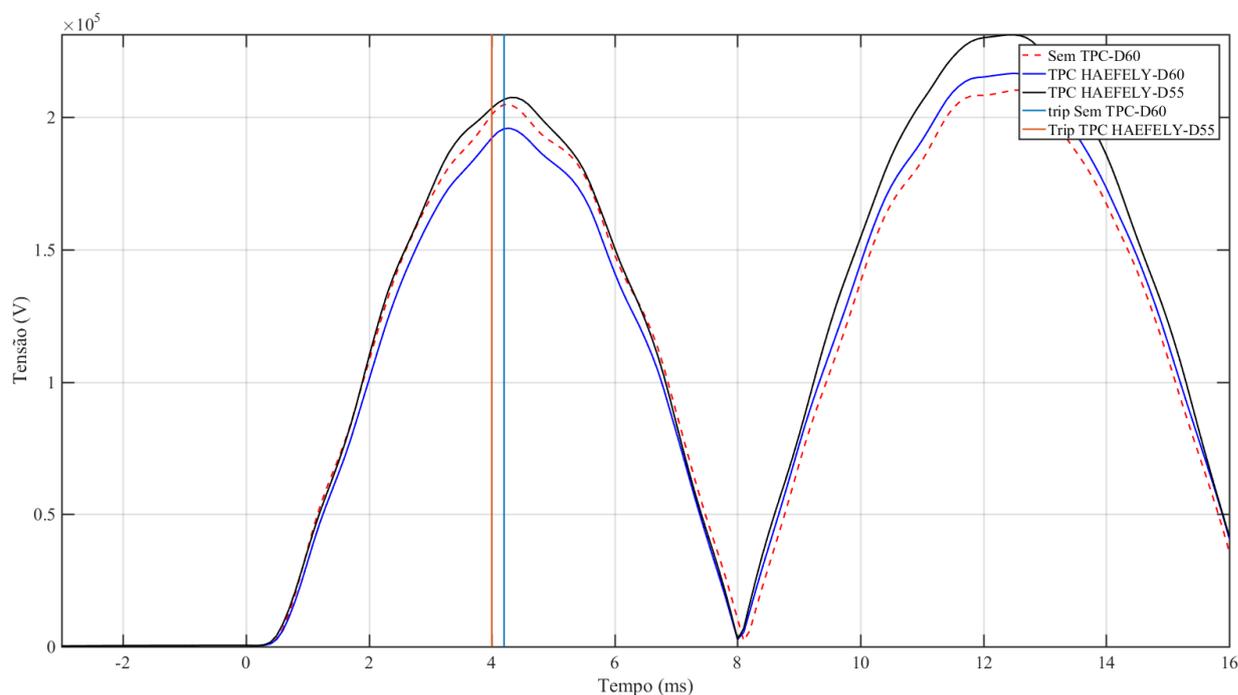
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.81 é apresentada a tensão de operação para três casos diferentes: o primeiro para um ensaio com uso de tensões provenientes do primário e falta em 60% da LT, o segundo e terceiro utilizando tensões do TPC HAEFELY para faltas em 60% e 55% da LT. Todos os casos apresentados possuem ângulo de incidência da falta de 45° . Também, é mostrado o momento da atuação em cada caso. Nota-se que a largura do lóbulo é reduzida para cerca de 8 ms, porém apresenta condições muito próximas das mostradas na Figura 5.79.

5.5.1.4 Subalcançe Devido às Tensões do TPC IEEE

Conforme verificado na Figura 5.76, quando comparado ao valor esperado, o relé T400L subalcançou para os ensaios onde a tensão utilizada foi proveniente do TPC IEEE, exceto para os ensaios com ângulos de incidência de 60° , 75° e 240° . Somente os casos com ângulo de incidência de 90° , 105° , 120° , 270° , 285° e 300° apresentaram um subalcançe de 5%, todos os demais apresentaram um subalcançe de 10% em relação ao caso de uso de tensões primárias.

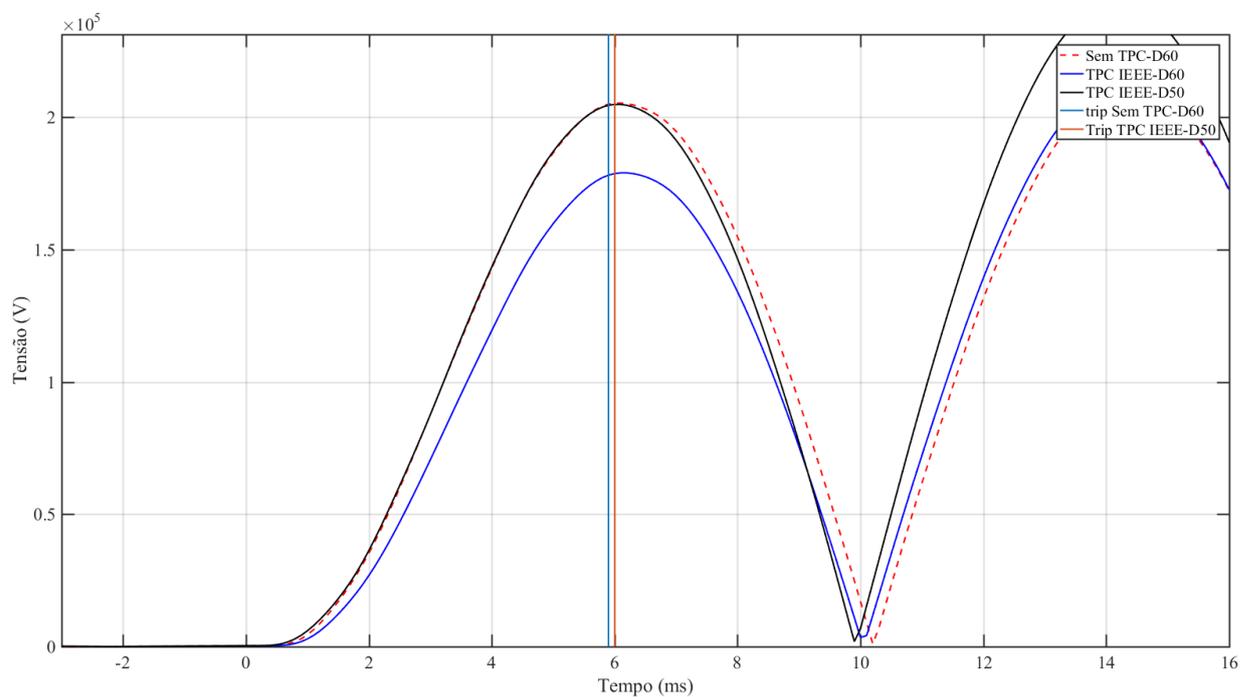
O caso de subalcançe para $\theta = 90^\circ$ já foi apresentado e analisado nas seções 5.3.1.4 e 5.4.1.6.

Figura 5.81. Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 45^\circ$.

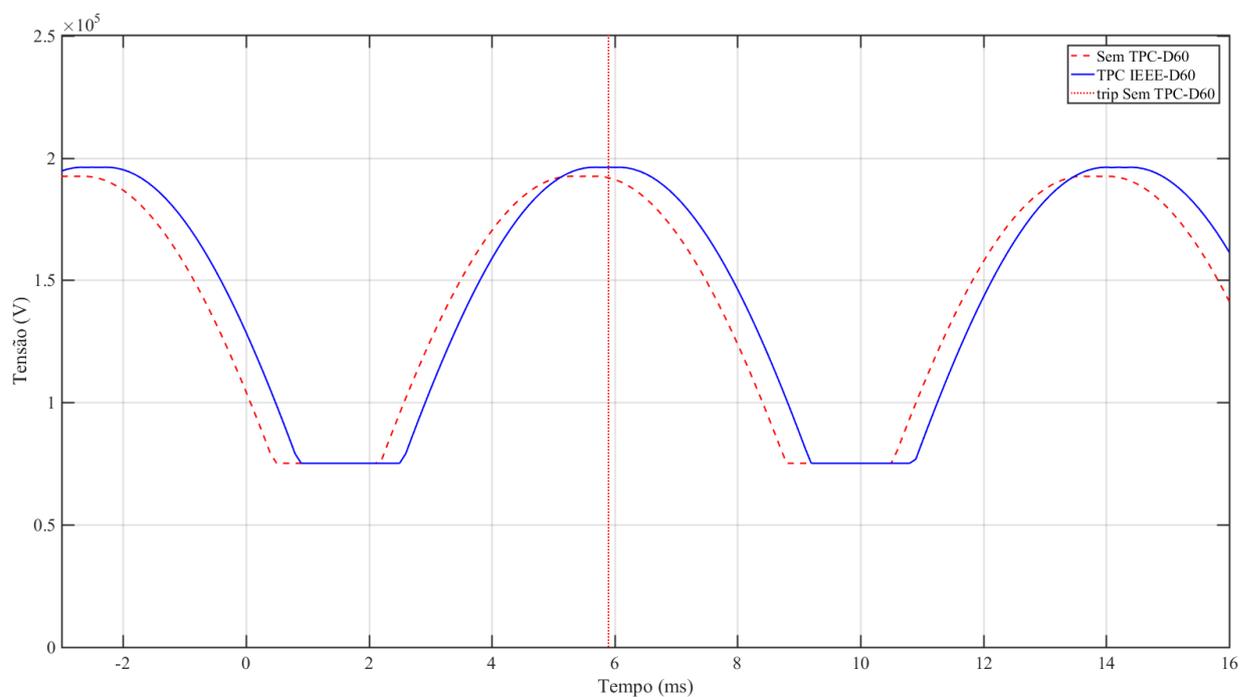
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.82 é apresentada a tensão de operação para três casos diferentes: o primeiro para um ensaio com uso de tensões provenientes do primário e falta em 60% da LT, o segundo e terceiro utilizando tensões do TPC IEEE para faltas em 60% e 50% da LT. Todos os casos apresentados possuem ângulo de incidência da falta de 0° , sendo a atuação do relé também apresentada.

Um ponto importante a se observar na Figura 5.82, é o fato da tensão de operação com uso de tensão secundária do TPC IEEE apresentar atenuação no primeiro lóbulo devido às características de resposta em frequência do TPC IEEE. Desta forma, é mais difícil para a tensão de operação ultrapassar a tensão de restrição e reunir as condições de atuação. De fato, o ensaio com uso de tensões do TPC IEEE que obteve atuação foi para uma falta 10% antes que o caso com tensões primárias, e conforme pode-se ver na Figura 5.82, a tensão de operação apresentou os mesmos valores que o caso com uso de tensões primárias que ocorreu 10% à frente. A Figura 5.83 apresenta uma análise da tensão de restrição. Conforme já visto anteriormente, a tensão de restrição para o caso com TPC IEEE apresenta defasagem em relação ao uso de sinais primários.

Figura 5.82. Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 0^\circ$.

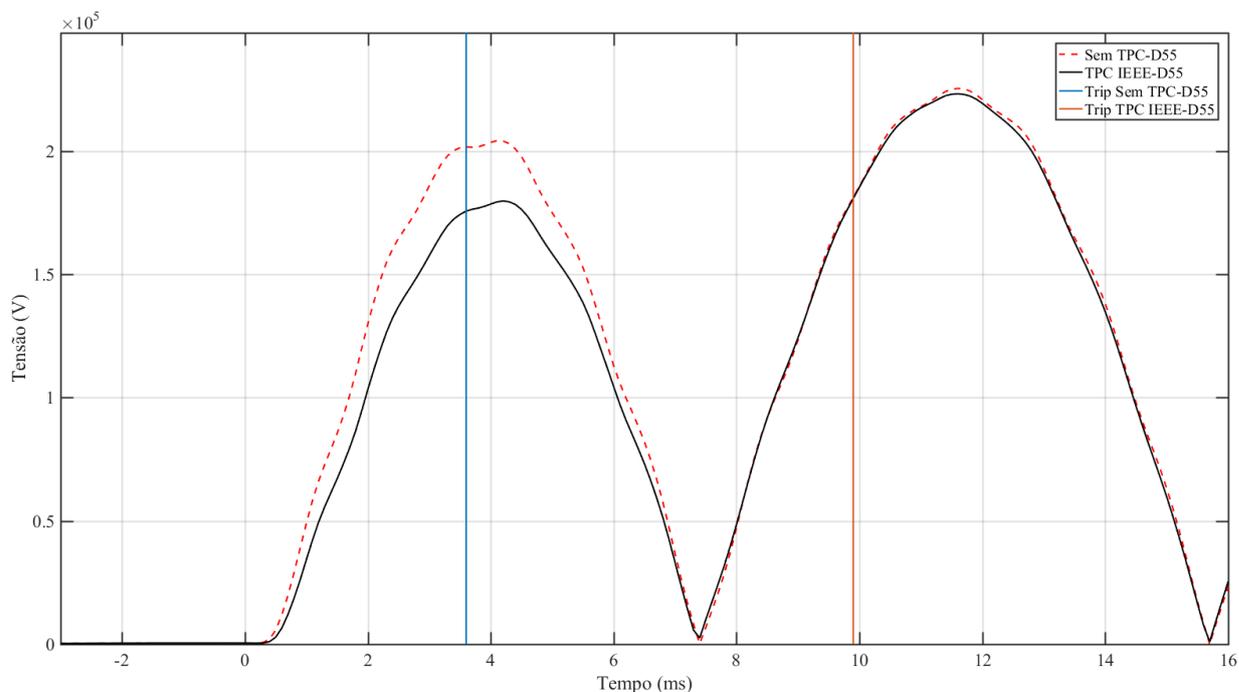
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.83. Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\theta = 0^\circ$.

Fonte: Autoria própria.

Resta entender o motivo dos resultados referentes ao ângulo de incidência iguais à 60° e 75° , onde não ocorreu subbalcance. A Figura 5.84 apresenta a tensão de operação para dois casos diferentes, sendo o primeiro para um ensaio com uso de tensões provenientes do primário e falta em 55% da LT e o segundo utilizando tensões do TPC IEEE para falta em 55% da LT. Todos os casos apresentados possuem ângulo de incidência da falta de 60° . Neste caso, a atuação do ensaio com tensão proveniente do TPC IEEE só ocorreu no segundo lóbulo, onde a tensão de operação é praticamente igual à do ensaio com tensão primária. Dessa forma, só foram reunidas condições para atuação no segundo lóbulo da tensão de restrição e isto foi devido ao fato do primeiro lóbulo possuir largura inferior aos casos com ângulo de incidência menores que 60° , tornando possível que o segundo lóbulo inicie sua subida antes e assim alcance as condições necessárias de atuação antes do tempo limite de operação da função TD21, que conforme resultados obtidos é de 10,1 ms. Observando a Figura 5.76, nota-se que os casos com ângulo de incidência superiores à 60° e inferiores à 120° apresentam alcance de 55% e possuem tempo de atuação da ordem do observado para o caso de $\theta = 60^\circ$.

Figura 5.84. Comparação entre as tensões de operação para $\theta = 60^\circ$.



