

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**Efeitos da Representação da Rede em Estudos de
Extinção de Arco Secundário em Linhas de
Transmissão de Potência Natural Elevada**

Igor de Paula Cardoso

Itajubá-MG, 04 de Dezembro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Igor de Paula Cardoso

**Efeitos da Representação da Rede em Estudos de
Extinção de Arco Secundário em Linhas de
Transmissão de Potência Natural Elevada**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:
Prof. Ph.D. Benedito Donizeti Bonatto

Co-Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Ferreira

Itajubá-MG, 04 de Dezembro de 2018



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Título da Dissertação: **“Efeitos da Representação da Rede em Estudos de Extinção de Arco Secundário em Linhas de Transmissão de Potência Natural Elevada”**

Autor: **Igor de Paula Cardoso**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
(2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito final: A, ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 04 de dezembro de 2018.

Airton Violin

2º Examinador - UNIFEI

Cláudio Ferreira

3º Examinador (Coorientador) - UNIFEI

Benedito Denizeti Bonatto

4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

DEDICATÓRIA

*A Deus, por tudo que fez e faz em minha vida;
À minha família, minha missão e vocação;
A meu avô Osmar.*

“Não se vendem dois pardais por uma moedinha? No entanto, nenhum deles cai no chão sem o consentimento do vosso Pai. Quanto a vós, até os cabelos da cabeça estão todos contados. Não tenhais medo! Vós valeis mais do que muitos pardais”

Mateus, 10:29-31

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jesus Cristo - Caminho, Verdade e Vida, pelos dons a mim concedidos. Por ser o guia nas estradas da vida, antes mesmo que eu pudesse ter ciência disso.

À minha digníssima esposa, Ana Carolina, através de quem eu passei a enxergar um novo sentido para minha vida. Companheira com quem compartilho momentos, decisões e aventuras na vivência diária do Matrimônio. Obrigado pela paciência, especialmente nos momentos de ausência e cansaço devido à elaboração deste trabalho.

À minha filha, recém chegada, Ana Helena, quem aviva ainda mais os meus dias com um novo chamado de crescimento no amor.

À minha família que desde a infância esforçou-se para que eu pudesse ter uma boa educação, por vezes com grandes sacrifícios. Esta conquista enaltece ainda mais cada gota de suor e preocupação de cada um de vocês nesse objetivo. Muito obrigado.

À família de minha esposa, que passei a fazer parte há mais de seis anos e fui, desde o princípio, acolhido como filho. O apoio e o exemplo de vocês foram e são fundamentais em minha vida.

Ao Prof. Bonatto, que mais uma vez contribui de forma direta na minha formação técnica e humana. Seu incentivo e confiança são de grande fortalecimento para mim. Ao Prof. Cláudio pelos ensinamentos transmitidos desde que nos conhecemos, ainda na graduação.

Meus sinceros agradecimentos a todos meus professores da minha querida Universidade Federal de Itajubá, aos professores que tive a sorte de ter sido aluno ao longo da vida e aos bons amigos que fiz até hoje e que muito contribuíram para meu amadurecimento.

À TSE por ter viabilizado minha participação no mestrado ainda em 2015. Em especial ao Eng. Rogério Régis pelos preciosos ensinamentos ao longo de 3 anos de convívio.

Aos companheiros da EGI do ONS, em especial aos Eng. Hélio Pessoa e Thiago Ferreira, cujas contribuições foram fundamentais para conclusão deste trabalho.

RESUMO

O Projeto Básico de subestações de rede básica é uma das etapas mais importantes de um empreendimento, pois é nele que, através de estudos elétricos de diferentes naturezas, os equipamentos das instalações da Rede Básica são especificados para estarem operando por todo tempo de concessão (via de regra, 30 anos). No projeto, a transmissora deve atender aos itens definidos no anexo técnico do edital do leilão no qual se sagrou vencedora. A prática atual requer que todos os estudos definidos como “Transitórios Eletromagnéticos” sejam realizados com representação da rede pelo critério de duas vizinhanças elétricas, o que pode não ser necessário para todos os estudos, como é o caso da extinção da corrente de arco secundário (requerido como forma de comprovação da possibilidade de aplicação de religamento monopolar em linhas de transmissão). Para confirmar esse entendimento, buscou-se avaliar os efeitos de diferentes modelagens de rede para esse estudo, considerando a rede tal qual é exigida nas diretrizes vigentes e com representações simplificadas como: utilizando cargas fictícias (usualmente utilizadas por consultoras), equivalentes Thèvenin e até mesmo barras infinitas. Elas foram avaliadas considerando uma linha de transmissão 500 kV base e sob diversas variações de características da própria linha e do sistema em que se conecta. São apresentados e discutidos os resultados associados a cada uma dessas representações, buscando confirmar a possibilidade de utilizar uma modelagem mais simplificada. Compararam-se ainda os resultados obtidos da modelagem simplificada com um estudo de extinção de arco secundário de um projeto real, já aprovado e em operação. Ademais, com os resultados obtidos foram estudados, de forma resumida, os efeitos de diferentes grandezas que interferem na extinção do arco secundário para uma estrutura de SIL (*Surge Impedance Loading*) elevado, cada vez mais aplicada no SIN (Sistema Interligado Nacional), a fim de verificar o efeito de cada uma delas quanto aos atuais critérios de extinção do arco secundário.

Palavras-Chaves: Modelagem da rede, extinção de arco secundário, estudos de projeto básico, religamento monopolar.

ABSTRACT

The basic design of substations of the interconnected system is one of the most important stages of an enterprise since it is when several electric studies are carried out. These studies conclusions lead to the correct equipment specification which should operate suitably at least for 30 years (the usual duration of concessions). The designs done by the utilities must be in accordance with the requirements pointed in the terms of the auction won by the utility. Currently, all studies defined as Electromagnetic Transients should be carried out considering the network represented by the two substation deep criteria, which is not necessary needed for all studies, as for example, the analysis of secondary arc extinction (this study is required to certify that is possible to apply the single pole reclosing in a transmission line). In order to confirm this understanding it was verified the effect of different network modeling in this study, considering the network represented as currently required and simplified representation such as: Thévenin equivalents, fictional loads and infinite buses. It was all done over a 500 kV transmission line with high SIL (Surge Impedance Loading), which is largely applied in transmission expansion nowadays and over several variations on the line and the system characteristics. All results are presented and discussed intending to evaluate if it is possible to adopt simplified approaches and how large are the errors associated to these representations. It was also reproduced an old basic design, which was approved based on the current methodology, with simplified network representation to compare the results. Besides that, based on the results of the evaluations it was presented a summary of the effects of some quantities that influence the secondary arc extinction in the current criteria.

Keywords: Network representation, secondary arc extinction, basic design studies, single pole reclosing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Tipos de sobretensões (IEC 60071-4, 2004).	8
Figura 2-2: Correntes de inrush de energização um transformador de 3 enrolamentos. (a) com histerese, (b) sem não linearidades.	9
Figura 2-3: Sinopse temporal: síntese de equivalentes dependentes da frequência (AZEVEDO, 2010).	12
Figura 2-4: Exemplos de equivalentes de uma ou duas vizinhanças (IEC 60071-4, 2004).	14
Figura 2-5: Equivalentes de Rede Convencionais (IEEE, 1998).	15
Figura 2-6: Circuitos equivalentes e resposta inicial dos transitórios de redes equivalentes simplificadas (a) e redes equivalentes complexas (b) (WG13.05, 1979).	16
Figura 3-1: Natureza Elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão da Rede Básica nos anos de 2014 a 2017 (ONS, 2018).	21
Figura 3-2: Sequência de eventos de um RA.	22
Figura 3-3: Circuito equivalente trifásico da condição de abertura monopolar (ZANETTA Jr., 2003).	26
Figura 3-4: Tipos de extinção de arco secundário (HAUBRICH, H. J. et al., 1974).	27
Figura 3-5: Corrente de arco secundário (I_B) e tensão de restabelecimento (U_w), função do comprimento da LT (HAUBRICH, H. J. et al., 1974).	31
Figura 3-6: Influência da configuração de torre e do tipo de transposição em I_B e V_w (HAUBRICH, H. J. et al., 1974).	32
Figura 3-7: Curva que define a área de alta probabilidade da extinção de arco secundário em tempos inferiores a 500ms – Critério 1. (ONS, 2018).	34
Figura 3-8: Curva indicativa do tempo morto do RA monopolar com relação a magnitude da corrente de arco secundário obtida – Critério 2. (ONS, 2018).	35
Figura 4-1: Rede Modelada para Etapa 1 – Sistema S1-S2.	43
Figura 4-2: Rede Modelada para Etapa 1 – Sistema EQ1-EQ2.	43
Figura 4-3: Etapa 1 – $Z(\square)$ no terminal SA para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).	44
Figura 4-4: Etapa 1 – $Z(\square)(\square)$ no terminal SB para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).	45
Figura 4-5: Etapa 1 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SA para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).	45