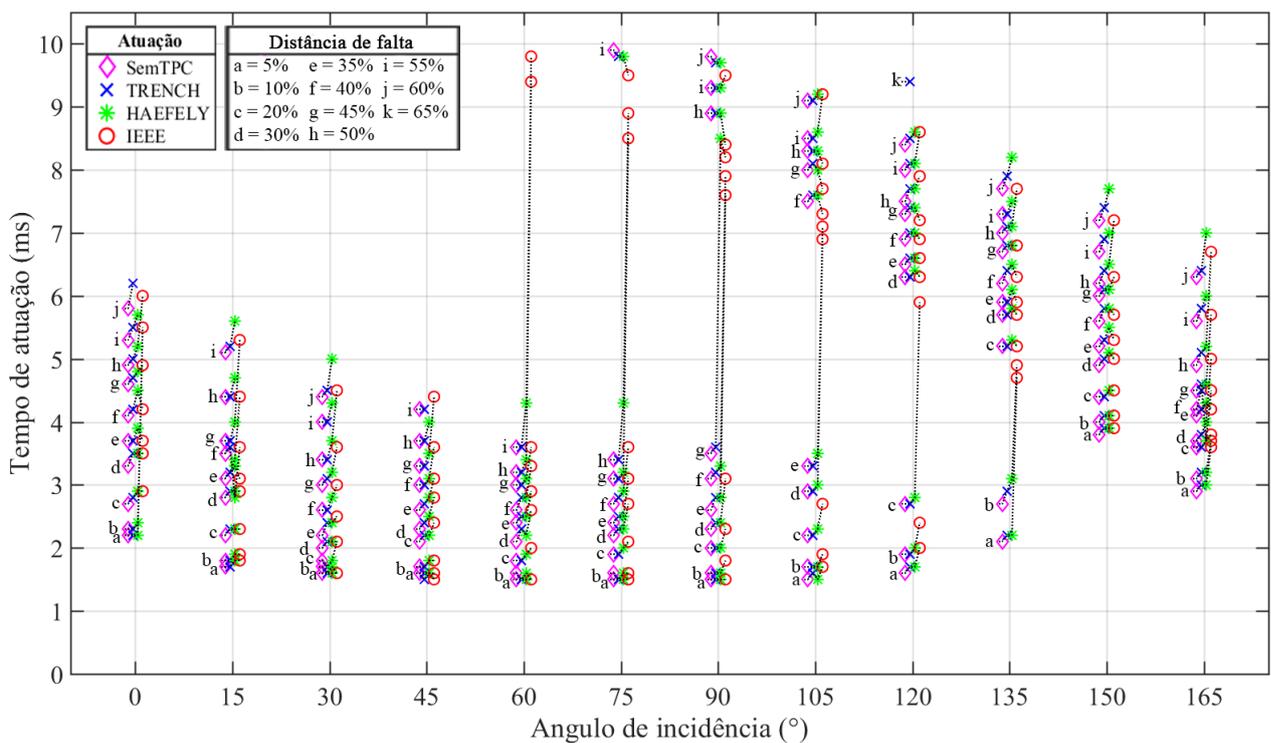
Fonte: Autoria própria.

5.5.1.5 Tempo de Atuação da Função TD21

As Figuras 5.85 e 5.86 apresentam os tempos de atuação da função TD21 para cada caso simulado, levando em consideração os resultados obtidos utilizando como tensão de entrada valores primários e secundários provenientes dos TPC estudados.

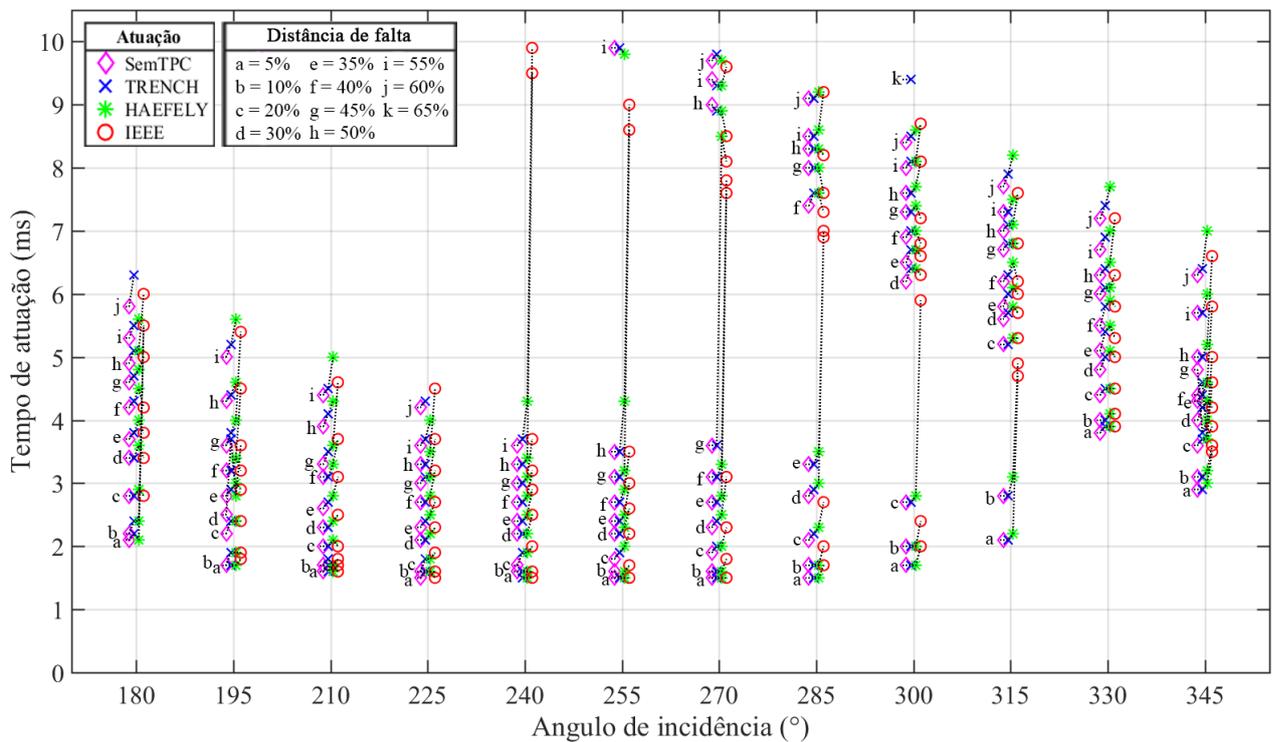
Verifica-se que não ocorreram atuações superiores a 9,9 ms, sendo o menor tempo de atuação igual a 1,5 ms, para o caso com ângulo de incidência igual a 90° e o caso com maior tempo de atuação para um ensaio com ângulo de incidência de 240° . Interessante notar que para os casos com ângulo de incidência de 0° a 45° , 150° a 225° , 330° e 345° não é observado um intervalo de tempo em que não ocorrem atuações, como verificado nos casos anteriores.

Figura 5.85. Tempos de atuação para diferentes valores de ângulo de incidência.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.87 apresenta a comparação para diferentes casos de ângulo de incidência, para uma falta em 50% da LT. Nota-se que para a tensão de operação proveniente do ensaio com $\theta = 0^\circ$, o primeiro lóbulo possui a maior largura e o maior valor absoluto, sendo esta característica alterada conforme se aumenta o valor de θ , diminuindo a largura do lóbulo e o valor absoluto.

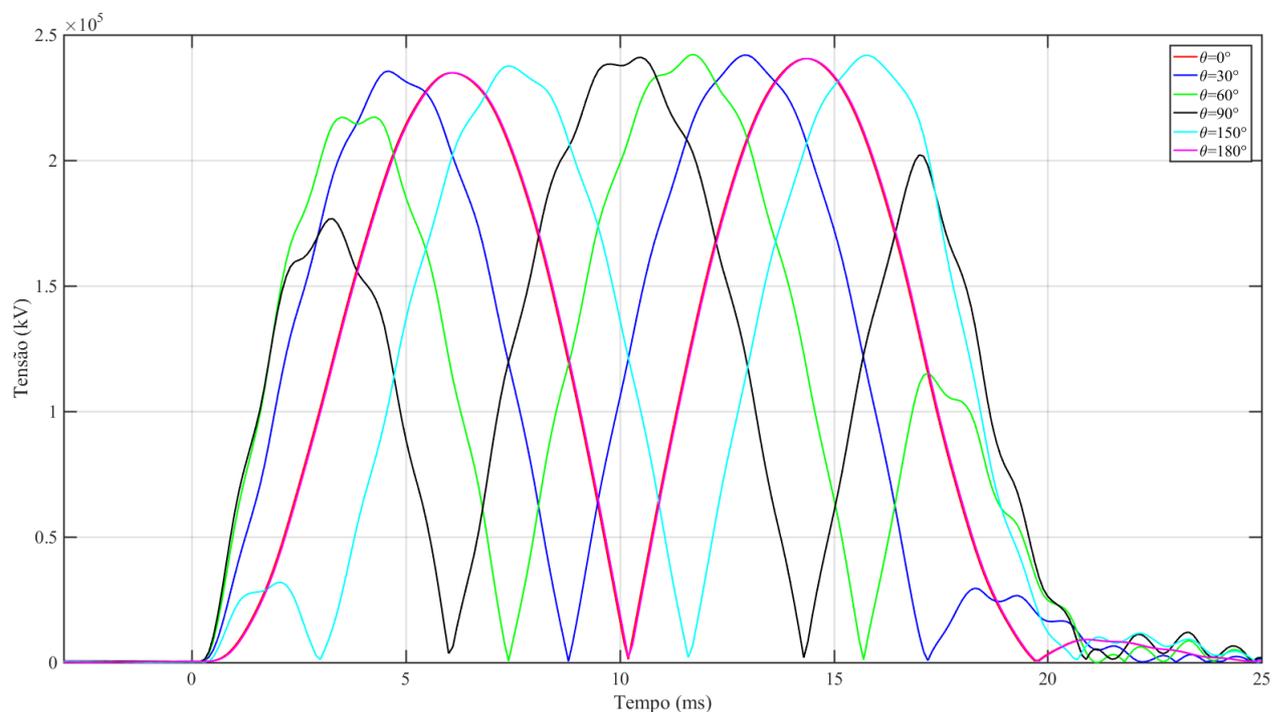
Figura 5.86. Tempos de atuação para diferentes valores de ângulo de incidência.

Fonte: Autoria própria.

Esta característica pode ser vista até o valor $\theta = 180^\circ$ que apresenta resultados iguais aos verificados para valores com $\theta = 0^\circ$. Dessa forma, pode-se inferir que para valores de $\theta = 0^\circ$ até $\theta = 45^\circ$ todas as atuações ocorreram no primeiro lóbulo da tensão de operação. Para $\theta = 150^\circ$ verifica-se que as atuações ocorreram no segundo lóbulo, pois o primeiro lóbulo possui valores muito pequenos. Estas atuações ocorreram somente no segundo lóbulo, e por isto não se observam nas Figuras 5.85 e 5.86 intervalos sem atuação. Esta característica se repete até $\theta = 165^\circ$, sendo que para $\theta = 180^\circ$ até $\theta = 225^\circ$ os valores retornam para os mesmos apresentados quando foi utilizado $\theta = 0^\circ$ até $\theta = 45^\circ$, respectivamente.

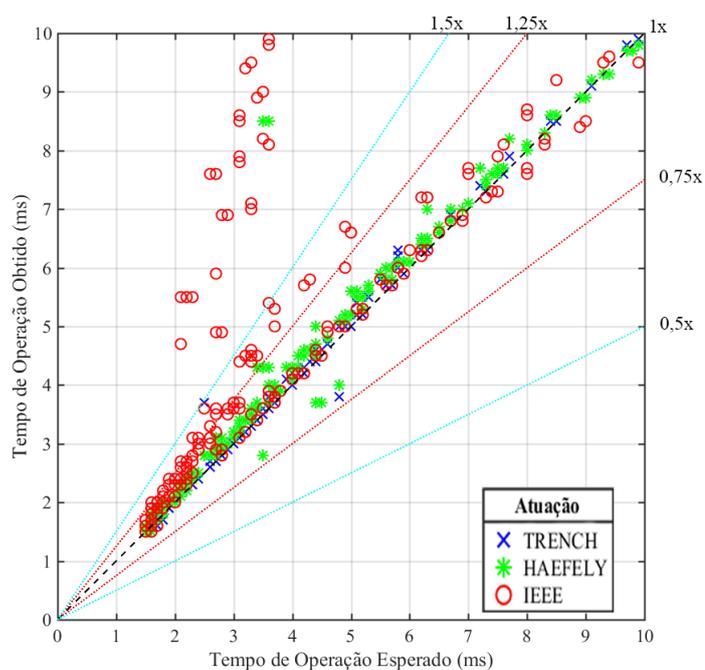
A Figura 5.88 apresenta a comparação entre os tempos de atuação da função TD21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos que utilizaram tensão primária, considerado "valores esperados", e no eixo Y, os resultados obtidos para eventos que utilizaram a tensão secundária dos TPC, considerados "valores obtidos". Nota-se que o TPC IEEE apresenta os resultados mais discrepantes apresentando diversos casos com tempo de atuação obtido superiores a 1,5 vezes o tempo esperado.

Figura 5.87. Comparação entre as tensões de operação para diferentes valores do ângulo de incidência da falta.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.88. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de ângulo de incidência.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, destaca-se o fato do uso das tensões secundárias impactarem de forma considerável nos tempos de atuação quando da variação do ângulo de incidência da falta, principalmente para os casos do TPC IEEE.

5.5.2 Resultados 411L

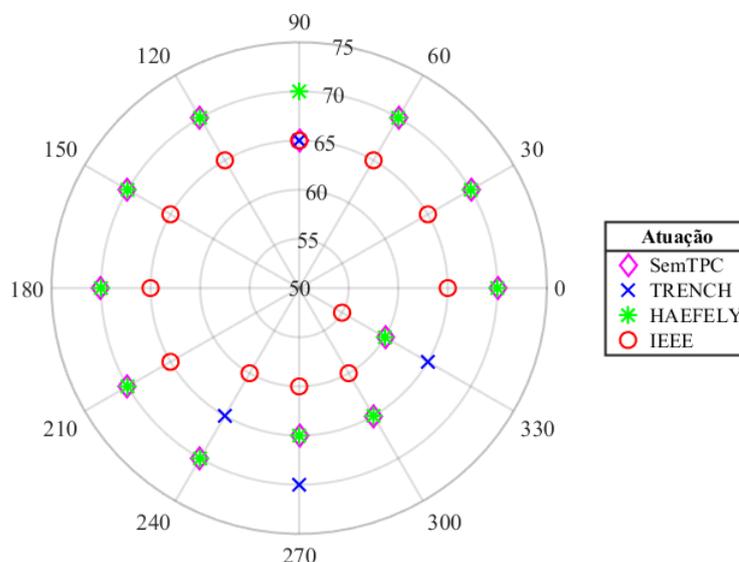
Da mesma forma como realizado anteriormente, as simulações foram realizadas e ensaiadas utilizando o relé 411L via reprodução dos sinais de tensão e corrente por meio da mala de teste Doble F6150sv, conforme descrito na seção 5.1. Foram coletados os resultados utilizando como valores de entrada a tensão primária e os valores secundários provenientes dos modelos digitais dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE.

Conforme apresentado na seção 5.1, no relé 411L não foram realizados todos os ensaios já executados no relé T400L. Foram escolhidos os casos que foram julgados mais significativos e então realizados os ensaios. Dessa forma, foram realizados ensaios considerando um passo de cálculo no ângulo de incidência de 30° , variando o mesmo de 0° à 330° , sem no entanto realizá-los para todos os locais de falta. Ainda assim, tomou-se o cuidado de realizar os ensaios necessários para verificação do alcance máximo obtido pela função PH21 para todos os casos simulados.

5.5.2.1 Alcance da Função PH21

Com base nos resultados de atuação do relé 411L foram encontrados o alcance máximo obtido para os ensaios utilizando os valores de tensão como entrada, conforme apresentado na Figura 5.89. Novamente, os valores obtidos dos ensaios com a tensão primária são considerados o "valor esperado", sendo adotado como referência.

Verifica-se na Figura 5.89 que a variação do ângulo de incidência da falta afeta o alcance da função PH21, sendo o pior caso verificado para um ângulo de incidência de 330° , com alcance final de 60% para uso de tensões primárias. Nota-se, também, que quando comparado o alcance utilizando a tensão primária como valor padrão e as tensões provenientes dos TPC, ocorreram sobrealcance quando do uso da tensão do TPC TRENCH para um ângulo de incidência de 270°

Figura 5.89. Alcance obtido para diferentes valores de resistência de falta.

Fonte: Autoria própria.

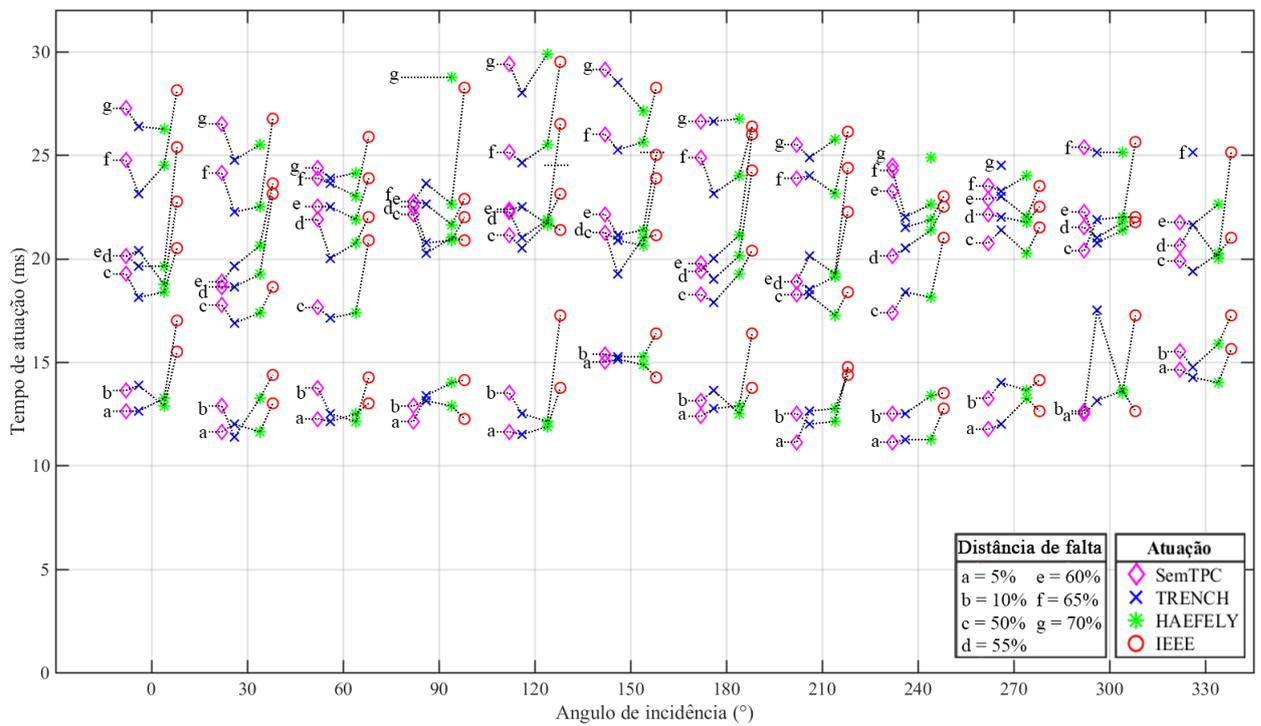
e 330°. Também ocorreu sobrealcance quando do uso da tensão do TPC HAEFELY para um ângulo de incidência de 90°. De outra forma, ocorreram subalcances quando do uso das tensões do TPC IEEE para todos os casos exceto para um caso com ângulo de incidência de 90°. Os casos ensaiados apresentam tempos de atuação de cerca de 12 ms para faltas em 5% da LT, alcançando valores da ordem de 30 ms para os casos de alcance máximo.

5.5.2.2 Tempo de Atuação da Função PH21

A Figura 5.90 apresenta os tempos de atuação da função PH21 para os diferentes pontos de falta e ângulos de incidência de falta utilizando as tensões primárias e secundárias. Pode-se notar que, de forma geral, os tempos de atuação não apresentam diferenças significativas quando alterado o ângulo de incidência da falta, exceto para 150°.

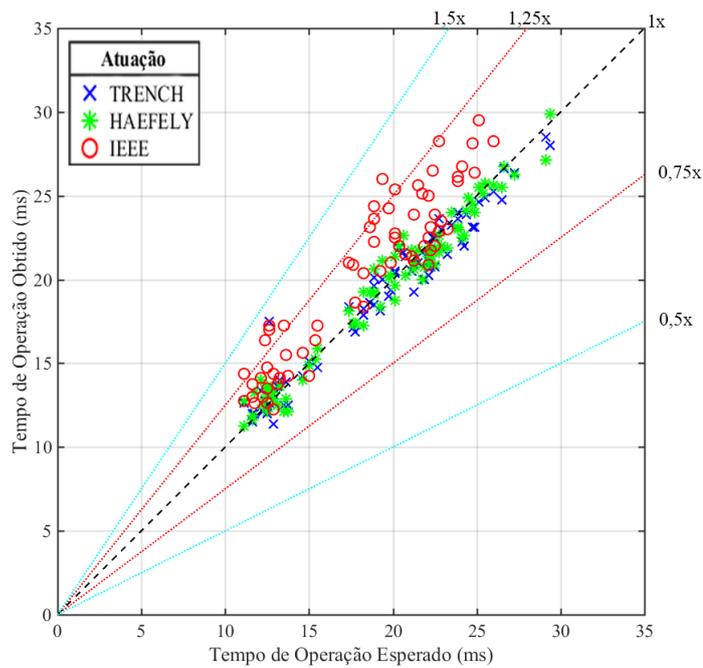
A Figura 5.91 apresenta a comparação entre o tempo de atuação da função PH21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão primária, considerado "valores esperados", e no eixo Y, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão secundária dos TPC, considerados "valores obtidos". Verifica-se que os tempos de atuação referentes aos

Figura 5.90. Tempos de atuação para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.91. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de resistência de falta.



Fonte: Autoria própria.

ensaios com uso de TPC não possuem uma característica ordenada. Desta forma, nota-se que existem atuações mais rápidas e mais lentas que o "esperado". Os casos que apresentam maiores diferenças em relação ao tempo esperado são os relativos ao ensaio com o TPC IEEE, sendo em sua maioria, acima do tempo de atuação esperado. Porém, de forma geral, os resultados obtidos apresentam uma característica adequada, com tempos de atuação não superiores a 1,5 vezes maiores, e nem menores que 0,75 vezes que o esperado.

5.6 VARIAÇÃO DO CARREGAMENTO

Para os ensaios apresentados nesta seção foi utilizado o sistema apresentado na Figura 5.1, realizando curtos-circuitos na fase A, um SIR de 0,1 para ambas as fontes, um ângulo incidência de falta de 90° e uma resistência de falta de 0Ω . Realizando a variação do carregamento com abertura angular entre as barras Local e Remota com valores entre -40° e 40° , com incrementos de 5° . Para todos os casos foi realizada a variação do local de falta ao longo da LT, totalizando 17 cenários de simulação e 255 casos simulados para cada tipo de TPC utilizado além dos casos ensaiados com tensão primária. Em situações reais, espera-se que a abertura angular δ entre as tensões nas barras não ultrapasse valores próximos de $\pm 35^\circ$ em situações de carregamento pesado (GLOVER *et al.*, 2010; SAADAT, 2009). Porém, nas simulações deste trabalho este valor foi ultrapassado em 5° para uma melhor avaliação das funções sobre um cenário extremo.

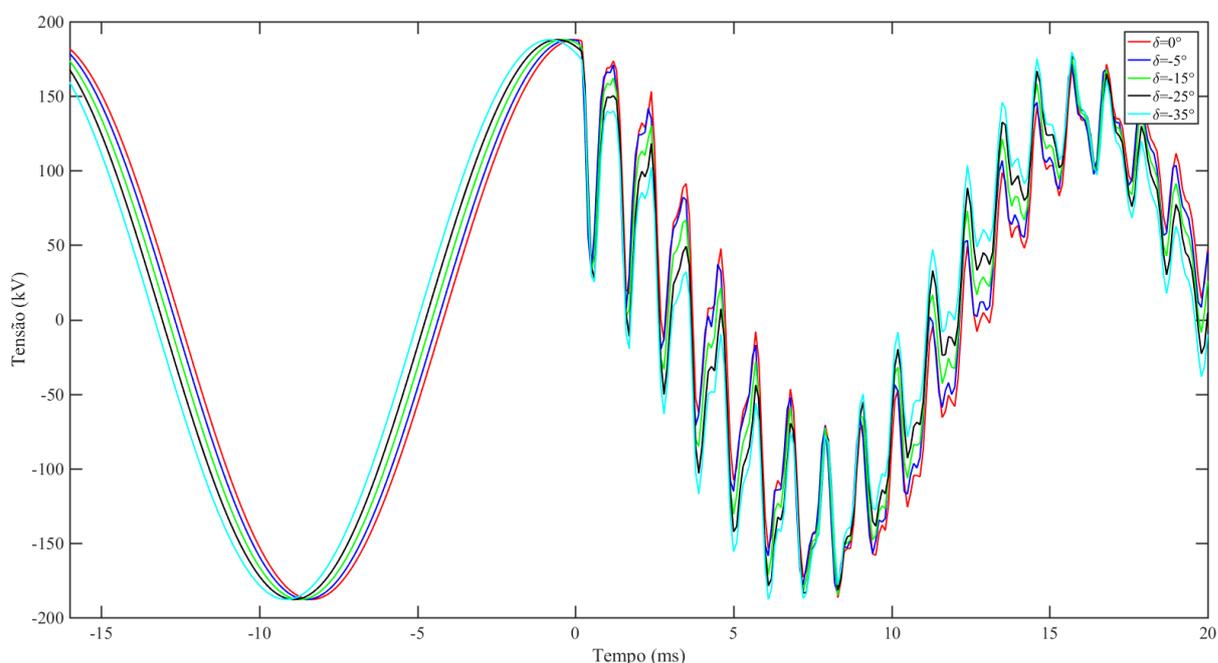
A diferença angular considerada é sempre tomando a barra Local como referência, dessa forma, para valores de abertura angular δ negativos, o fluxo de potência vai da barra Local para a barra Remota, e para valores de abertura angular δ positivos, o fluxo de potência vem da barra Remota para a barra Local.

As Figuras 5.92 e 5.93 apresentam os sinais de tensão e corrente para diferentes valores de carregamento, considerando uma falta em 50% da LT com sinais provenientes do primário.

Nota-se que uma das diferenças entre os sinais é no ângulo onde se inicia o afundamento da tensão devido à falta. Para os casos de δ negativos verifica-se que os ângulos da tensão são maiores quando comparados com $\delta = 0^\circ$. Já para os casos δ positivo, os ângulos da tensão são menores quando comparados com $\delta = 0^\circ$. Quando a abertura angular entre as barras Local e Remota é de $\delta = 0^\circ$ não existe fluxo de potência no sistema avaliado e, dessa forma,

praticamente não existe queda de tensão entre o barramento local e o ponto de falta, então a tensão medida no terminal local é praticamente a mesma do ponto de falta. Quando se altera o carregamento, a corrente de carga é alterada e conseqüentemente muda-se a queda de tensão até o ponto de falta, e como a falta é efetuada sempre com ângulo de incidência igual a 90° no ponto de falta, as tensões lidas no terminal local sofrem alteração. Outra diferença considerável é referente aos valores de pós-falta. Nota-se que existem diferenças consideráveis nos valores da tensão de pós-falta durante os transitórios.

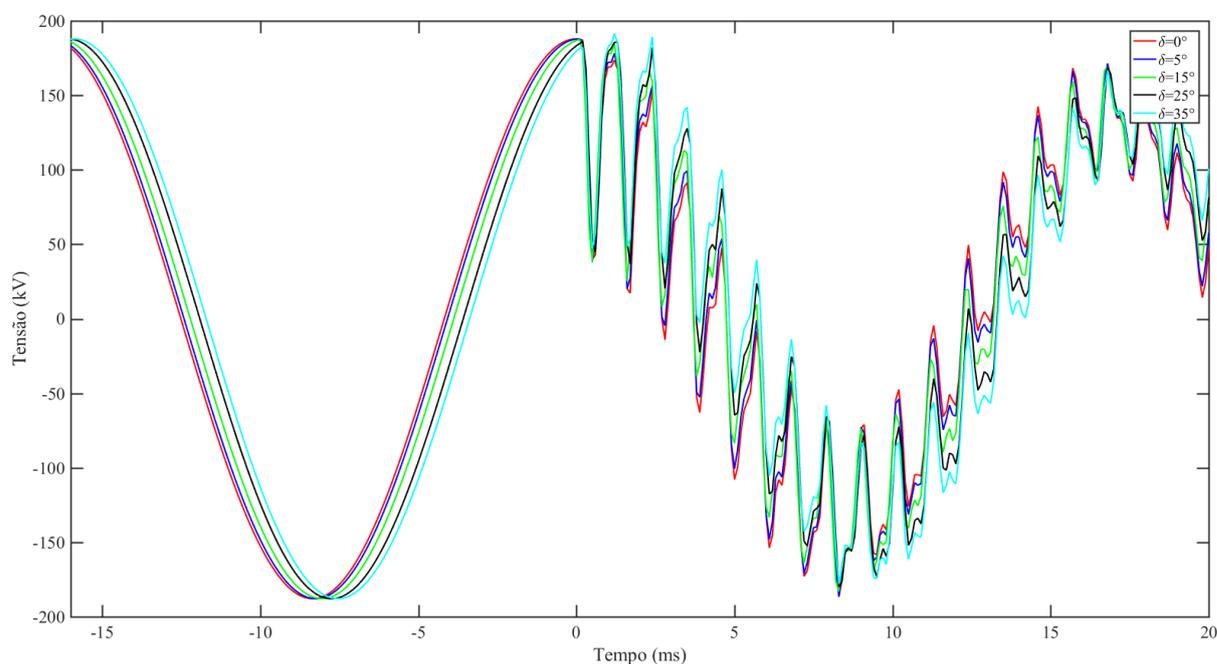
Figura 5.92. Tensão medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência indo da barra Local para a Remota.



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 5.94 e 5.95 apresentam a corrente medida pelo relé para uma falta em 50% da LT para diferentes valores de carregamento. Nota-se primeiramente que a corrente de pré-falta é maior quanto maior for o carregamento, e que os sinais apresentam diferenças na fase quando o valor de δ é positivo e negativo. Em relação ao instante da falta, verifica-se que esta ocorre no mesmo instante, ou ângulo de incidência, da corrente para todos os casos, sendo possível notar uma diferença na fase da corrente de pós-falta. Para valores de δ negativos quanto maior o carregamento mais adiantada a corrente estará. Já para δ positivos, verifica-se o contrário. Vale destacar que a diferença de ângulo de fase vista nas tensões (Figuras 5.92 e 5.93) são

Figura 5.93. Tensão medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência vindo da barra Remota para a Local.

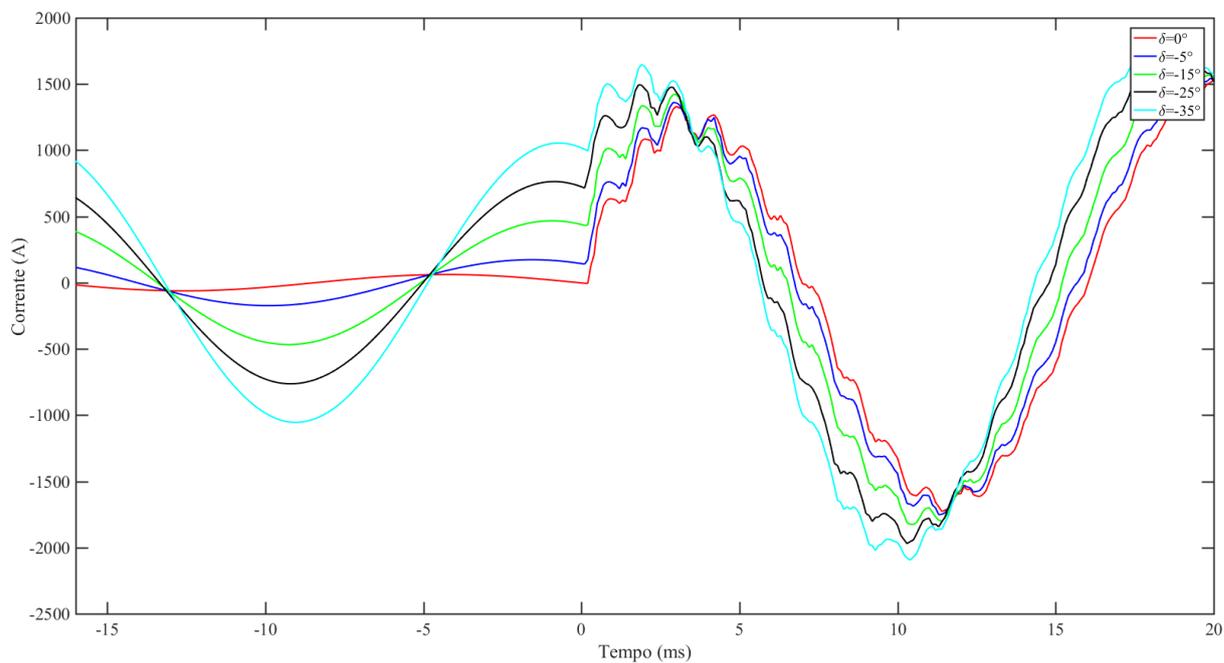


Fonte: Autoria própria.

relativas ao regime de pré-falta, somente são apresentadas devido à escolha de se alinhar o instante da falta, considerando o mesmo como instante igual à 0 ms. Sendo assim, as correntes apresentadas na Figura 5.94 possuem ângulo de fase iguais, o mesmo vale para as correntes da Figura 5.95. Outro ponto importante a se destacar em relação a corrente de falta, é que não verifica-se diferenças significativas em relação ao valor absoluto das mesmas, sendo que as correntes de falta relativas a um carregamento maior apresentam valores absolutos levemente superiores aos casos com carregamento menor.