Figura 4-6: Etapa 1 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SB para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).....	46
Figura 4-7: Etapa 1 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).	46
Figura 4-8: Etapa 1 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).....	47
Figura 4-9: Etapa 1 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde) – Ajuste 66 Hz.	47
Figura 4-10: Etapa 1 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde) – Ajuste 66 Hz.	48
Figura 4-11: Rede Modelada para Etapa 2 – Sistema S1-S2.....	50
Figura 4-12: Rede Modelada para Etapa 2 – Sistema S1-Carga.	51
Figura 4-13: Etapa 2 – $Z(\square)$ no terminal SA para rede completa (vermelho) e Sistema- Carga RL (verde).....	52
Figura 4-14: Etapa 2 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SB para rede completa (vermelho) e sistema completo – Carga RL (verde).	52
Figura 4-15: Etapa 2 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).	53
Figura 4-16: Etapa 2 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e sistema completo – Carga RL (verde).	53
Figura 4-17: Rede Modelada para Etapa 3 – Sistema S1-S2.....	55
Figura 4-18: Rede Modelada para Etapa 3 – Sistema F1-F2.....	55
Figura 4-19: Etapa 3 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SA para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).....	56
Figura 4-20: Etapa 3 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SB para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).....	57
Figura 4-21: Etapa 1 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).	57
Figura 4-22: Etapa 3 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).....	57
Figura 4-23: Tensão em RMS na fase aberta da LT na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentada no estudo de Projeto Básico.....	62
Figura 4-24: Tensão RMS na fase aberta na faixa de frequência de 56Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede com equivalentes (vermelho) e barras infinitas (verde).....	62

Figura 4-25: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentadas no estudo de Projeto Básico – Terminal Itália (vermelho) e terminal França (verde).....	63
Figura 4-26: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como equivalentes Terminal Itália (vermelho) e terminal França (verde).....	63
Figura 4-27: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como barras infinitas - Terminal Itália (vermelho) e terminal França (verde).	64
Figura 4-28: Tensões na fase aberta em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentadas no estudo de Projeto Básico – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).....	65
Figura 4-29: Tensões na fase aberta em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como equivalentes – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).	65
Figura 4-30: Tensões na fase aberta em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como barras infinitas – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).	66
Figura 4-31: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentadas no estudo de Projeto Básico – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).....	66
Figura 4-32: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como equivalentes – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).	66
Figura 4-33: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como barras infinitas – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).	67
Figura 4-34: TRTs após extinção da corrente de arco secundário na frequência de 60 Hz e reator de neutro 800 Ω apresentadas no estudo de Projeto Básico – Terminal Itália (vermelha) e terminal França (Verde).....	67
Figura 4-35: TRTs após extinção da corrente de arco secundário na frequência de 60 Hz e reator de neutro 800 Ω considerando modelagem da rede como equivalentes – Terminal Itália (vermelha) e terminal França (Verde).	68

Figura 4-36: TRTs após extinção da corrente de arco secundário na frequência de 60 Hz e reator de neutro 800Ω considerando modelagem da rede como barras infinitas – Terminal Itália (vermelha) e terminal França (Verde).	68
Figura 4-37: Relação entre a corrente de arco secundário e o comprimento da LT.	72
Figura 4-38: Relação entre o primeiro pico da TRT após extinção do arco e o grau de compensação da LT.	73
Figura A-1: Distribuição dos GET da Empresa de Planejamento Energético (EPE, 2018).	86
Figura A-2: Cronograma geral de implantação de instalações de transmissão (BARROSO, 2016).	90
Figura D-1: Estrutura típica da LT 500 kV DO Projeto para Comparação.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Origem e faixa de frequência de transitórios em sistemas elétricos (VELASCO, 2010).....	8
Tabela 2.2: Origem e faixa de frequência de transitórios em sistemas elétricos (WG13.05, 1979).....	17
Tabela 3.1: Frequência de Desligamentos Forçados das Linhas de Transmissão da Rede Básica de 2014 a 2017 (ONS, 2018).....	20
Tabela 3.2: Natureza Elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão da Rede Básica em 2017 (ONS, 2018)	20
Tabela 3.3: Desempenho e eficácia por modalidade de esquema religamento automático – 2013 a 2017 (ONS, 2018).....	24
Tabela 4.1: Características do Caso Base	42
Tabela 4.2: Ajuste dos casos para Etapa 1 – Sistema Completo “S1-S2” x Sistema Equivalente “EQ1-EQ2”	44
Tabela 4.3: – Comparativo entre Sistema Completo “S1 – S2” x Sistema Equivalente “EQ1 – EQ2”	49
Tabela 4.4: - Ajuste dos casos para Etapa 2 – Sistema Completo “S1-S2” x Sistema com carga fictícia “S1-Carga RL”	51
Tabela 4.5: – Comparativo entre Sistema Completo “S1 – S2” x Sistema com Carga Fictícia “S1 – CG”.....	54
Tabela 4.6: - Ajuste dos casos para Etapa 3 – Sistema Completo “S1-S2” x Sistema com Fontes Ideais “F1-F2”.....	56
Tabela 4.7: – Comparativo entre Sistema Completo “S1 – S2” x Sistema com Barras Infinitas “F1 – F2”	59
Tabela 4.8: – Maiores desvios nas correntes de arco secundário a 60 Hz e 66 Hz por tipo de variação e modelagem da rede.....	60
Tabela 4.9: – Maiores desvios no primeiro pico de TRT após extinção do arco por tipo de variação e modelagem da rede.....	60
Tabela 4.8: – Tabela resumo dos resultados encontrados para tensão na fase aberta para diferentes modelagens.	69
Tabela 4.9: – Tabela resumo dos resultados encontrados para corrente de arco secundário para diferentes modelagens.	69

Tabela 4.10: – Tabela resumo dos resultados encontrados para primeiro pico da TRT após extinção do arco secundário para diferentes modelagens.....	69
Tabela 4.11: – Efeito da variação do comprimento na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.	71
Tabela 4.12: – Efeito da variação da compensação <i>shunt</i> na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.....	71
Tabela 4.13: – Efeito da variação do carregamento na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.	71
Tabela 4.14: – Efeito da variação da potência de curto-circuito na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.	71
Tabela 4.15: – Efeito da aplicação do reator de neutro na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.	72
Tabela A.1: Processos que regem alterações no sistema de Transmissão.....	85
Tabela A.2:Resumo das principais características dos relatórios R	90
Tabela B.1:Tabela de Casos Simulados	96
Tabela C.1:Coordenadas das Posições Geométricas dos Condutores e Para-Raios.....	99
Tabela C.2:Parâmetros Elétricos da LT 500 kV Base	100
Tabela D.1:Coordenadas das Posições Geométricas dos Condutores e Para-Raios da LT	103
Tabela D.2:Parâmetros Elétricos da LT 500 kV de comparação	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
BCS	Banco de Capacitores Série
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCPB	Certificado de Conformidade do Projeto Básico
CER	Compensador Estático de Reativos
CIGRE	<i>International Council on Large Electric Systems (French: Conseil International des Grands Réseaux Électriques, CIGRÉ)</i>
CS	Compensador Síncrono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FNDE	<i>Frequency Dependent Network Equivalent</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LT	Linha de Transmissão
MCG	Mínimo Custo Global
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
PB	Projeto Básico
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
RA	Religamento Automático
SE	Subestação
SIL	<i>Surge Impedance Loading</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TEM	Transitórios Eletromagnéticos
TNA	<i>Transient Network Analyzer</i>
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
VFTO	<i>Very Fast Transient Overvoltages</i>