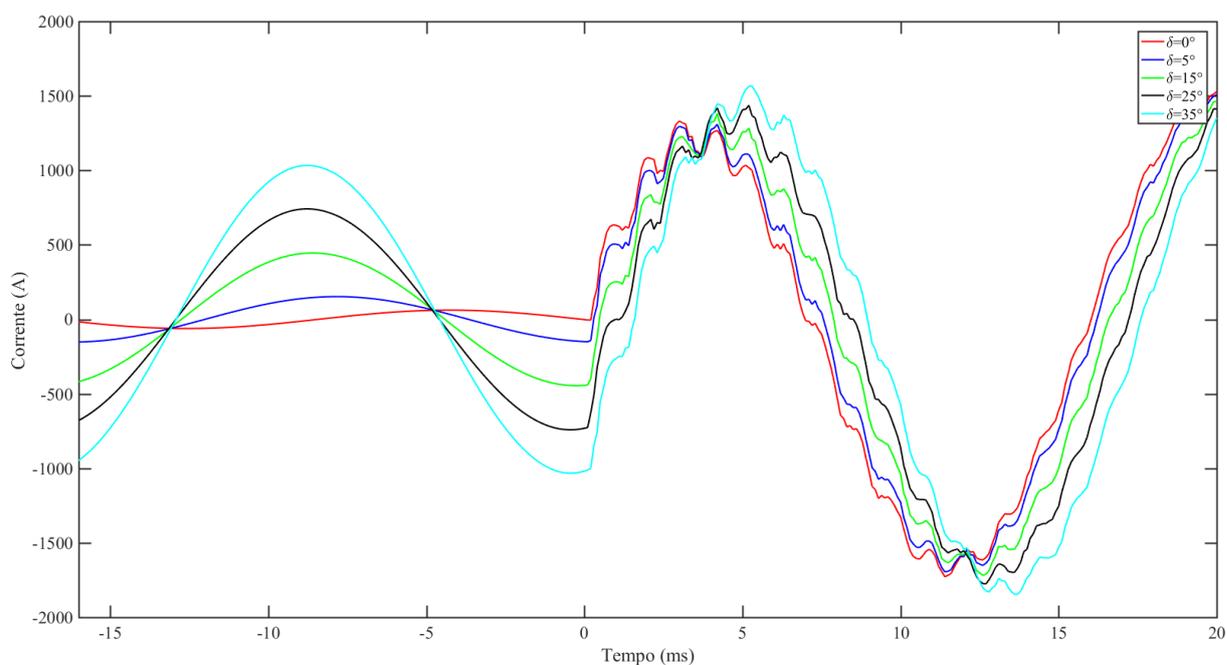
A Figura 5.96 apresenta os sinais de tensão obtidos do primário e do secundário dos diversos TPC estudados. Da Figura observa-se que o sinal de tensão secundária que mais se aproxima do valor primário é do TPC TRENCH, apresentando pequenas atenuações. Já o TPC HAEFELY apresenta um sinal de tensão com significativas diferenças em relação a tensão primária. Por fim, o TPC IEEE é o que apresenta as maiores diferenças em relação à tensão primária, com atenuação de praticamente todo o transitório. Nota-se também que existe defasagem e diferença de amplitude da tensão secundária dos TPC em relação à tensão primária, sendo que o TPC IEEE apresenta os resultados mais discrepantes.

Figura 5.94. Corrente medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência indo da barra Local para a Remota.



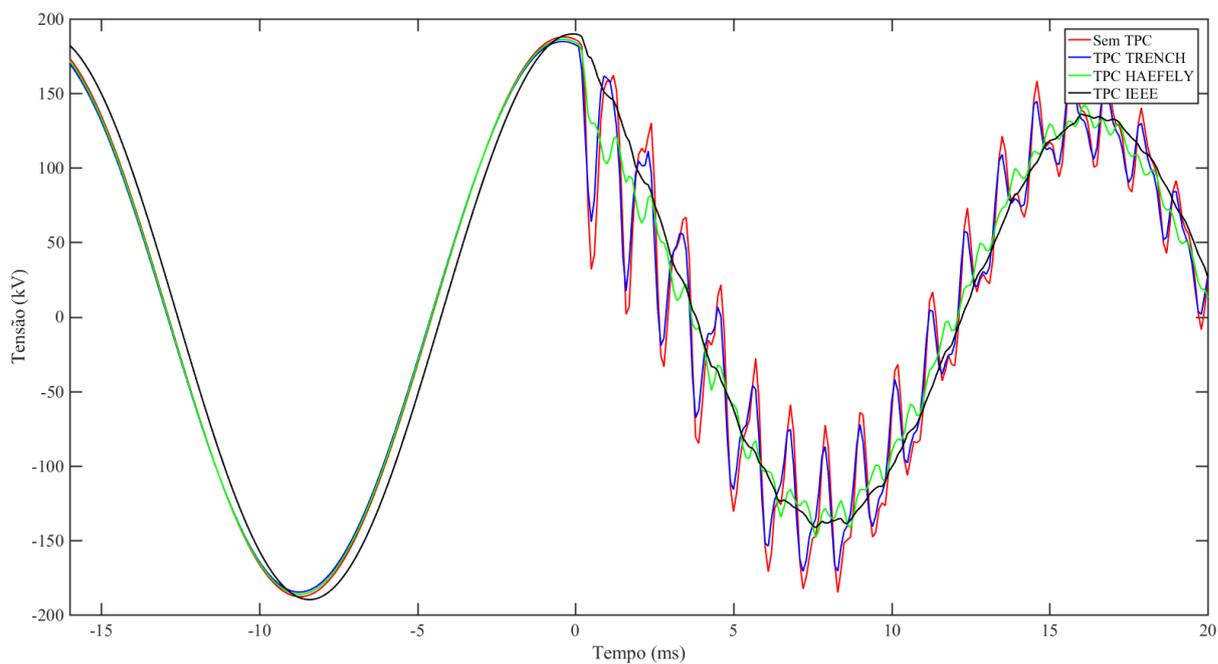
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.95. Corrente medida pelo relé sem o uso de TPC para diferentes valores de carregamento com o fluxo de potência vindo da barra Remota para a Local.



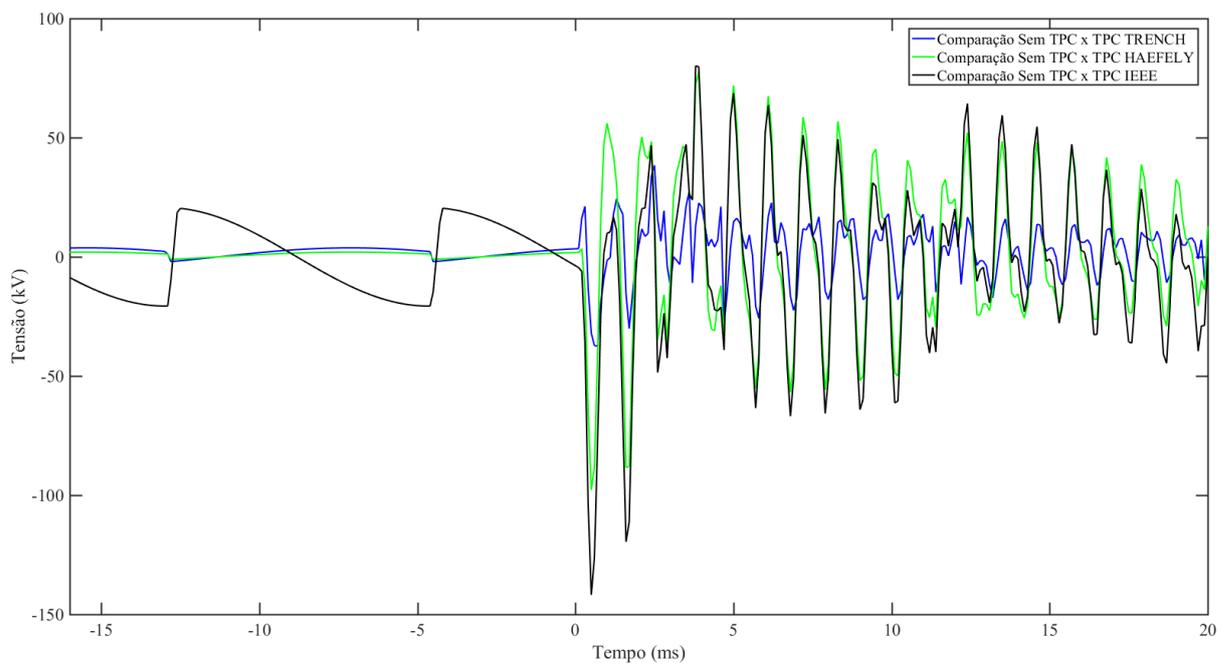
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.96. Comparação das tensões utilizadas nos ensaios, para uma falta em 50% da LT com $\delta = -5^\circ$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.97. Comparação entre o módulo das tensões apresentadas na Figura 5.96.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.97 apresenta a diferença entre o módulo das tensões provenientes do primário e secundário dos diversos TPC. Verifica-se que após a falta as diferenças são significativas, sendo o pior caso para o TPC IEEE. Diferenças também podem ser vistas na tensão de pré-falta. Estas diferenças impactam na tensão de restrição da função TD21.

5.6.1 Resultados T400L

Usando a funcionalidade de *Playback* do T400L, os resultados utilizando como valores de entrada a tensão primária e tensão secundária provenientes dos modelos digitais dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, foram avaliadas, seguindo a mesma metodologia das seções anteriores.

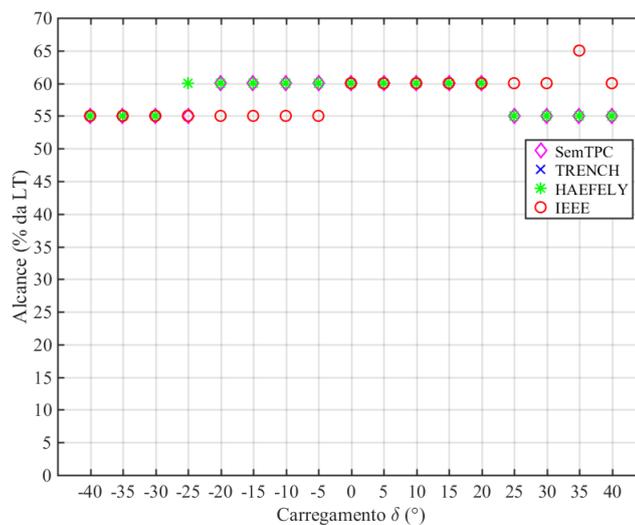
5.6.1.1 Alcance da Função TD21

Com base nos resultados de atuação do relé T400L foram encontrados o alcance máximo obtido para os ensaios utilizando os valores de tensão como entrada, conforme apresentado na Figura 5.98. Os valores obtidos dos ensaios com a tensão primária são considerados o valor esperado, conforme explicado anteriormente. Nota-se que os eventos que utilizaram a tensão do TPC IEEE apresentaram os resultados mais discrepantes, sobrealcançando em quatro eventos para δ igual à 25° , 30° , 35° e 40° , e subalcançou em outros quatro eventos para δ igual à -5° , -10° , -15° e -20° . Também verificou-se um sobrealcance para um evento que utilizou a tensão do TPC TRENCH e HAEFELY, para δ igual à -25° .

5.6.1.2 Sobrealcance Devido às Tensões do TPC TRENCH

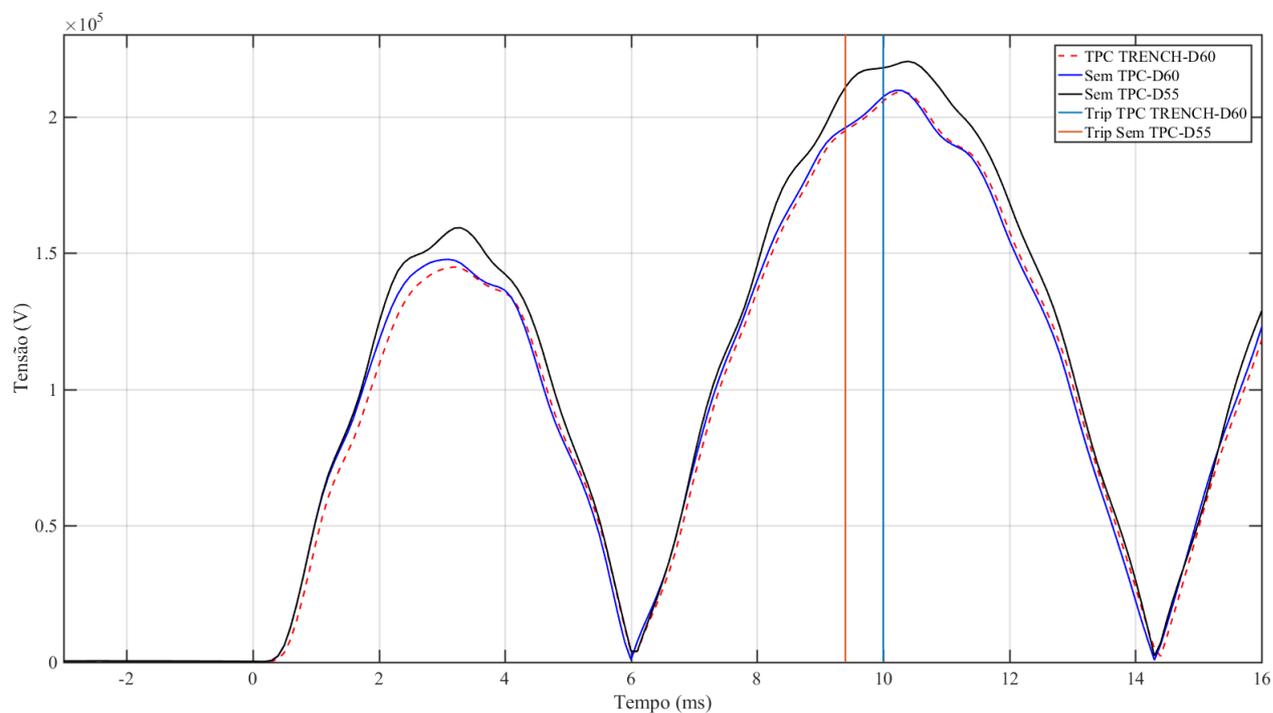
Conforme verificado na Figura 5.98, quando comparado ao valor esperado, o relé T400L sobrealcançou para os ensaios onde a tensão utilizada foi proveniente do TPC TRENCH para o caso de $\delta = -25^\circ$ com um alcance de 60% frente a um valor esperado de 55%. Vale lembrar que o passo de cálculo é de 5% da LT para esta região.

Na Figura 5.99 é apresentada a tensão de operação para três casos diferentes: o primeiro para um ensaio com uso de tensões provenientes do TPC TRENCH e falta em 60% da LT, o

Figura 5.98. Alcance obtido para diferentes valores de ângulo de incidência.

Fonte: Autoria própria.

segundo e terceiro utilizando tensões primárias para faltas em 60% e 55% da LT. Todos os casos apresentados possuem $\delta = -25^\circ$. Também é indicado o momento da atuação em cada caso.

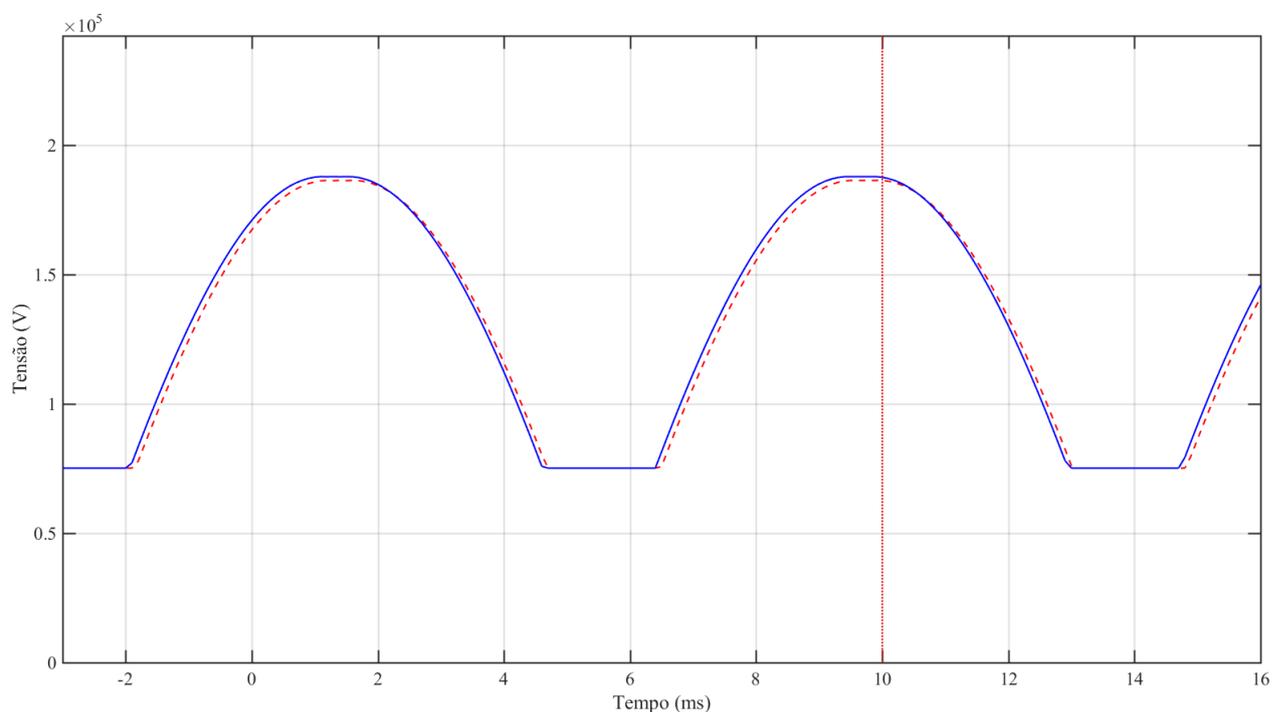
Figura 5.99. Comparação entre as tensões de operação para $\delta = -25^\circ$.

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se na Figura 5.99 que a tensão de operação proveniente do TPC TRENCH é menor que as demais em praticamente todo o intervalo avaliado. Porém, a Figura 5.100 mostra que a

tensão de restrição para o uso de tensões secundárias também é menor em praticamente todo o intervalo. Dessa forma, é possível ocorrer a atuação da função TD21 para o ensaio com tensão secundária do TPC TRENCH e não ocorrer atuação para o caso com uso de tensões primárias, mesmo apresentando tensão de operação maior.

Figura 5.100. Comparação entre as tensões de restrição estimada para $\delta = -25^\circ$.



Fonte: Autoria própria.

5.6.1.3 Sobrealcance Devido às Tensões do TPC HAEFELY

Conforme verificado na Figura 5.98, quando comparado ao valor esperado, o relé T400L sobrealcançou para os ensaios onde a tensão utilizada foi proveniente do TPC HAEFELY para o caso onde $\delta = -25^\circ$ com um alcance obtido de 60% frente a um valor esperado de 55%. Os resultados obtidos para este caso de sobrealcance são muito parecidos com os encontrados no caso anterior, do TPC TRENCH, e dessa forma não serão detalhados.

5.6.1.4 Sobrealcance Devido às Tensões do TPC IEEE

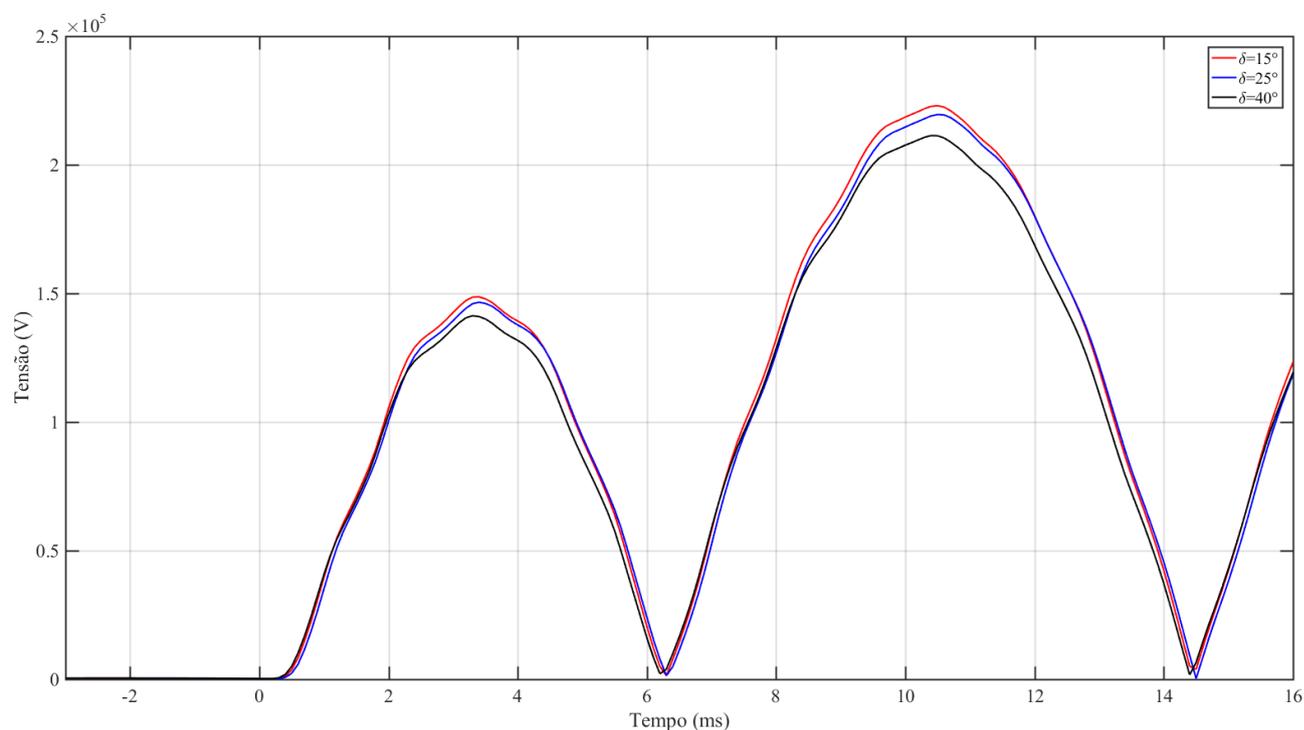
Conforme apresentado na Figura 5.98, para valores de δ maiores ou iguais à 25° , o relé T400L sobrealcançou para os ensaios com tensão do secundário do TPC IEEE. A Figura 5.101 apresenta as tensões de operação para três casos onde a falta ocorreu em 55% da LT, a tensão secundária do TPC IEEE foi utilizada e os valores de δ foram de 15° , 25° e 40° .

Já a Figura 5.102 apresenta uma implementação da tensão de restrição para os casos da Figura 5.101. Das figuras pode-se afirmar sobre a tensão de operação que, aumentando-se o valor de δ verifica-se um decaimento do valor desta tensão, sem no entanto alterar seu ângulo de fase. Já em relação à tensão de restrição, verifica-se que o aumento do valor de δ ocasiona uma redução do valor máximo e um defasamento no tempo, atrasando a tensão de restrição. Sabendo que a tensão proveniente do TPC IEEE está atrasada em relação à tensão primária e que, conseqüentemente, a tensão de restrição também estará, pode-se inferir que para os casos onde o valor de δ são maiores ou iguais à 25° a tensão de operação do TPC IEEE é capaz de superar a tensão de restrição para os casos sobrealcançados, diferente da tensão de operação proveniente do primário, devido principalmente ao atraso da tensão de restrição.

5.6.1.5 Subalcance Devido às Tensões do TPC IEEE

Diferentemente ao tópico anterior, quando se altera o valor do carregamento para valores de δ negativos, os ensaios com o TPC IEEE apresentam subalcance a partir de $\delta = -5^\circ$ até -20° , conforme apresentado na Figura 5.98. Do tópico anterior, sabe-se que a tensão de operação somente altera seu valor máximo, sem alteração do ângulo de fase. A Figura 5.103 apresenta uma implementação da tensão de restrição para três casos onde a falta ocorreu em 55% da LT, a tensão secundária do TPC IEEE foi utilizada e os valores de δ foram de -15° , -25° e -40° . Nota-se que para este caso, a tensão de restrição está sendo adiantada conforme se diminui o valor de δ , tornando dessa forma mais difícil para a tensão de operação superar a tensão de restrição quando considerados os ensaios do TPC IEEE. Uma análise pontual referente ao caso com carregamento $\delta = -5^\circ$ já foi realizado nas seções anteriores.

Figura 5.101. Comparação entre as tensões de operação para diferentes valores de δ , para uma falta em 55% da LT e uso das tensões do TPC IEEE.



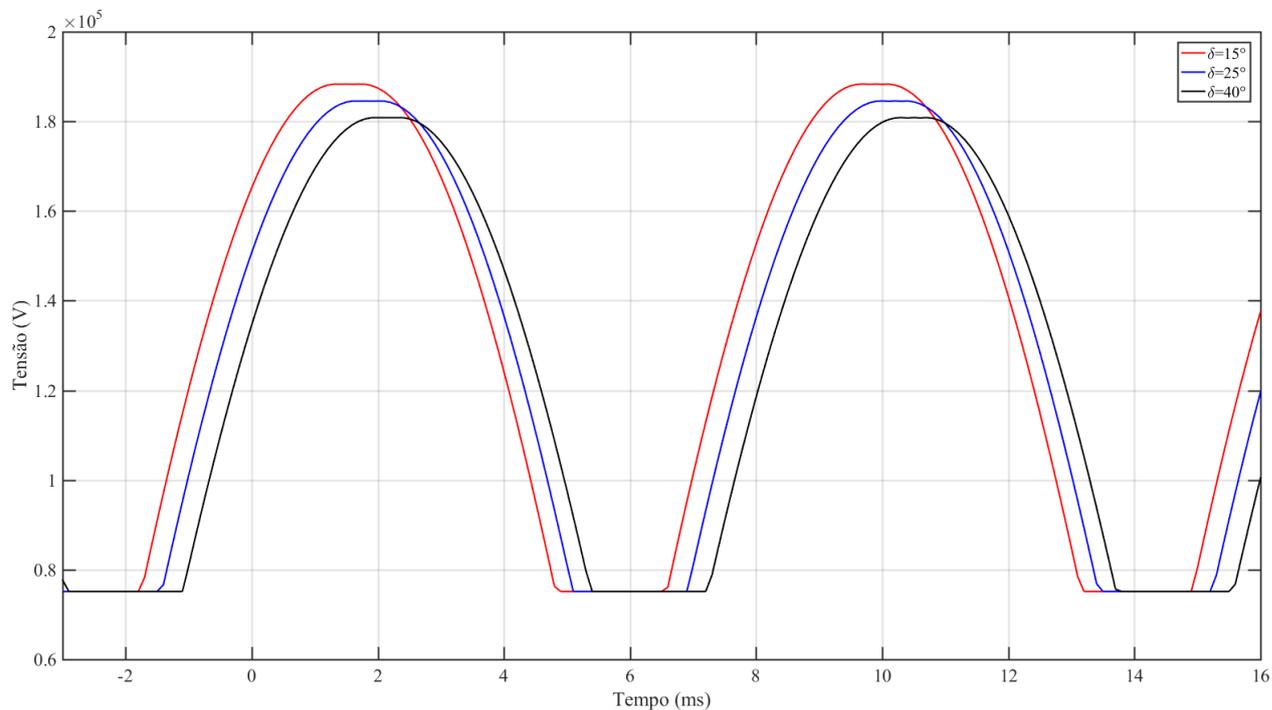
Fonte: Autoria própria.

5.6.1.6 Tempo de Atuação da Função TD21

A Figura 5.104 apresenta os tempos de atuação da função TD21 para cada caso simulado, levando em consideração os resultados obtidos utilizando como tensão de entrada valores primários e secundários provenientes dos TPC estudados. Verifica-se que não ocorreram atuações superiores à 10,1 ms, sendo o menor tempo de atuação igual a 1,5 ms, para o caso com δ igual à -5° e uma falta em 5% da LT, e o caso com maior tempo de atuação para um ensaio δ igual à 35° e uma falta em 65% da LT para um ensaio com uso de tensões do TPC IEEE. Nota-se que novamente tem-se um intervalo de tempo em que não ocorrem atuações.

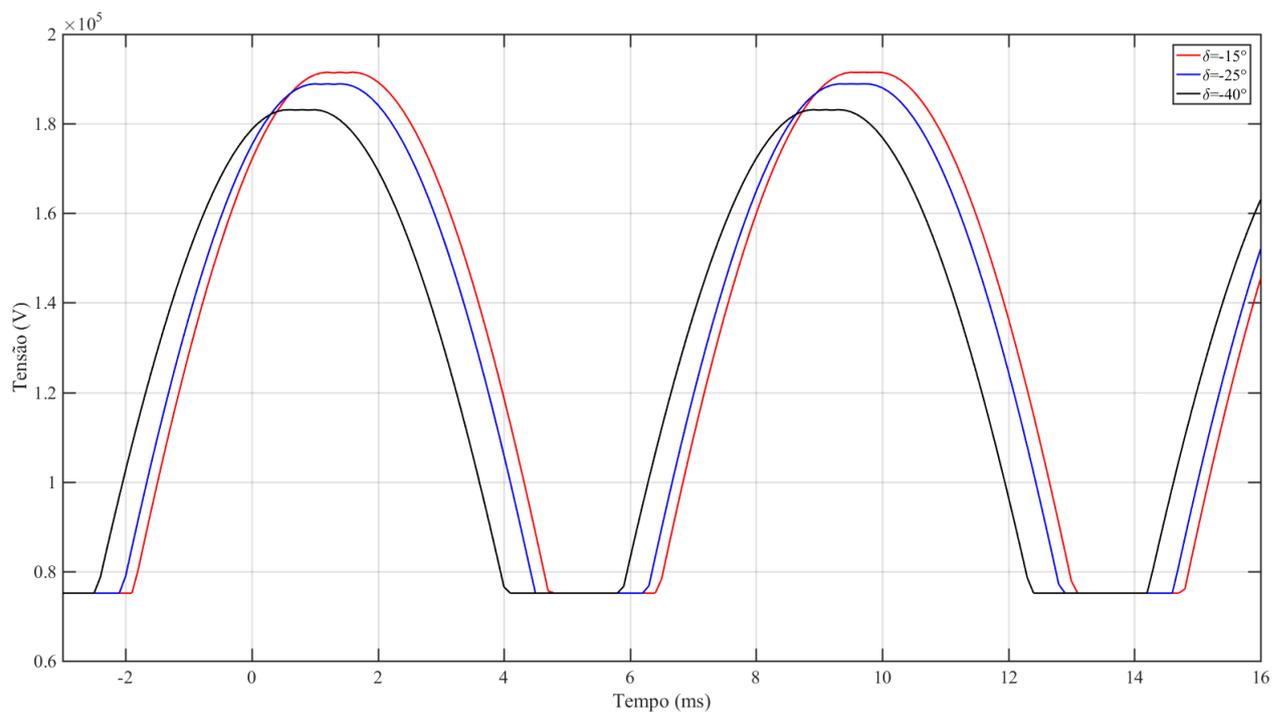
A Figura 5.105 apresenta a comparação entre os tempos de atuação da função TD21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos que utilizaram tensão primária, considerados "valores esperados", e no eixo Y, os resultados obtidos para eventos que utilizaram a tensão secundária dos TPC, considerados "valores obtidos". Nota-se que o TPC IEEE apresenta os resultados mais discrepantes.