Sumário

Dedicatória.....	I
Agradecimentos.....	III
Resumo.....	IV
Abstract.....	V
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Tabelas.....	X
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	XII
1. Introdução.....	1
1.1 Relevância do Tema.....	1
1.2 Objetivos da Dissertação.....	4
1.3 Estrutura da Dissertação.....	4
2. A Representação da Rede em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos.....	6
2.1 Equivalentes no domínio da frequência.....	11
2.2 Rede Equivalente com Thèvenin calculado para frequência fundamental.....	13
2.3 A modelagem da rede em estudos de Projeto Básico.....	18
3. O Religamento Monopolar e a Extinção de Arco Secundário.....	19
3.1 Religamento Automático Monopolar - Sua importância para o SIN.....	19
3.2 A Extinção do Arco Secundário.....	24
3.2.1 O Arco Secundário.....	24
3.2.2 A Corrente de Arco Secundário e a Tensão de Restabelecimento pós-extinção.....	28
3.3 Critérios Vigentes de Extinção do Arco Secundário.....	33
3.3.1 Critério 1.....	33
3.3.2 Critério 2.....	34
3.3.3 Comentários Gerais Sobre os Critérios.....	35
4. Reavaliação da Metodologia para Análise da Extinção do Arco Secundário.....	37
4.1 Metodologia para Avaliação dos Efeitos de Modelagem da Rede.....	37

4.1.1	Modelos de Rede Avaliados	38
4.1.2	Variações Contempladas	38
4.1.3	Métodos de Avaliação	40
4.2	Premissas e Critérios Considerados	41
4.3	Linha de Transmissão Base para o Estudo	42
4.4	Simulações Comparativas entre as Modelagens de Rede	43
4.4.1	Etapa 1 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema Equivalente em ambos os terminais (EQ1 – EQ2).....	43
4.4.2	Etapa 2 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema Completo à Montante e Carga a Jusante (S1 – Carga).....	50
4.4.3	Etapa 3 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema com Fontes Ideais/Barras infinitas (F1 – F2).....	55
4.4.4	Resumo dos maiores desvios encontrados	60
4.5	Comparação com Projeto Básico Real.....	61
4.5.1	Verificação sem Reatores de Neutro	62
4.5.2	Verificação com Reatores de Neutro.....	64
4.5.3	Resumo dos Resultados obtidos	68
4.6	Efeitos das Variações dos Parâmetros da LT e da Rede na Determinação do tempo de extinção do Arco Secundário	70
5.	Conclusões	74
5.1	Considerações Gerais.....	74
5.1.1	LT 500 kV base	75
5.1.2	Comparação com Projeto Básico de LT	76
5.1.3	Efeito das variações dos parâmetros.....	78
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	78
	REFERÊNCIAS	80
Apêndice A.	Integração de Obras de Transmissão ao SIN – do Planejamento ao Projeto Básico	84

A.1	Antecedentes – Estudos de Planejamento e Leilão de Transmissão.....	84
A 1.1	Relatório R1.....	87
A 1.2	Relatório R2.....	88
A 1.3	Relatório R3.....	88
A 1.4	Relatório R4.....	89
A 1.5	Relatório R5.....	89
A 2	Resumo e Cronograma Geral.....	89
A 3	Estudos de Projeto Básico.....	91
A 3.1	Estudos de Regime Permanente	92
A 3.2	Estudos de Transitórios Eletromagnéticos	93
A 3.2.1	Requerimentos de Projeto	93
Apêndice B.	Lista de Casos Simulados	95
Apêndice C.	Dados para Modelagem da LT 500 kV Base	98
C.1	Comprimento e Compensação	98
C.2	Condutores	98
C.3	Para-Raios predominante	98
C.4	Posição Geométrica dos Condutores e Para-Raios	99
C.5	Parâmetros Elétricos.....	100
C.6	Cálculo do SIL	101
Apêndice D.	Dados para Modelagem da LT 500 kV de comparação.....	102
D.1	Comprimento e Compensação	102
D.2	Condutores	102
D.3	Para-Raios predominante	102
D.4	Posição Geométrica dos Condutores e Para-Raios	103
D.5	Parâmetros Elétricos	103
D.6	Cálculo do SIL	104

1. INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

Os empreendimentos de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) possuem sempre uma história individual que se desenvolve segundo uma sequência de eventos bem definida. Ela se inicia na identificação de uma necessidade real de ampliação da rede de transmissão com intuito de atender uma determinada região. Atualmente esta tarefa está sob encargo do órgão de Planejamento Eletro-Energético, função exercida no Brasil pela Empresa de Planejamento Energético (EPE), que reporta diretamente ao Ministério de Minas e Energia (MME). Essa trajetória de um empreendimento se segue até sua operação comercial durante sua vida útil.

Apesar dos diversos empreendimentos de ampliação da transmissão seguirem a mesma diretriz, é possível afirmar que cada instalação possui suas próprias particularidades e encaminhamentos específicos, dentro de um mesmo contexto regulatório. É possível, inclusive, que empreendimentos devidamente licitados, com projetos básicos aprovados possam nunca se concretizar por problemas de cunho financeiro, enquanto outros podem ser construídos, entrarem em operação e apresentarem problemas crônicos que se perpetuam por anos a fio dentro de sua vida útil, causando inconvenientes problemas operativos.

Dentre todas as etapas da história de um empreendimento, destaca-se a etapa denominada Projeto Básico. É nela que o empreendimento literalmente toma forma, onde são definidas todas as suas características, como as linhas de transmissão serão construídas e neste momento que se busca detectar possíveis problemas de cunho técnico não previamente identificados, mas que podem criar restrições futuras para operação. Por essa razão, o Projeto Básico possui enorme influência no desempenho das instalações durante sua vida útil. É importante deixar claro que nessa etapa ainda não se detém todos os detalhes técnico de equipamentos, linhas, etc, pois o Projeto ocorre anos antes da entrada em operação. Contudo, é nele que se constrói o “esqueleto” do empreendimento e suas características gerais, que naturalmente vão sendo aperfeiçoadas (sem alterações radicais), de acordo com a realização da obra, da fabricação dos equipamentos, etc.

O Projeto Básico de uma instalação é realizado pela Transmissora para a qual o empreendimento é concedido. Ele deve ser submetido ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conforme descrito no submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede (ONS,

2017), para que o operador, que é responsável por executar as atividades de coordenação e controle da operação do SIN (Sistema Interligado Nacional), certifique-se que as novas instalações de transmissão atendam os requisitos estabelecidos nos Procedimentos de Rede, a fim de zelar pelo adequado desempenho da rede básica.

Além de avaliar os projetos, é também responsabilidade do ONS, conforme o submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2017), propor os requisitos mínimos a serem atendidos por subestações e seus equipamentos.

O Projeto Básico é constituído, dentre outros documentos, por estudos de diversas naturezas, que permitem compreender o funcionamento do novo empreendimento na rede e identificar as características necessárias para os equipamentos a serem comprados pela Transmissora. É nesta ocasião que se define a necessidade ou não de adquirir equipamentos específicos para mitigar efeitos que podem danificar equipamentos ou mesmo comprometer o bom funcionamento da rede elétrica da região. Uma particularidade do Projeto Básico é que caso seja constatada a necessidade de alteração de algum elemento de projeto (características de equipamento ou layout de subestações, por exemplo) em momentos seguintes a esta etapa a transmissora não é autorizada a fazê-la, mesmo que ela arque com todos os custos associados à modificação. Contudo, casos excepcionais podem ser levados à ANEEL, órgão que tem poder de decisão sobre essas situações.

Outro aspecto de extrema relevância são os critérios para estudos, pois é a partir deles que todas as Transmissoras, muitas vezes aliadas a seus consultores, irão desenvolver os Projetos de Transmissão fundamentais para garantir o fornecimento de energia elétrica em todo país. Entretanto, esses critérios estão em constante evolução, bem como o entendimento geral a respeito dos complexos fenômenos associados a um sistema elétrico de potência de grande porte como é o SIN.