Figura 5.102. Comparação entre as tensões de restrição estimada para diferentes valores de δ , para uma falta em 55% da LT e uso das tensões do TPC IEEE.



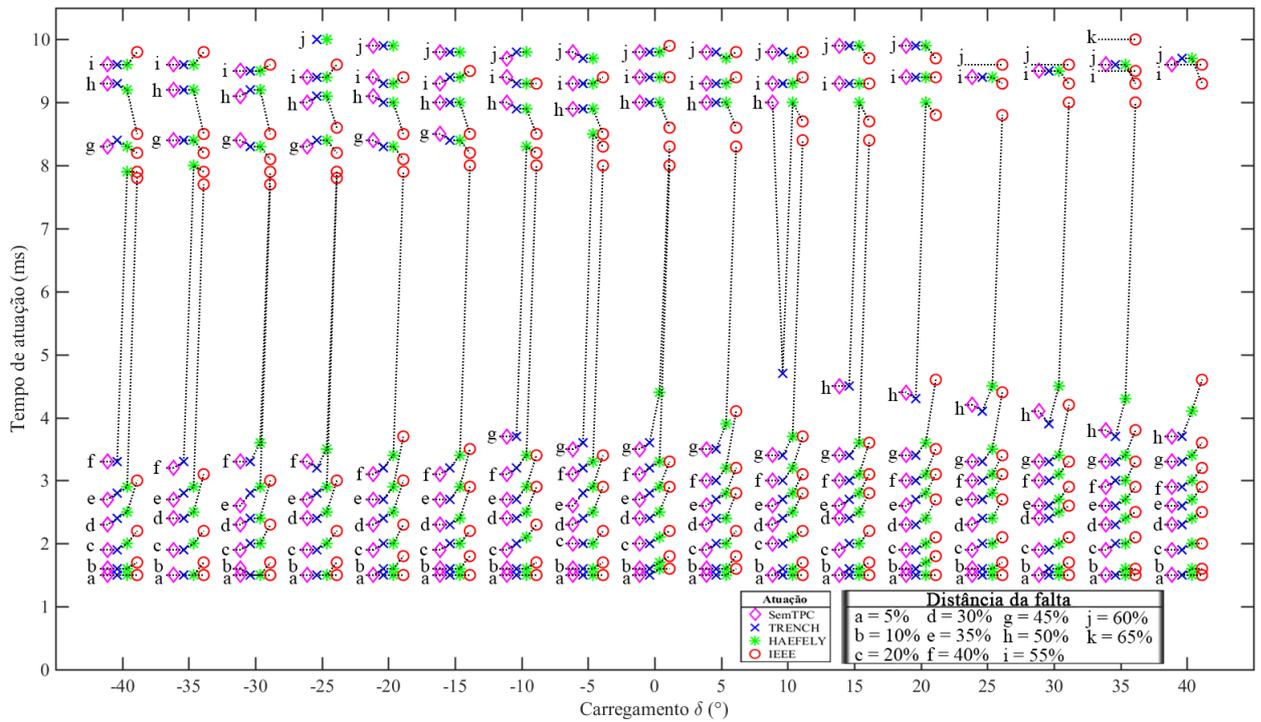
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.103. Comparação entre as tensões de restrição estimada para diferentes valores de δ , para uma falta em 55% da LT e uso das tensões do TPC IEEE.



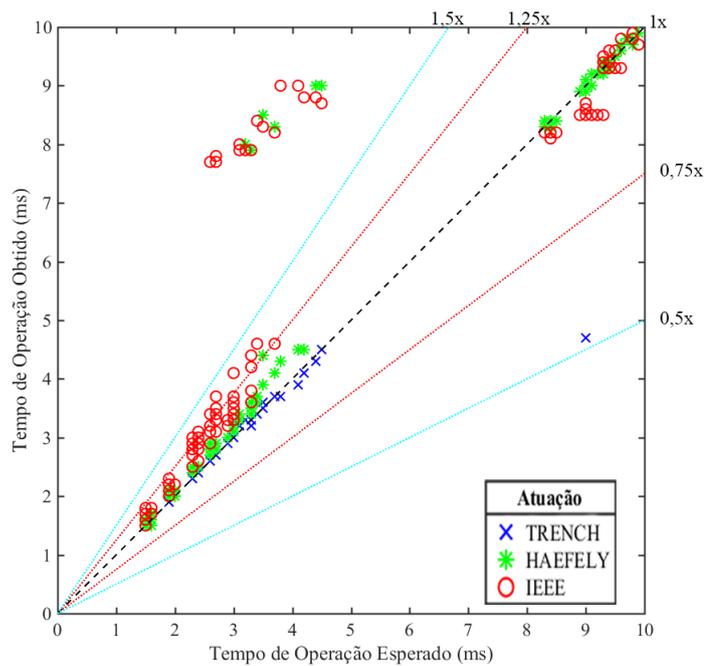
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.104. Tempos de atuação para diferentes valores de carregamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.105. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de carregamento.



Fonte: Autoria própria.

5.6.2 Resultados 411L

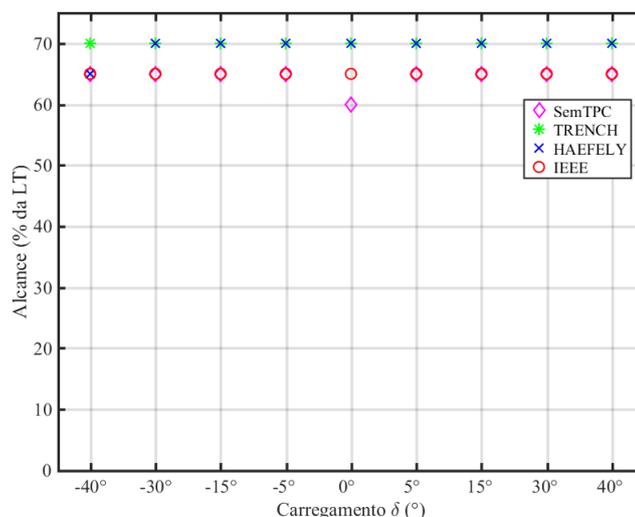
Conforme apresentado anteriormente, as simulações realizadas e ensaiadas utilizando o relé 411L utilizaram a reprodução dos sinais de tensão e corrente através da mala de teste Doble F6150sv, conforme descrito na seção 5.1. Dessa forma, foram coletados os resultados utilizando como valores de entrada as tensões com valores primários e secundários provenientes dos modelos digitais dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE, apresentados no capítulo 4. Dessa forma, foram realizadas as análises pertinentes conforme apresentado adiante.

Novamente, no relé 411L não foram realizados todos os ensaios já executados no relé T400L, escolhendo-se os mais significativos. Dessa forma, foram realizados ensaios considerando um δ de $-40^\circ, -30^\circ, -15^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ e 40° , sem no entanto realizá-los para todos os locais de falta. No entanto, tomou-se o cuidado de realizar os ensaios necessários para verificação do alcance máximo obtido pela função PH21 para todos os casos simulados.

5.6.2.1 Alcance da Função PH21

Com base nos resultados de atuação do relé 411L foi encontrado o alcance máximo obtido para os ensaios utilizando os valores de tensão como entrada, conforme apresentado na Figura 5.106. Neste trabalho, os valores obtidos dos ensaios com a tensão primária são considerados o valor esperado, sendo este o padrão de comparação.

Verifica-se na Figura 5.106 que a alteração do valor do carregamento não altera de forma significativa o alcance obtido. Nota-se, também, que quando comparado o alcance utilizando a tensão primária como valor padrão e as tensões provenientes dos TPC, ocorreram sobrealcance quando do uso da tensão do TPC TRENCH para todos os carregamentos exceto quando δ foi igual à -40° . Já os ensaios com tensão proveniente do TPC HAEFELY sobrealcançaram para todos os casos de carregamento. De outra forma, os ensaios com tensão proveniente do TPC IEEE somente sobrealcançou para o caso onde o δ foi igual à 0° . Não foram verificados casos de subalcance.

Figura 5.106. Alcance obtido para diferentes valores de carregamento.

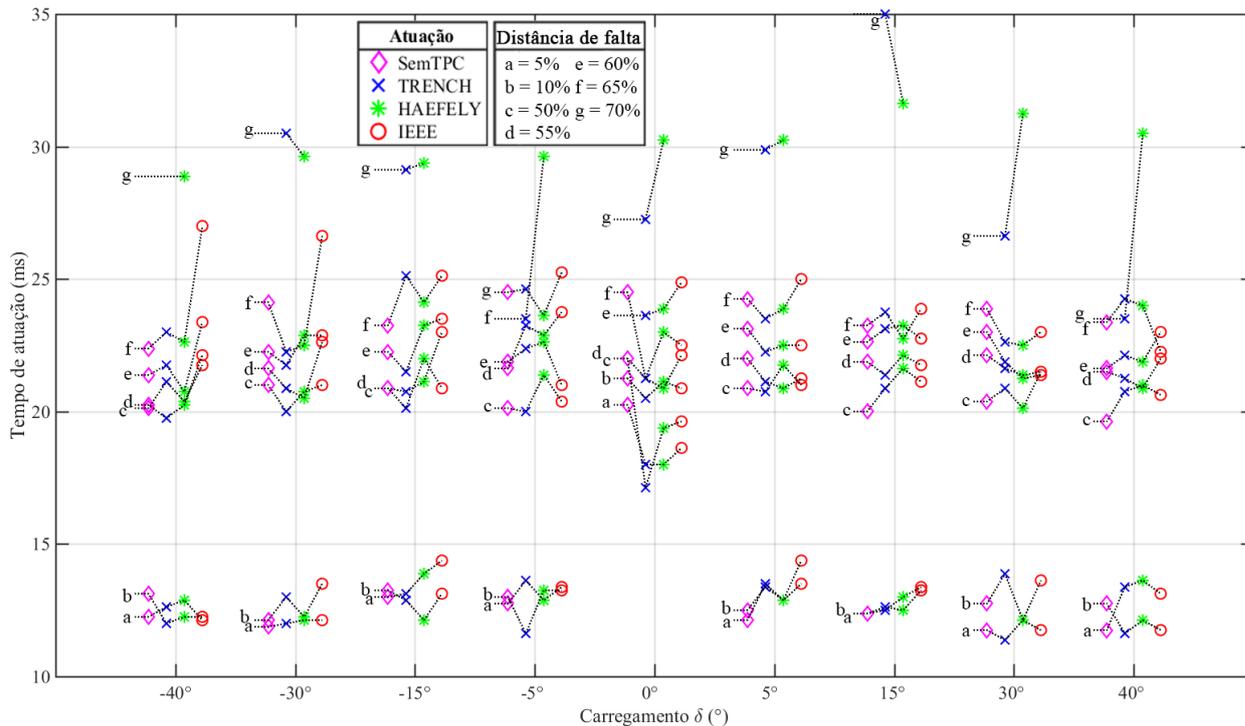
Fonte: Autoria própria.

5.6.2.2 Tempo de Atuação da Função PH21

A Figura 5.107 apresenta os tempos de atuação da função PH21 para os diferentes pontos de falta e resistência de falta utilizando a tensão primária e as tensões provenientes dos TPC. Nota-se que a variação do carregamento não altera de forma significativa os tempos de operação verificados, exceto para o carregamento com $\delta = 0^\circ$, onde são verificados tempos de atuação iniciais da ordem de 20 ms, ante os 12 ms verificados para os demais casos.

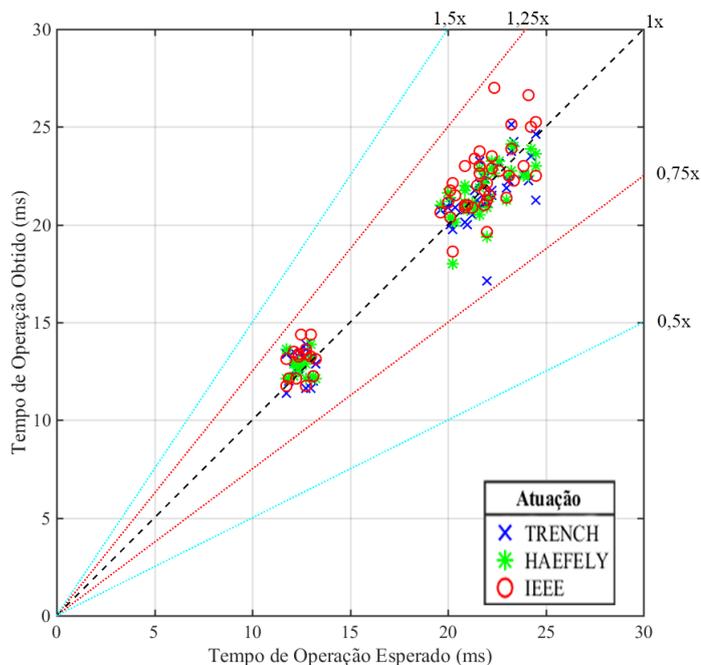
A Figura 5.108 apresenta a comparação entre o tempo de atuação da função PH21 utilizando, no eixo X, os resultados obtidos para eventos com uso da tensão primária, considerados "valores esperados", e os resultados obtidos para eventos com uso da tensão secundária dos TPC, no eixo Y, considerados "valores obtidos". Esta figura permite comparar os tempos de atuação, verificando se os valores obtidos apresentam diferenças em relação aos valores esperados. Verifica-se que os resultados apresentados estão dentro da faixa de 0,75 e 1,25 vezes, quando comparado o tempo de operação obtido e esperado. Conclui-se assim que a resposta transitória dos TPC, quando da variação do carregamento, não ocasiona em diferenças significativas nos tempos de atuação obtidos em relação aos esperados, sendo a função PH21 pouco afetada para este caso.

Figura 5.107. Tempos de atuação para diferentes valores de carregamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.108. Comparação entre os tempos de atuação obtidos e esperados para diferentes valores de carregamento.



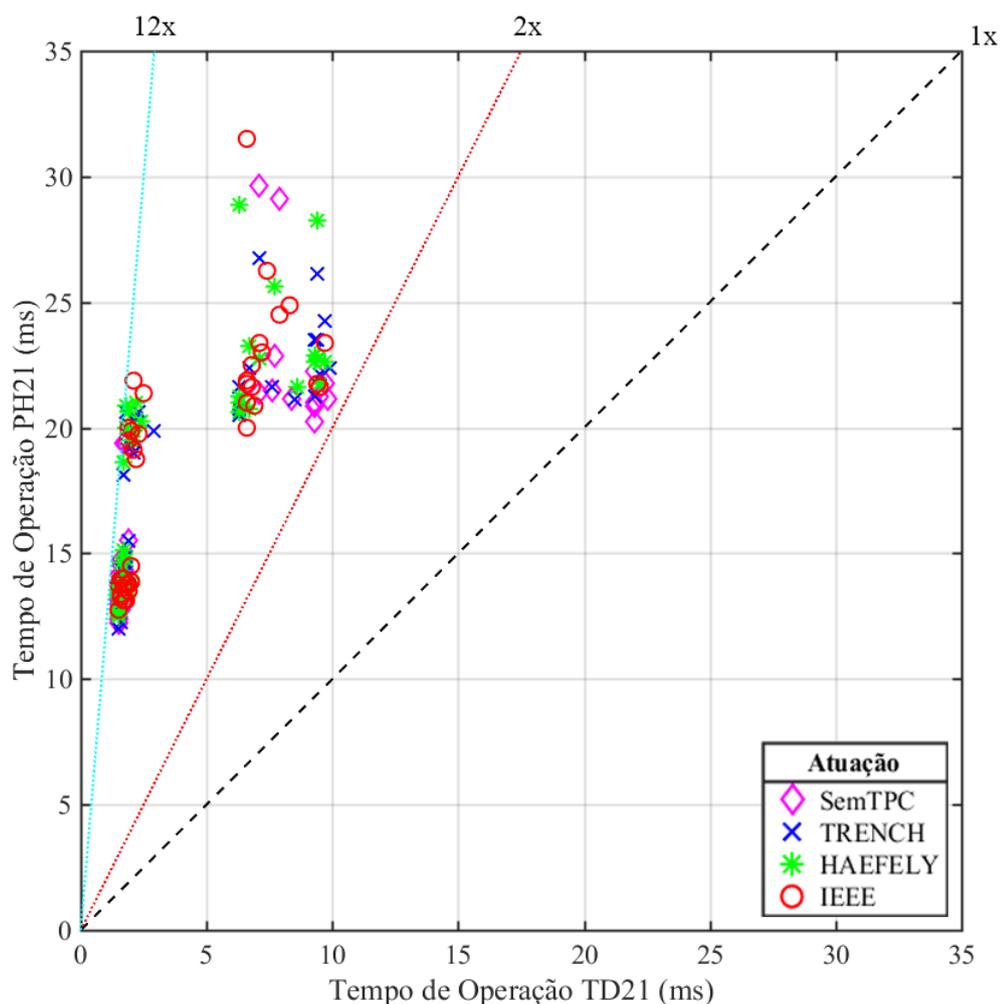
Fonte: Autoria própria.

5.7 AVALIAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para os estudos propostos neste trabalho, foram obtidos os tempos de atuação das funções TD21 e PH21. Para tanto, em cada cenário simulado, foram utilizadas as tensões primárias e secundárias provenientes dos TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE para realização dos ensaios nos relés SEL-T400L e SEL-411L. Diante dos resultados obtidos foram comparados os tempos de operação da função TD21 e PH21 para cada cenário.

A Figura 5.109 apresenta a comparação entre os tempos de operação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de resistência de falta, conforme apresentado na seção 5.3.

Figura 5.109. Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de resistência de falta.



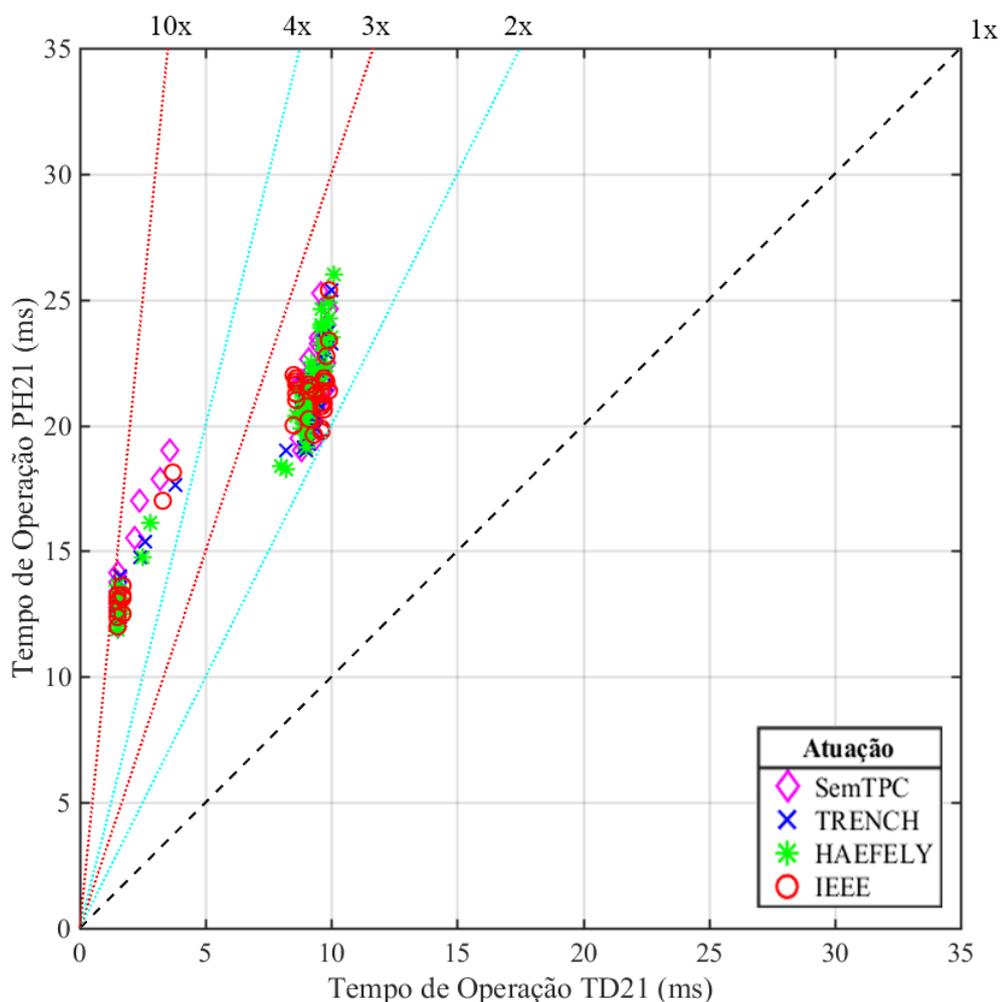
Fonte: Autoria própria.

Nota-se da Figura 5.109 que os tempos de atuação da função PH21 são superiores aos

da função TD21 para todos os casos apresentados, conforme o esperado. Grande parte dos resultados se concentra na área onde os tempos de operação da função PH21 são até 12 vezes maiores que o tempo de operação da função TD21. De forma geral, os resultados da função PH21 estão entre 2 e 12 vezes os resultados da função TD21. Desta forma, para a variação da resistência de falta, os tempos de operação da função TD21 são até 12 vezes mais rápidos que os da função PH21, sendo que em nenhum momento a função TD21 é mais lenta que a PH21.

Na Figura 5.110 são comparados os tempos de operação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de SIR das fontes 1 e 2, conforme apresentado na seção 5.4.

Figura 5.110. Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de SIR das fontes 1 e 2.



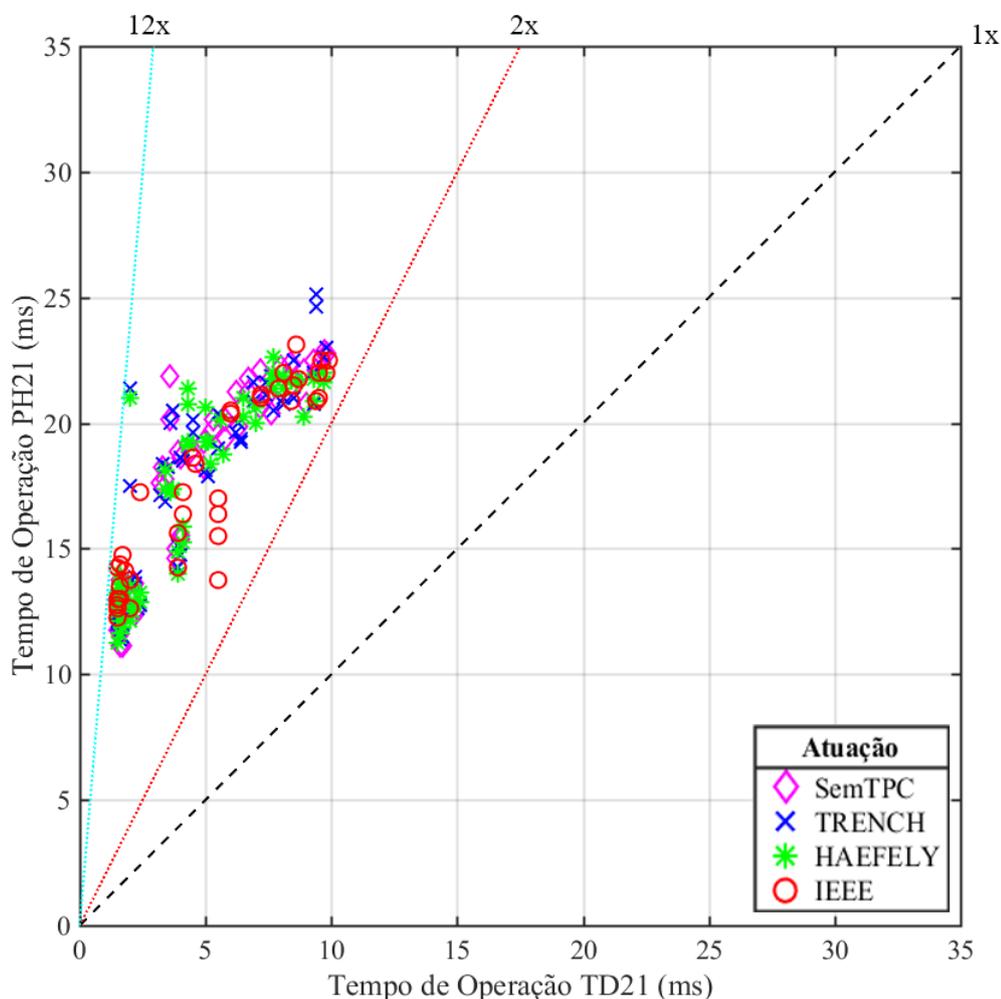
Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.110 apresenta tempos de operação da função PH21 entre 2 e 10 vezes superiores aos tempos de operação da função TD21. Nota-se que a maioria dos resultados está na região

que apresenta diferenças de 2 a 3 vezes, sendo o restante dos resultados concentrado na região com tempos de operação da função PH21 entre 4 e 10 vezes o tempo de atuação da função TD21. Sendo assim, para a variação do SIR das fontes 1 e 2 pode-se afirmar que a função TD21 é até 10 vezes mais rápida que a PH21, porém, em geral, pode-se afirmar que a função TD21 é ao menos 2 vezes mais rápida que a PH21.

Na Figura 5.111 verifica-se a comparação entre os tempos de operação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores do ângulo de incidência, conforme apresentado na seção 5.5.

Figura 5.111. Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de ângulo de incidência θ .



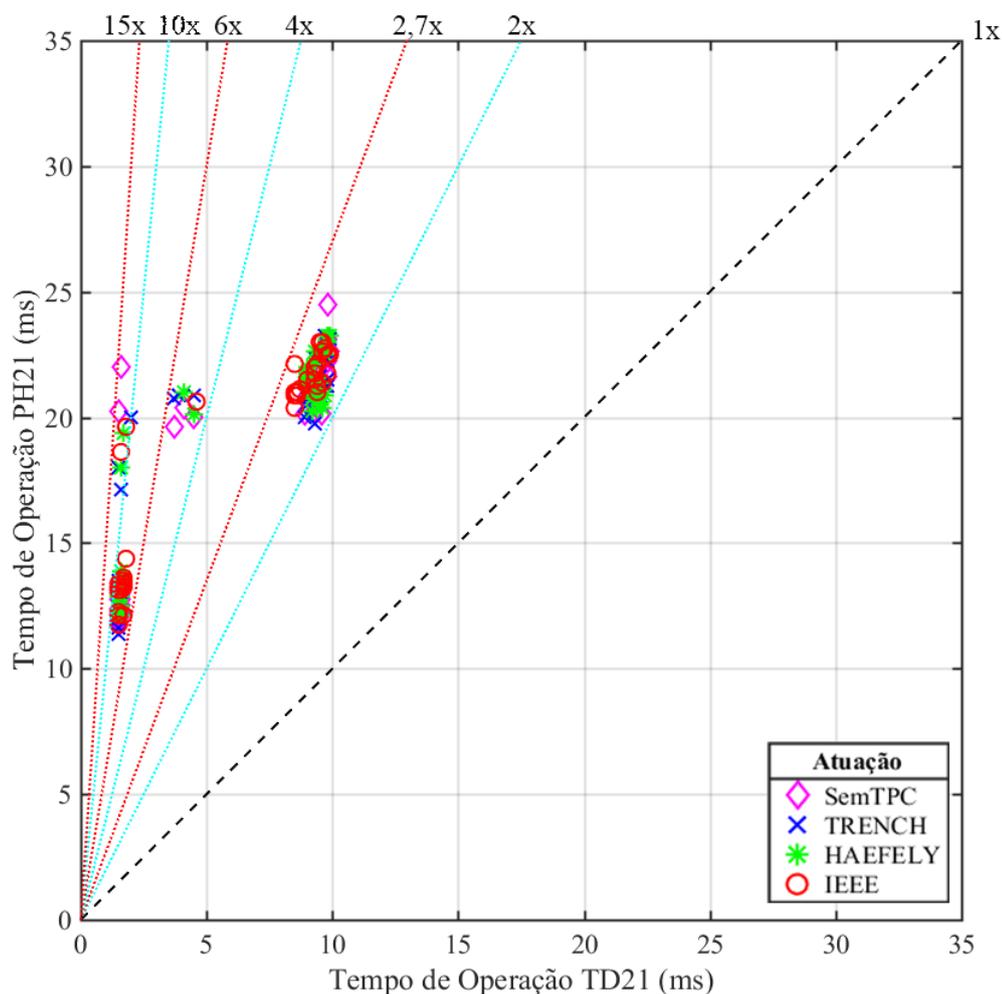
Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados na Figura 5.111 mostram que as diferenças entre a função TD21 e PH21 estão entre 2 e 12 vezes, com os resultados apresentando uma dispersão por todo este intervalo. Pode-se contudo, afirmar que existe uma pequena concentração dos resultados na

região onde a função PH21 apresenta tempos de operação 12 vezes superiores aos da função TD21.

Por fim, a Figura 5.112 apresenta a comparação entre os tempos de operação das funções TD21 e PH21 para diferentes valores de carregamento da linha protegida, conforme apresentado na seção 5.6.

Figura 5.112. Comparação entre os tempos de atuação das funções TD21 e PH21 para diferentes condições de carregamento.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se na Figura 5.112 quatro regiões em que as atuações da função PH21 apresenta tempos de operação maiores que a função TD21, entre 2 e 2,7 vezes, entre 4 e 6 vezes, entre 6 e 10 vezes e entre 10 e 15 vezes. Nota-se que os resultados se concentram nas regiões entre 2 e 2,7 vezes e 6 e 10 vezes. Dessa forma, pode-se afirmar que a função TD21 é no mínimo 2 vezes mais rápida que a função PH21, chegando a ser até 15 vezes mais rápida, quando tem-se

a variação do carregamento.

5.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados encontrados durante a elaboração deste trabalho, bem como realizada a análise destes dados. Para os ensaios realizados verificou-se que o uso da tensão secundária proveniente do TPC ocasionou diferenças no alcance e nos tempos de operação das funções de proteção de distância no domínio do tempo e fasorial. Quando comparados os tempos de atuação da função de proteção de distância no domínio fasorial e no domínio do tempo, verificou-se que a segunda apresentou tempos de operação sempre inferiores à primeira, demonstrando a vantagem de se utilizar elementos ultra-rápidos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho apresentou-se uma análise da influência de TPC sobre as funções de proteção TD21 e PH21. O Capítulo 1 apresentou uma contextualização do tema, bem como os objetivos do trabalho, e as publicações decorrentes do trabalho realizado. No Capítulo 2 foi apresentada uma revisão bibliográfica descrevendo trabalhos que apresentam relevância em relação à influência da resposta transitória dos TPC em funções de proteção no domínio fasorial e do tempo. No Capítulo 3, abordou-se a fundamentação teórica destas funções de proteção. Já no Capítulo 4, foi apresentado o embasamento teórico acerca da construção dos TPC bem como os fatores que proporcionam maior influência na resposta transitória dos mesmos. Também foram apresentados os modelos digitais dos TPC utilizados para as simulações e ensaios realizadas neste trabalho, a saber: TPC TRENCH, HAEFELY e IEEE de 230 kV/60 Hz. Por fim, os resultados obtidos foram apresentados no Capítulo 5.