É nesse contexto de busca de evolução de critérios e metodologias para execução de projetos que é crucial o desenvolvimento de estudos específicos como o deste trabalho, pois seus resultados podem vir a contribuir com diferentes elementos do setor: o ONS, as transmissoras, as consultoras e o planejamento.

Dentre toda a vasta gama de estudos requeridos no Projeto Básico, identifica-se que a análise de extinção de arco secundário para viabilização de religamento monopolar automático representa uma área de potencial melhoria que pode gerar ganhos significativos. Isso porque esse estudo é de grande relevância em diversos sentidos, pois: pode demandar compra de equipamentos adicionais; evita problemas graves de cunho operacional, de segurança dos equipamentos e de profissionais dentro da subestação; seus resultados

influenciam praticamente todos os demais estudos; pode influenciar na escolha de estruturas de linhas de transmissão; pode indicar a necessidade de aplicação de recursos operativos a depender da configuração da rede elétrica da região.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo geral desta dissertação é apresentar um “Estudo sobre os Efeitos da Representação da Rede em Estudos de Extinção de Arco Secundário em Linhas de Transmissão de Potência Natural Elevada”

São objetivos específicos desta dissertação:

- Introduzir as etapas e os estudos técnicos associados ao Projeto Básico de novos empreendimentos de transmissão no SIN.
- Apresentar a conceituação básica que fundamenta os estudos associados ao Projeto Básico, especialmente quanto à representação da rede elétrica para simulação em programas de transitórios eletromagnéticos baseados no EMTP (*Electromagnetic Transients Program*).
- Reavaliar a metodologia de representação da rede nas análises da extinção de arco secundário, de maneira a permitir estudos de execução mais simples, mas sem dispensar a qualidade dos resultados obtidos.
- Apresentar, a partir dos dados obtidos das simulações de verificação do efeito da rede, quais variáveis apresentam maior influência nas análises de extinção de arco secundário em linhas com características similares à LT 500 kV base deste estudo. Todo trabalho considera os critérios vigentes para análise do tempo de extinção do arco secundário.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. Este primeiro capítulo faz uma abordagem geral da importância do Projeto Básico no bom desempenho de uma obra de transmissão e que, por essa razão, seus critérios e metodologias devem ser bem compreendidos e desenvolvidos. Destaca ainda que dentre os estudos demandados nesta etapa, o de Extinção do Arco secundário para viabilização de Religamento Monopolar Automático, é um ponto de potencial melhoria que pode gerar ganhos significativos em diversos campos.

O capítulo 2 aborda questões associadas à representação da rede para estudos de transitórios eletromagnéticos: equivalentes no domínio da frequência, equivalentes Thèvenin, metodologias propostas por institutos internacionais como IEC e IEEE e a prática atual em estudos de projeto básico.

O capítulo 3 apresenta mais detalhes sobre o religamento monopolar automático: sua definição, bem como de suas principais características; sua importância para o SIN; dados estatísticos de seu desempenho na rede básica; as principais motivações para sua utilização. Adicionalmente, são apresentadas constatações de algumas referências sobre extinção do arco secundário e introduzidos os critérios vigentes que definem o tempo mínimo associado ao tempo morto que garanta uma elevada probabilidade de extinção do arco secundário.

O capítulo 4 avalia, por meio de simulações no programa *Alternative Transient Program* (ATP), a possibilidade de simplificação na metodologia adotada para avaliação da extinção do arco secundário. São avaliadas diferentes propostas de modelagem da rede elétrica, as quais são comparadas para diferentes características da LT e do sistema. É reproduzido um estudo real (de um empreendimento que já se encontra em operação) de extinção do arco secundário, mas agora utilizando a modelagem de rede simplificada, a fim de comparar os resultados aplicando a metodologia atualmente proposta e as representações simplificadas estudadas neste trabalho. A partir das simulações elaboradas os resultados foram manuseados para obtenção de curvas que demonstram quais as principais grandezas que influenciam as conclusões quanto à extinção do arco secundário para a LT base para o estudo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões finais do trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

Ao final do trabalho há quatro apêndices com informações referentes às LTs 500 kV adotadas ao longo do trabalho, os resultados mais detalhados das simulações executadas e um resumo a respeito do processo de integração obras da transmissão a rede básica.

2. A REPRESENTAÇÃO DA REDE EM ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Os fenômenos de transitórios elétricos se manifestam quando há uma mudança repentina nas condições do circuito, seja, por exemplo, por abertura ou fechamento de uma chave, ou a ocorrência de um curto-circuito. Os intervalos de tempo em que o circuito é submetido a transitórios são insignificantes quando comparados ao tempo em que opera em regime permanente, mas é o suficiente para causar danos irreparáveis a equipamentos, desligar uma máquina ou usina e até mesmo desligar cargas de uma cidade inteira (GREENWOOD, 1991).

Para compreender a importância desse tipo de estudos deve se ter em mente que apesar de sistemas elétricos operarem em regime permanente a maior parte do tempo eles devem ser projetados para suportar as piores solicitações a que podem ser submetidos, as quais, quase sempre ocorrem em períodos de transitórios (FURNAS, 1987). Por essa razão, é na etapa de Projeto Básico, quando ocorre o dimensionamento de equipamentos, os quais, via de regra, não terão suas características alteradas, que estudos de transitórios eletromagnéticos são fundamentais. O Apêndice A descreve todos os estudos associados à integração de obras de transmissão na rede básica, desde o Planejamento até o Projeto Básico.

Fenômenos Transitórios Eletromagnéticos são bastante complexos. Sua natureza está relacionada às características básicas de circuitos elétricos, que são representados, em sua essência, por meio dos elementos passivos básicos: Resistor (R) que é dissipador de energia, Indutor (L) que é um armazenador de energia magnética e Capacitor (C) que é um armazenador de energia elétrica.

Em regime permanente, os elementos L e C, se submetidos à excitação contínua, armazenam uma quantidade constante de energia ou, se submetidos à excitação alternada, trocam essa energia armazenagem de forma cíclica em função da frequência da fonte de excitação alternada. Os transitórios ocorrem no intervalo de tempo associado a um instante de regime permanente antes de uma alteração no sistema, até atingir o novo ponto de regime permanente após a alteração do sistema. Durante todo período transitório, três regras básicas devem ser respeitadas a todo instante de tempo (GREENWOOD, 1991):

- I. A variável de estado fluxo magnético não pode sofrer alterações descontínuas sobre um elemento indutivo.

- II. A variável de estado tensão não pode sofrer alterações descontínuas sobre um elemento capacitivo.
- III. A redistribuição de energia devido a uma alteração no circuito leva um tempo finito e deve respeitar o princípio de conservação de energia: a taxa de energia fornecida deve ser igual à soma das taxas de energias armazenadas e dissipadas no circuito.

De forma adicional às questões supracitadas, tem-se o fato de que elementos da rede elétrica nem sempre podem ser representados por simples R, L, C concentrados, pois implicaria em erros significativos a depender do fenômeno analisado. A modelagem adotada depende do elemento físico que se deseja representar. É fácil perceber, por exemplo, que uma linha de transmissão não possui o mesmo comprimento físico de um reator ou banco de capacitores, apesar ambos possam ser representados por elementos R, L e C. O comprimento de uma LT com centenas de quilômetros não permite assumir que no mesmo instante de tempo, o mesmo valor de tensão alternada esteja presente em todos os pontos da mesma, de tal sorte que uma representação mais adequada desse elemento seria por parâmetros distribuídos. Em avaliações desse tipo se aplica toda a teoria de ondas viajantes, encontradas em quaisquer referências com abordagem conceitual sobre o tema.

Uma das consequências imediatas dos fenômenos de transitórios eletromagnéticos é o aparecimento de sobretensões, que nada mais são que tensões variáveis no tempo, entre uma fase e terra ou entre fases, cujo valor de crista é superior ao valor de crista da tensão máxima de um sistema (FURNAS, 1987). Sobretensões são quase sempre as grandezas de maior interesse em estudos de TEM. Também segundo (FURNAS, 1987), as sobretensões podem ser agrupadas quanto ao grau de amortecimento e duração, em três grandes grupos:

- Sobretensões temporárias.
- Sobretensões de manobra.
- Sobretensões atmosféricas.

Entretanto, na prática, essa divisão nem sempre vem à tona de maneira bem definida, sendo bastante comuns eventos que causem respostas com mais de uma dessas características. A Figura 2-1 exibe um gráfico Magnitude x Tempo de Permanência que demonstra cada um dos três tipos de sobretensões.

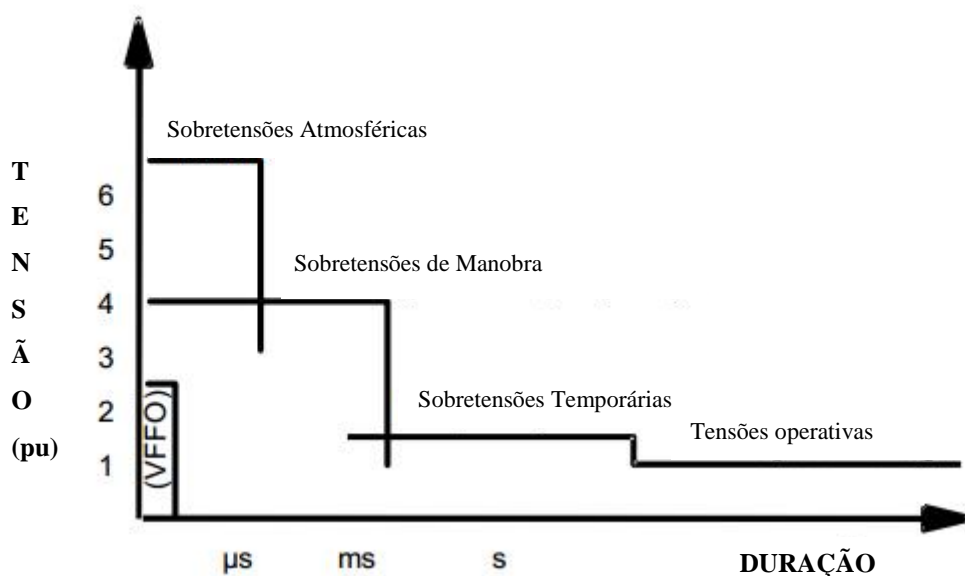


Figura 2-1: Tipos de sobretensões (IEC 60071-4, 2004).

Uma leitura atenta da figura acima indica outro fator que faz os fenômenos eletromagnéticos serem complexos: sua escala de tempo. Eventos de natureza atmosférica, por exemplo, podem chegar à ordem de microssegundos. Isso significa que esses fenômenos podem ser compostos por sinais da ordem de MHz. Há ainda os denominados *Very Fast Transient Overvoltages* (VFTO) cujas frequências são ainda mais elevadas. A Tabela 2.1 apresenta um resumo da faixa de frequência associada a cada fenômeno transitório.

Tabela 2.1: Origem e faixa de frequência de transitórios em sistemas elétricos (VELASCO, 2010)

Origem	Faixa de Frequência do Fenômeno
Ferroressonância	0,1 Hz – 1 kHz
Rejeição de Carga	0,1 Hz – 3 kHz
Eliminação de Faltas	50 Hz – 3 kHz
Chaveamento de Linhas de Transmissão	50 Hz – 20 kHz
Tensão de Restabelecimento Transitória	50 Hz – 100 kHz
Sobretensões de origem Atmosférica	10 Hz – 3 MHz
Abertura de Seccionadora em SF6	100 Hz – 50 MHz

O fato de cada fenômeno em estudo possuir uma ampla faixa de frequência associada gera uma enorme complicação no que diz respeito à modelagem dos elementos da rede. Como os modelos tipicamente utilizados para equipamentos geralmente são representativos apenas para uma pequena faixa de frequência, que muitas vezes não é plenamente compatível com os fenômenos estudados, tem-se o desafio de se desenvolver modelos que sejam representativos

em toda faixa de frequência, ou em uma faixa que melhor se aproxime a dos eventos em estudo. Essa é uma tarefa muito complexa e tema recorrente em pesquisas de especialista na área.

Nesse tipo de estudo a modelagem que exerce influência mais expressiva nos resultados é, geralmente, a do elemento o qual está sendo analisado, havendo risco inclusive de omitir totalmente o fenômeno caso a representação não seja minimamente adequada. Isso ocorre, por exemplo, na tentativa de simular o transitório de energização de transformadores excluindo suas características não lineares. Em casos como esse o fenômeno eletromagnético não é reproduzido corretamente, como mostra a Figura 2-2.

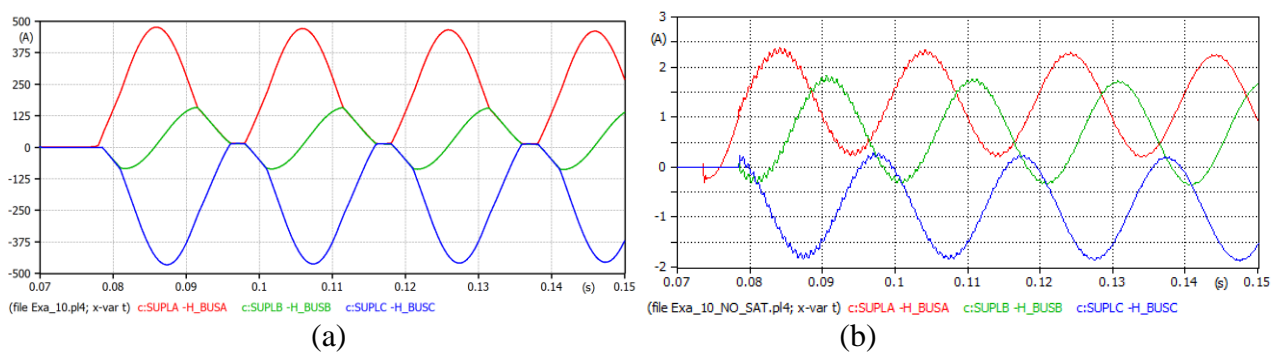


Figura 2-2: Correntes de inrush de energização um transformador de 3 enrolamentos. (a) com histerese, (b) não linearidades.

Na Figura 2-2, o caso (a) ilustra as correntes de *inrush* em uma manobra de energização de um transformador com sua característica de histerese representada, considerando um fluxo residual, já em (b), foi eliminada a representação da histerese exatamente no mesmo circuito e com os mesmos instantes de chaveamento. Por consequência ocorre uma enorme diferença entre os resultados. Vide que enquanto no caso (a) essas correntes atingem centenas de ampères, no caso (b) atinge correntes por volta de 2 A, com perfil assimétrico diferente.

A discussão a respeito da representação de cada um dos principais elementos da rede elétrica é tema recorrente em inúmeros artigos, livros, dissertações e teses. Bons exemplos não faltam, como, por exemplo, (CHIESA, 2010) para transformadores, (AMETANI, 2015) para linhas de transmissão, (AMETANI, 2015) para cabos isolados, (PINCETI ET al., 1999) para para-raios e (VELASCO, 2010) para todos os equipamentos citados mais máquinas síncronas e disjuntores.

Contudo, outro aspecto que possui influência nos resultados é a representação da rede elétrica na qual o elemento em estudo se conecta. Além da definição dos modelos, há os problemas associados à construção de equivalentes de porções específicas da rede. Essa questão de construção de equivalentes não seria uma preocupação caso fosse possível, tal qual

ocorre em estudos de fluxo de potência, a representação de todo sistema elétrico do estudo em questão dentro de um programa de transitórios eletromagnéticos, como o EMTP/ATP, PSCAD, EMTP-RV, etc. Ainda que seja viável realizar a modelagem do SIN completo em algum desses programas, reverses como manutenção de uma base de dados confiável e tempo de simulação seriam questões a ser confrontadas permanentemente.