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o uso das tensões secundárias dos diferentes TPC estudados alteram a resposta das funções de proteção de distância, tanto no domínio do tempo como no da frequência. Em relação à variação da resistência de falta, verificou-se que o alcance da função TD21 foi afetado com a variação do parâmetro de teste. Já em relação às diferenças apresentadas pelo uso das tensões secundárias foram verificados eventos de sobre e subalcançe, considerando o alcance obtido pelo ensaio com tensão primária como o padrão de comparação, para os TPC HAEFELY e IEEE, sendo os resultados mais afetados os do TPC IEEE. Contudo, o TPC TRENCH não apresentou diferenças em relação ao alcance obtido pela função TD21. Destaca-se que apesar de o alcance ajustado ser de 70% da LT, os resultados obtidos foram de no máximo 60% da LT. Os tempos de atuação da função TD21 também foram impactados pelo uso das tensões secundárias, sendo que na maioria dos ensaios quando utilizada as tensões secundárias, os tempos de operação verificados foram superiores

aos tempos de operação obtidos quando do uso de tensões primárias. A função PH21 também foi afetada pela variação do parâmetro de teste, tendo seu alcance alterado para os diversos ensaios realizados. Quando utilizadas as tensões secundárias dos TPC, considerando o alcance obtido pelo ensaio com tensão primária como o padrão de comparação, foram verificados eventos de sobre e subalcance. Os tempos de atuação da função PH21 também foram afetados pelo uso das tensões secundárias, sendo na maioria dos casos obtidos tempos de atuação superiores aos verificados com o uso de tensões primárias. O alcance máximo verificado para a função PH21 foi de 65% quando do uso das tensões primárias e secundárias do TPC IEEE e 70% para ensaios com tensões secundárias do TPC TRENCH e HAEFELY. O alcance ajustado para esta função também era de 70% de cobertura da LT. Novamente, os resultados mais afetados foram os apresentados pelo uso das tensões secundárias do TPC IEEE. Verificou-se que o alcance da função PH21 foi o mais afetado, tanto pela variação do parâmetro de teste, quanto pelo uso das tensões secundárias dos TPC, sendo o alcance da função TD21 superior ao da função PH21 para eventos com resistência de falta maiores que 45Ω . Em todos os casos ensaiados o tempo de operação da função PH21 é superior ao da função TD21, chegando a ser até 12 vezes maior. Dessa forma, mostrou-se que as funções de proteção TD21 e PH21 são afetadas pelo uso das tensões secundárias dos TPC quando realizada a variação da resistência de falta, sendo a função PH21 a mais afetada.

Para variação do SIR, verificou-se na função TD21 uma grande variação do alcance com o aumento do parâmetro avaliado para a fonte local, com eventos atuando para um alcance de 45% e 20% quando do uso das tensões primárias e secundárias do TPC IEEE, respectivamente. Também foram verificados diversos eventos de sobre e subalcance para todos os TPC avaliados, considerando o alcance obtido pelo ensaio com tensão primária como o padrão de comparação. O alcance máximo obtido pela função TD21 foi de 60% da LT, sendo que o alcance ajustado foi de 70%. Também foram verificadas diferenças nos tempos de atuação da função TD21 quando utilizadas as tensões secundárias dos TPC, sendo obtidos na maioria dos casos tempos de atuação maiores que os esperados. Já a função PH21 não foi tão afetada quanto a função TD21, quando verificado o alcance máximo obtido. Porém, o uso das tensões secundárias dos TPC ocasionaram diversas diferenças no alcance máximo da função PH21. O menor alcance obtido foi de 60% e o maior de 70%. Os resultados apresentados mostram que os tempos de atuação da função PH21 não foram tão afetados pelo uso das tensões secundárias do TPC, sendo

na maioria dos casos obtidos tempos de atuação superiores aos obtidos com tensão primária. Nesta avaliação, verificou-se que o alcance da função TD21 foi o mais afetado com a variação do parâmetro de teste e também pelo uso das tensões secundárias dos TPC. Para todos os casos ensaiados, o alcance da função PH21 foi superior ao da função TD21, porém em relação ao tempo de atuação, a função TD21 foi mais rápida em todos os ensaios realizados, sendo até 12 vezes mais rápida. Diante dos resultados nota-se que as funções avaliadas foram afetadas pelo uso das tensões secundárias dos TPC e pela variação do SIR, tendo a função TD21 os resultados mais afetados.

Quando avaliada a variação do ângulo de incidência, verificou-se na função TD21 uma pequena variação nos alcances obtidos. Porém, foram obtidos eventos de sobre e sub alcance, considerando o alcance obtido pelo ensaio com tensão primária como o padrão de comparação. Os resultados mais discrepantes foram os obtidos quando do uso das tensões secundárias do TPC IEEE, sendo subalcançado em praticamente todos os eventos. Novamente, o alcance máximo obtido pela função TD21 foi de 60% da LT. Em relação aos tempos de atuação, foram constatadas diferenças quando do uso das tensões secundárias dos TPC, sendo que os valores obtidos para o TPC IEEE foram consideravelmente superiores aos esperados. A função PH21 apresentou maior variação em relação ao alcance máximo obtido quando alterado o ângulo de incidência da falta. Foram verificados valores entre 70% e 55% da LT. Considerando o alcance obtido pelo ensaio com tensão primária como o padrão de comparação, foram verificados eventos de sobre e subalcanço quando utilizada a tensão secundária dos TPC, sendo os casos mais discrepantes os do TPC IEEE. Os tempos de atuação da função PH21 foram levemente afetados pelo uso das tensões secundárias dos TPC, sendo os resultados do TPC IEEE os que apresentaram maiores diferenças. Em todos os casos avaliados o alcance máximo obtido para a função PH21 foi igual ou superior ao obtido para a função TD21. No entanto, os tempos de atuação foram sempre inferiores, chegando a valores até 12 vezes maiores para os tempos da função PH21. Demonstrou-se assim, que as tensões secundárias e a variação do ângulo de incidência da falta afetam os resultados das funções TD21 e PH21.

Por fim, quando avaliada a variação do carregamento, verificou-se uma pequena variação nos alcances obtidos para ambas as funções avaliadas. A função TD21 apresentou alcances entre 55% e 65% da LT, já a função PH21 apresentou alcances máximos entre 60% e 70%

da LT. Para todos os casos avaliados, a função PH21 apresentou alcance igual ou superior ao obtido pela função TD21. Em relação aos eventos de sub e sobre alcance quando utilizadas as tensões secundárias dos TPC, verificou-se que a função PH21 apresentou ocorrências em todos os eventos, diferente da função TD21, que apresentou ocorrências somente em parte dos eventos. Para a função TD21, os eventos com tensão do TPC IEEE foram os mais afetados e para a função PH21 os eventos com tensão dos TPC TRENCH e HAEFELY foram os mais afetados. Os tempos de operação obtidos apresentaram maior discrepância para a função TD21, sendo o TPC IEEE o mais discrepante em ambas as funções. A comparação entre os tempos de atuação da função PH21 e TD21 mostrou que em todos os casos a função TD21 obteve atuações com tempo inferior, chegando a ser até 15 vezes mais rápida.

Dos resultados obtidos, demonstrou-se por meio de testes em relés micro-processados reais que o uso de TPC pode afetar os resultados das funções de proteção baseadas nas análises de fasores ou de valores instantâneos no domínio do tempo, sendo eles os tempos de operação e o alcance máximo. Dessa forma, conclui-se que os TPC alteram o desempenho das funções de proteção avaliadas, embora não comprometam de forma significativa o desempenho destas funções, sendo, no entanto, a função de distância no domínio do tempo a mais influenciada. Mesmo diante da influência que os TPC ocasionam sobre a função de proteção TD21, de uma forma geral, nota-se que esta função cumpre o papel de redução nos tempos de operação.

Diante do exposto, propõe-se para trabalhos futuros:

- Devido a quantidade de dados e simulações necessárias, neste trabalho foram analisadas apenas faltas monofásicas. Dessa forma, é importante a avaliação de outros tipos de falta, sendo proposta uma avaliação da influência dos TPC sobre o desempenho das funções de proteção TD21 e PH21 para cenários com faltas bifásicas, bifásicas terra e trifásicas;
- O sistema analisado neste trabalho foi modelado como uma linha simples. Sabe-se que linhas compensadas são amplamente utilizadas, sendo interessante uma avaliação da influência dos TPC sobre o desempenho das funções de proteção TD21 e PH21 para linhas compensadas;
- Linhas de circuito duplo também são bastante utilizadas no sistema elétrico, pois possibilitam o uso compartilhado das torres de transmissão entre dois circuitos. Sabe-se que para estes casos existe um forte acoplamento entre os circuitos, sendo importante uma

avaliação da influência dos TPC sobre o desempenho das funções de proteção TD21 e PH21 para linhas de circuito duplo;

- Por fugir do escopo proposto no trabalho, somente as proteções TD21 e PH21 foram avaliadas. Porém, é interessante avaliar a influência dos TPC sobre o desempenho de outras funções de proteção disponíveis nos relés T400L e 411L;
- Além da resposta em frequência do TPC, outros eventos destes equipamentos podem impactar os elementos de proteção, sendo um estudo importante a avaliação de falhas e características como a ferorrressonância dos TPC e sua influência sobre o desempenho das funções de proteção disponíveis nos relés T400L e 411L;
- Diversos trabalhos apresentam os benefícios da correção da tensão secundária dos TPC, porém são raros ou inexistentes os trabalhos que avaliam esses benefícios para as funções estudadas neste trabalho, ou existentes nos relés reais. Dessa forma, seria interessante avaliar o impacto da correção da tensão secundária dos TPC sobre o desempenho das funções de proteção disponíveis nos relés T400L e 411L;
- Por fim, sugere-se a avaliação da influência dos TPC sobre o desempenho das funções de proteção TD21 e PH21 para faltas evolutivas e em eventos em cascata, pois estes casos podem ocasionar em respostas não esperadas dos TPC e originar eventos não esperados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELL, D.; HOU, D. Input source error concerns for protective relays. In: *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 63–70. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 12.
- ANNABATULLA, J.; YELEMANCHI, D.; SIRISH, T. S. Factors influencing the frequency response of capacitive voltage transformer. *IJAREEIE*, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 7, 11, and 40.
- BADRKHANI AJAEI, F.; SANAYE-PASAND, M.; DAVARPANAH, M.; REZAEI-ZARE, A.; IRAVANI, R. Mitigating the impacts of cvvt subsidence transients on the distance relay. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 2, p. 497–505, April 2012. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 12.
- BENMOUYAL, G.; ZIMMERMAN, K. Experience with subcycle operating time distance elements in transmission line digital relays. In: *37th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 18.
- CAMARGO, M. D. C. *Metodologia para modelagem de transformadores de potencial indutivos e capacitivos para estudos de transitórios em altas frequências*. 94 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, ago. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 11.
- CAMPOS, A. K. X.; JÚNIOR, D. F.; NASCIMENTO, J. P.; A. NEVES, W. L. Influência dos erros transitórios apresentados pelos tc e tpc na atuação de um relé de distância. In: *2015 XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 12.
- CARVALHO JR., A. V. D. *Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivos e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para Minimizar Falhas*. 226 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, ago. 2008. Citado 12 vezes nas páginas 5, 6, 11, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, and 45.
- COMMITTEE, I. P. S. R. Emtp reference models for transmission line relay testing. In: . [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 47.
- COSTELLO, D.; ZIMMERMAN, K. Cvt transients revisited - distance, directional overcurrent, and communications-assisted tripping concerns. In: *2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 40.
- D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; FILHO, O. K.; MORAIS, S. A. *Equipamentos elétricos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão*. [S.l.]: FURNAS, 1985. Citado 3 vezes nas páginas 37, 39, and 40.

- DAQING HOU; ROBERTS, J. Capacitive voltage transformer: transient overreach concerns and solutions for distance relaying. In: *Proceedings of 1996 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 1, p. 119–125 vol.1. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 12.
- FERNANDES JR., D.; A. NEVES, W. L.; A. VASCONCELOS, J. C.; GODOY, M. V. Comparisons between lab measurements and digital simulations for a coupling capacitor voltage transformer. In: *2006 IEEE/PES Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 11.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. USA: Cengage Learning, 2010. Citado na página 139.
- GRAY, S.; HAAS, D.; MCDANIEL, R. Ccvr failures and their effects on distance relays. In: *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–13. ISSN 2474-9753. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 12.
- GUZMAN, A.; SKENDZIC, V.; ETERRNOD, J.; MORALES, R. Directional elements - how fast can they be? *44th Annual Western Protective Relay Conference*, 10 2017. Citado 5 vezes nas páginas 2, 22, 25, 26, and 27.
- KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; MYNAM, M. V.; TAYLOR, D. Practical setting considerations for protective relays that use incremental quantities and traveling waves. In: *2017 Southern African Power System Protection and Automation Conference*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 12.
- KUNDUR, P.; BALU, N.; LAUBY, M. *Power System Stability and Control*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 1994. (Discussion Paper Series). ISBN 9780070359581. Citado na página 1.
- LIMA, M. M. M. *Alguns fatores afetando o desempenho de relés de distância*. 170 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, set. 2006. Citado na página 55.
- LOPES, F.; SILVA, K. M.; RIBEIRO, J. P. G.; BAINY, R. G. Avaliação da influência dos tpcs sobre o desempenho de funções de proteção baseadas no domínio do tempo. *XIII Seminário Técnico de Proteção e Controle*, 2016. Citado na página 2.
- MAMEDE FILHO, J. *Manual De Equipamentos Elétricos*. [S.l.]: LTC, 2013. ISBN 9788521622116. Citado na página 36.
- METZGER, N.; CARSTENS, B.; HELENIK, F. Practical experience with ultra-high-speed line protective relays. *45th Annual Western Protective Relay Conference*, 10 2018. Citado 5 vezes nas páginas iv, 10, 12, 34, and 35.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *SINDAT - Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do*. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Citado na página 38.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. S. An improved voltage phasor estimation technique to minimize the impact of ccvt transients in distance protection. In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 454–457. ISSN 0840-7789. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 12.

- PORTELA, C.; CÂMARA, A.; GONÇALVES, R.; GUIMARÃES, M.; OLIVEIRA, O.; TAVARES, M. C. Estudos de religamento monofásico - pesquisa e desenvolvimento de modelo do arco secundário. In: . [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 50.
- REIS, R. L. A.; NEVES, W. L. A.; LOPES, F. V.; JUNIOR, D. F. Coupling capacitor voltage transformers models and impacts on electric power systems: A review. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 1–1, 2019. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 12.
- SAADAT, H. *Power System Analysis*. 1. ed. USA: MCGRAW-HILL COMPANIE, 2009. Citado na página 139.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B. Distance protection: Why have we started with a circle, does it matter, and what else is out there? In: *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–19. ISSN 2474-9753. Citado 9 vezes nas páginas 2, 10, 12, 14, 21, 22, 28, 29, and 30.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMAN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2015*, p. 448–461, 05 2015. Citado 6 vezes nas páginas 1, 2, 14, 23, 26, and 27.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–17. Citado 7 vezes nas páginas iv, 2, 9, 10, 12, 26, and 33.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; SKENDZIC, V. Defining and measuring the performance of line protection relays. In: *70th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, April 2016*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 10, 12, and 56.
- SCHWEITZER, E. O.; ROBERTS, J. Distance relay element design. *46th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 04 1993. Citado 2 vezes nas páginas 21 and 22.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *Application Guide - Testing the High-Speed Mho Elements in the SEL-411L and SEL-421*. Pullman, WA, U.S.A., 2018. Disponível em: <<https://selinc.com/literature/application-guides/?title=SEL-411L>>. Citado na página 18.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-411L Advanced Line Differential Protection, Automation, and Control System. Instruction Manual*. Pullman, WA, U.S.A., 2018. Disponível em: <<https://selinc.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 and 22.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *SEL-T400L Ultra High Speed Transmission Line Relay Traveling Wave Fault Locator High Resolution Event Recorder. Instruction Manual*. Pullman, WA, U.S.A., 2018. Disponível em: <<https://selinc.com/>>. Citado 6 vezes nas páginas 28, 30, 31, 32, 33, and 55.
- SCHWEITZER, I. E.; HOU, D. Filtering for protective relays. In: . [S.l.: s.n.], 1993. p. 15 – 23. ISBN 0-7803-1319-4. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 15.
- SHARMA, S.; MYNAM, M. V. Field experience with an ultra-high-speed line relay and traveling-wave fault locator. *45th Annual Western Protective Relay Conference*, 10 2018. Citado 5 vezes nas páginas iv, 9, 12, 33, and 34.

- SILVA, C. A. D. *Filtros Digitais Recursivos para Redução do Impacto da Resposta Transitória do TPC*. 81 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 6, 11, 36, and 39.
- SILVA, K. M. E. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009. Citado 6 vezes nas páginas 14, 16, 17, 18, 20, and 21.
- THOMPSON, M. J.; SOMANI, A. A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length. In: *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 833–841. Citado na página 79.
- VASCONCELOS, J. C. R. S. D. A.; NEVES, W. L. A. Subsídios para modelagem de transformadores de potencial capacitivos em função da frequência. In: *XVII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 6 and 11.