O fato é que hoje, dentro das práticas do setor elétrico brasileiro, não há representações completas do sistema em ferramentas computacionais que simulam eventos de TEM, exigindo, conseqüentemente, a adoção de equivalentes para elaboração dos estudos elétricos associados.

Como a própria rede é composta por elementos de representação não trivial como LTs, transformadores, elementos de compensação série, *shunt*, etc., sua modelagem por meio de equivalentes esbarra em dificuldades quando se trata de sua representatividade em fenômenos que abrangem uma larga faixa de frequência, como apresentado na Tabela 2.1.

Uma representação equivalente deve, como o próprio nome sugere, ser diferente da original, mais compacta, mas que permita obter resultados semelhantes. Eletricamente falando, deve-se desenvolver um circuito elétrico com tamanho e número de elementos viáveis que se comportem como a rede elétrica completa quando analisando determinado fenômeno, ou o mais próximo disso possível. Obter equivalentes para uma frequência específica não apresenta grandes dificuldades, porém pode não representar fidedignamente o fenômeno.

Tem-se, portanto, que uma forma bastante eficaz de representação da rede para análise de TEM é a de equivalentes na frequência, pois estes possuem a mesma resposta da rede completa em uma larga faixa de frequência.

Porém, essa abordagem de representação na frequência possui uma limitação prática, uma vez que geralmente envolve métodos matemáticos não-triviais para sua realização. Caminhos como esse geralmente não conquistam popularidade entre engenheiros de aplicação e justamente por isso é interessante buscar métodos que forneçam representatividade de forma mais prática.

Nesse sentido é bastante comum a utilização de equivalentes representados como equivalente Thèvenin à frequência fundamental (no Brasil, 60 Hz), porém alocados a uma distância significativa do ponto onde ocorre o evento de interesse. Todos os elementos do ponto onde ocorre o evento até esses equivalentes devem ser representados de forma adequada, sendo os limites da denominada rede equivalente as barras de fronteira, que nada mais são que aquelas barras onde os equivalentes se conectam.

A pergunta natural que advém dessa abordagem é: até onde é necessária a representação da rede para que o fenômeno em análise seja representativo? Isso depende, obviamente, da natureza do fenômeno e das características da rede elétrica em um ponto. Fenômenos de altíssimas frequências, tais como transitórios associados a descargas atmosféricas ou VFTO não carecem de representações mais distantes que a própria subestação em análise ou um ou dois vãos de linhas de transmissão. Por outro lado, surtos de manobra, cuja frequência é inferior à dos fenômenos citados, carecem de uma representação além da SE em avaliação.

O impacto do ponto de conexão de equivalentes está, entre outras coisas, relacionado ao tempo de tráfego das ondas viajantes que surgem na ocasião de uma alteração no sistema. Cálculos aproximados permitem demonstrar a relação entre a distância física e o tempo do fenômeno, o qual está intimamente ligado à sua frequência. Em (FERREIRA, 2011) tem-se uma simples equação utilizada como “regra prática” para essa questão, na qual se considera ondas se propagando na velocidade da luz se despreza qualquer efeito de amortecimento dessas ondas.

$$t = \frac{2l}{300} \text{ (ms)} \quad (\text{EQ.1})$$

A equação aponta que um equivalente conectado a 300 km de distância do evento apenas influenciaria o resultado após 2 (ms), que seria o tempo que uma onda trafegando na velocidade da luz demoraria para ser emitida a partir do ponto onde ocorre o evento, atingir a barra do equivalente e retornar para o ponto de manobra. Devido à grande simplificação que representa, esta não é a maneira mais otimizada para definir a distância elétrica para conexão de equivalentes.

Nos itens a seguir serão apresentadas, de forma geral, um pouco das abordagens de representação no domínio da frequência e através de vizinhança elétrica com equivalentes calculados para 60 Hz.

2.1 EQUIVALENTES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Como explicado neste capítulo, Transitórios Eletromagnéticos caracterizam-se como fenômenos de múltiplas frequências o que conseqüentemente exige, para uma representação mais exata do fenômeno nas simulações, a modelagem da rede com suas características representativas em várias frequências.

Nesse sentido, iniciaram-se, na década de 70, pesquisas a respeito do *Frequency Dependent Network Equivalent* (FNDE), cuja idéia é, essencialmente, propor arranjos

combinados de elementos elétricos Resistivos, Indutivos e Capacitivos (RLC) cuja impedância equivalente para uma determinada faixa de frequência seria similar à impedância da rede elétrica completa.

Houve claramente uma evolução das metodologias de aplicação ao longo dos anos, sendo algumas técnicas desenvolvidas no domínio da frequência e outras no domínio do tempo, contudo, a idéia central das publicações sobre o assunto era equiparar a impedância da rede equivalente à rede original somente nos pontos de ressonância (COSTA, 2013). Em (NETO, 2017), é mencionado que essa abordagem possui o ponto negativo de oferecer boa compatibilidade para frequências específicas, mas baixa exatidão em demais frequências. A evolução das técnicas foram muitas vezes tentativas de reduzir os erros entre os equivalentes e a resposta da rede completa.

Em (AZEVEDO, 2010) consta um histórico da evolução desse conceito até o ano de 2010, conforme Figura 2-3.

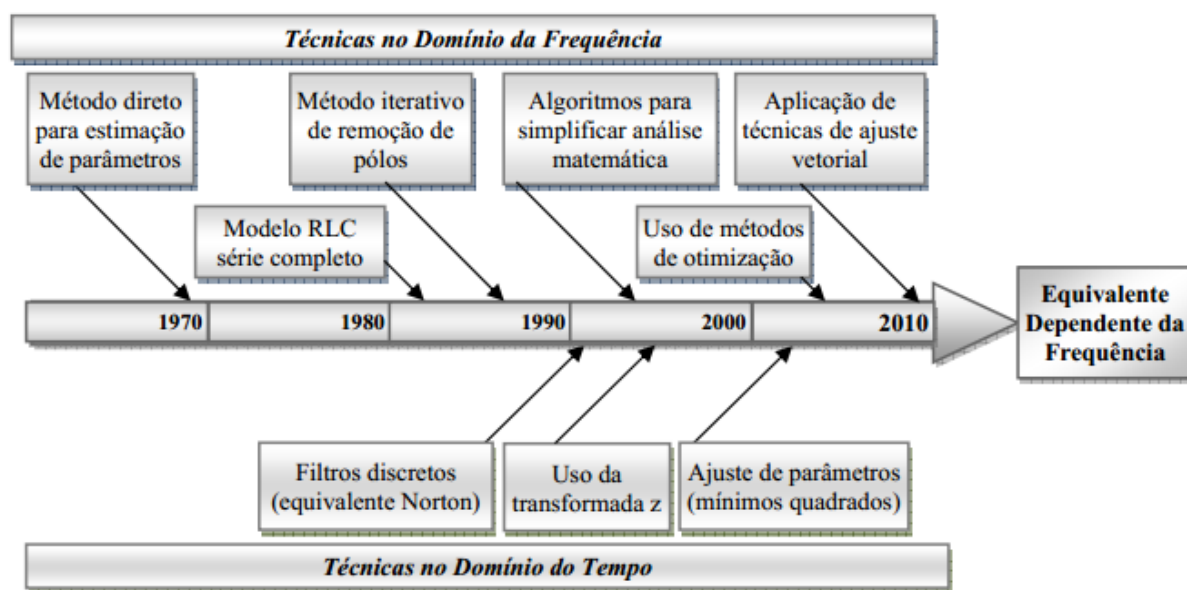


Figura 2-3: Sinopse temporal: síntese de equivalentes dependentes da frequência (AZEVEDO, 2010).

A partir de 2010 popularizou-se as técnicas de ajuste vetorial (*Vector Fitting*), que é um método desenvolvido por Gustavsen e Semlyen (GUSTAVSEN, 1999), e é largamente adotado na modelagem de linhas de transmissão, transformadores e também de equivalentes de rede. O método tem como essência aproximar uma função, seja escalar complexa ou um vetor de elementos complexos por um conjunto de pólos e resíduos. No caso da função ser um vetor de elementos complexos, todos os elementos são aproximados por funções racionais que compartilham os mesmos pólos. É um método considerado muito robusto e preciso em todas essas aplicações mencionadas (COSTA, 2013).

A técnica proposta em (GUSTAVSEN, 1999) é até hoje aplicada e melhorada, mas de maneira geral, é caracterizada como de baixa eficiência computacional se o equipamento avaliado possui um grande número de portas, sendo, por essa razão pouco adotada em termos práticos quanto à modelagem de redes equivalentes.

A elaboração de Equivalentes de Rede no domínio na frequência é um tema bastante promissor e elaborado. Contudo, foge do escopo proposto para este trabalho aprofundar no assunto, sendo as referências aqui citadas indicações para estudo mais aprofundado a respeito do mesmo.

2.2 REDE EQUIVALENTE COM THÈVENIN CALCULADO PARA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

A estratégia utilizada na prática para modelagem da rede em estudos de TEM de frentes lentas (associadas geralmente a manobras) é a de definir uma região que garantiria representatividade do fenômeno e conectar equivalentes Thèvenin calculados para 60 Hz nas barras de fronteira.

De acordo com o submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2018), os quais definem os critérios para execução de estudos, equivalentes calculados para uma única frequência devem ser representados por circuitos RL mutuamente acoplados, que podem ser obtidos a partir de impedâncias de curto-circuito de sequência zero e positiva. Adicionalmente, deve ser garantido que entre as barras focalizadas nos estudos e as barras de fronteira devem existir, pelo menos, duas outras barras.

É claro que esse critério é bastante simplificado, tendo em vista que relaciona o comportamento elétrico da rede com o número de barras de distância, que também não possui necessariamente lastro com características reais. É possível, por exemplo, a depender das características do sistema, que duas vizinhanças além da barra do evento representem 70 km, ou mesmo 400 km, o que claramente teria impacto distinto nas simulações.

Em (ONS, 2013) o mesmo critério é reforçado com o adendo de que “a prática da boa engenharia não se restringe, entretanto, à aplicação de regras.” e “A localização mais adequada do equivalente deve levar em conta não somente a distância elétrica, mas também a topologia da rede estudada.”.

Para compreender melhor como essa questão é abordada fora do Brasil buscou-se na IEC 60071-4, 2004, as indicações para representação da rede elétrica em estudos de transitórios eletromagnéticos. Em seu item 9.4.3.1 há considerações a respeito de quão longe a

rede deve ser representada para transitórios de frente de onda lenta (manobras de linha e transformadores, por exemplo). A norma define dois tipos de rede: *one-substation-deep* e *two-substation-deep network modelling*.

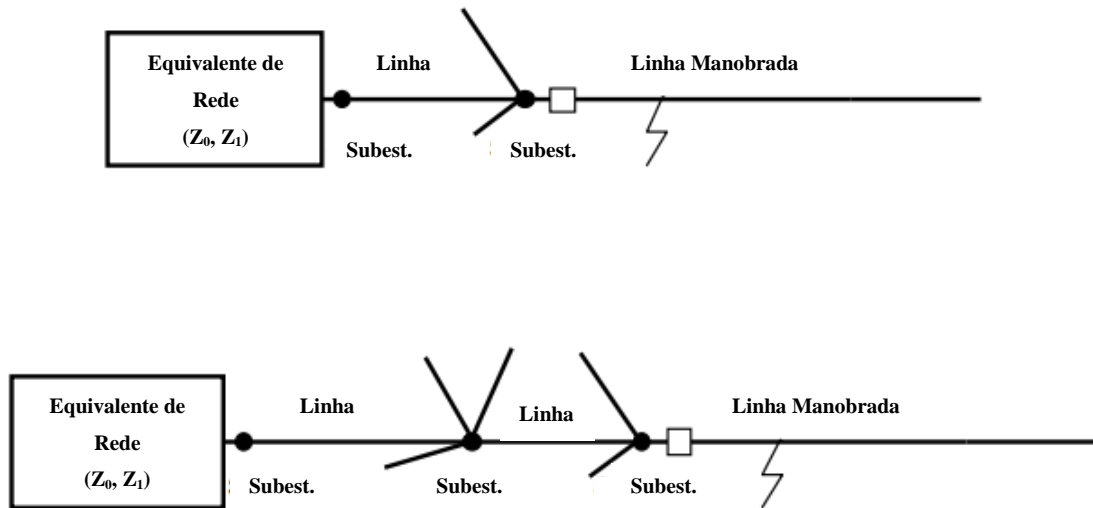


Figura 2-4: Exemplos de equivalentes de uma ou duas vizinhanças (IEC 60071-4, 2004).

A norma afirma que quanto mais extensa é a representação da rede, mais corretos precisos serão os resultados. De maneira geral, quando mais extensa a rede mais amortecidas são as sobretensões, de tal forma que o caso de apenas uma vizinhança geralmente apresenta valores mais elevados. Contudo, em caso de manobras de correntes capacitivas a rede com duas vizinhanças pode causar as maiores solicitações de tensão, visto que a carga capacitiva manobrada pode ressonar com outra capacitância da rede. Destaca ainda que a representação com duas vizinhanças provê mais informações no que tange pontos de ressonância nessa rede do que a representação com apenas uma vizinhança.

Conclui finalmente que para manobras de linha de transmissão a representação de até duas vizinhanças é a mais recomendada. Para manobra de elementos de compensação reativa como manobras de reatores a rede pode ser representada de forma bem simples, desde que esses elementos estejam precisamente modelados.

Outra reconhecida referência para modelagem em transitórios eletromagnéticos é encontrada em IEEE, 1998, na qual, em seu item 2.7, faz menção à representação de equivalentes de rede para simulação de surtos de manobra. Para esses casos o guia menciona que geralmente são utilizados “equivalentes convencionais” para simplificar a rede em estudo e lista 3 modelagens típicas desses equivalentes:

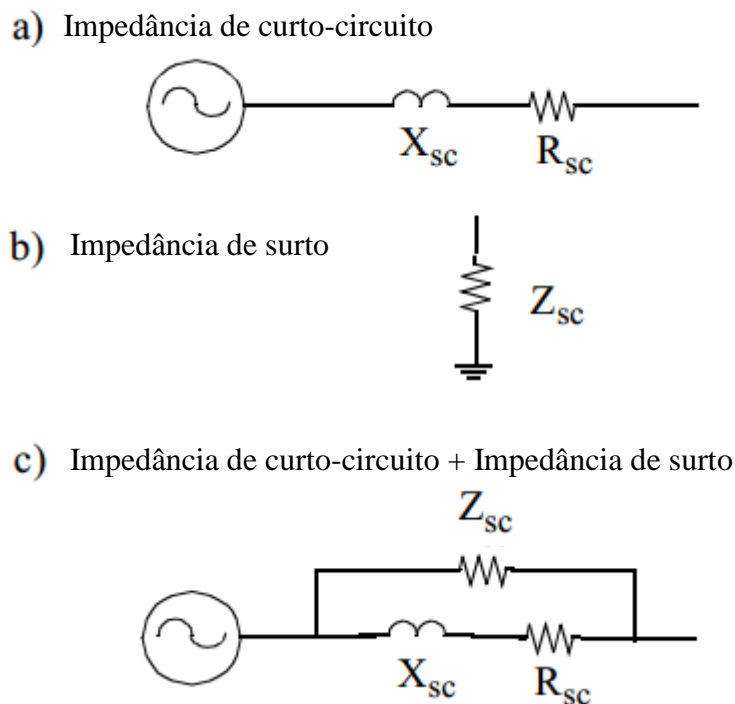


Figura 2-5: Equivalentes de Rede Convencionais (IEEE, 1998).

O equivalente a), segundo este guia (IEEE, 1998), é o equivalente Thèvenin simples e destaca a importância da relação X/R do mesmo, que representa o amortecimento da rede, sendo que os valores típicos são na faixa de 75° a 85° . O segundo tipo, b) representa simplesmente a impedância de surto da linha de transmissão e seria possível sua utilização em casos de linhas muito longas em que as reflexões de onda não impactariam os resultados. Por último, a modelagem c) representa a combinação do equivalente Thèvenin com a impedância de surto da LT que se conecta a mesma barra. Destaca-se, porém, que no caso c) pode haver erros na solução de regime permanente se a impedância de surto e a impedância de Thèvenin em paralelo forem de valores comparáveis. Em casos como este a opção c) não é recomendada.

Menciona brevemente a existência de equivalentes complexos para representar a impedância para diferentes valores de frequência.

Observa-se que este guia (IEEE, 1998) é mais direto que a norma (IEC 60071-4, 2004), e não faz considerações a respeito de distância elétrica e ressonâncias. Propõe alternativas diferentes para construção do equivalente (modelos b) e c)) mas não faz detalhamento prático a respeito dos mesmos no que tange a subestações de fronteira que contenham transformadores ou diversas linhas se conectando a ela.

Há de se destacar também o trabalho do *Working Group 05 of Study Committee N° 13* do CIGRE, o qual elaborou uma série de três trabalhos a respeito do cálculo de surtos de

manobra: (WG13.05, 1971), (WG13.05, 1974) e (WG13.05, 1979). Nesse conjunto de publicações é realizado um estudo detalhado a respeito de transitórios de energização e religamento de linhas de transmissão utilizando simulações computacionais, o *Transient Network Analyzer* (TNA) e até dados obtidos de manobras de reais.

As duas primeiras publicações têm enfoque maior em cálculo de surtos de manobra em sistemas alimentados por uma fonte indutiva, a qual representa o estágio inicial de um sistema de alta tensão ou mesmo uma condição de recomposição do sistema. Na terceira referência o trabalho evolui para representação da linha e do sistema para condição de redes complexas, na qual uma ou mais linhas de transmissão se conectam na barra onde ocorre a manobra, caracterizando um sistema malhado.

De acordo com (WG13.05, 1979), manobras em sistemas malhados geram surtos trafegantes de alta frequência, que são suprimidos quando se adota a representação por equivalentes concentrados diretamente na barra de manobra. A Figura 2-6 ilustra esses efeitos:

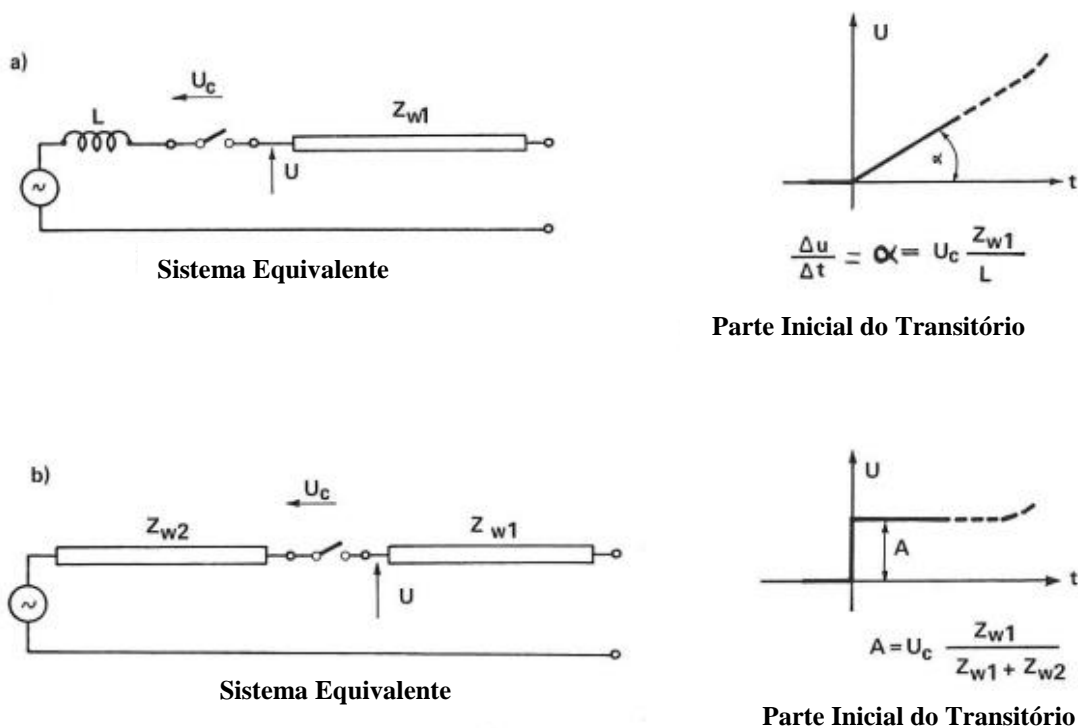


Figura 2-6: Circuitos equivalentes e resposta inicial dos transitórios de redes equivalentes simplificadas (a) e redes equivalentes complexas (b) (WG13.05, 1979).

Seria, portanto, a representação a) da figura anterior um exemplo de rede equivalente simplificada, que suprime as altas frequências, e a representação b) um exemplo de rede equivalente complexa que reproduz altas frequências.

Em seu item 5.3.1 e 5.3.2, o documento (WG13.05, 1979) faz ponderações a respeito da representação dos equivalentes. Afirma que não é possível determinar, naquele momento, regras gerais para uma modelagem ótima e cita pontos que os membros tiveram em comum acordo:

- Parcelas da rede de tensão diferente à tensão onde ocorre a manobra podem ser desconsideradas na ótica de sua contribuição para a potência de curto-circuito.
- Dentro da rede malhada de mesma tensão em que ocorre a manobra a representação de até duas barras além da subestação de manobra é suficiente. Sugere-se a representação da impedância equivalente em paralelo com sua impedância de surto.

Avaliou-se também o grau de simplificação possível da rede equivalente a partir de um conjunto de dados operativos de energização de linhas de 440 kV. Duas variáveis foram avaliadas quanto à possibilidade de redução: quantas barras de distância da barra de manobra o equivalente deve se conectar e a presença ou não da impedância de surto em paralelo com a impedância equivalente. Como resultado das análises obteve-se a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Origem e faixa de frequência de transitórios em sistemas elétricos (WG13.05, 1979)

Conf.	Número de barras	Representação da impedância de surto	Qualidade do resultado
a	0	Não	Insatisfatório
b	0	Sim	Suficiente (*)
c	1	Não	Insatisfatório (*)
d	1	Sim	Não há resultados disponíveis
e	2	Não	Satisfatório
f	2	Sim	Não há resultados disponíveis

(*) a generalização dessas conclusões é questionável.

Portanto, é possível verificar a partir das bibliografias consultadas, que há, de certa forma, uma convergência sobre a necessidade de representação de pelo menos duas barras entre o ponto de manobra e a conexão de equivalentes Thèvenin calculados para a frequência fundamental. Esse critério poderia ser simplificado a depender, por exemplo, da natureza do fenômeno avaliado, mas por outro lado corre-se o risco de se omitir efeitos relevantes, como uma possível ressonância do elemento sendo chaveado e algum outro existente na rede.

Há menção a respeito da utilização de impedâncias de surto em paralelo com a impedância de Thèvenin do equivalente. Não há, contudo, detalhes de como calcular essa impedância de surto a depender das conexões existentes na barra de fronteira, tampouco

valores recomendados para impedâncias de surto de elementos como transformadores e reatores, por exemplo.

O trabalho destaca ainda que as comparações que determinam os resultados da Tabela 2.2 se baseiam em dados estatísticos escassos, que não permitem extrapolar para uma comparação completa da distribuição estatística de sobretensões.

2.3 A MODELAGEM DA REDE EM ESTUDOS DE PROJETO BÁSICO

Ao avaliarmos, dentre todos os estudos requeridos pelo Projeto Básico, aqueles denominados como “Transitórios Eletromagnéticos”, há fenômenos de diferentes naturezas associadas: transitórios rápidos, transitórios lentos e estudos que estão associados a fenômenos eletromagnéticos, mas que os efeitos de ondas trafegantes não são proeminentes. Ressalta-se que as metodologias vigentes não fazem qualquer comentário sobre utilizar modelos de rede simplificada para alguns desses estudos. Segundo os critérios atuais espera-se que todos aqueles caracterizados como transitórios de manobra sejam realizados com a aplicação do critério de duas barras para representação da rede.

Tendo em vista que a construção da rede equivalente é a tarefa que demanda maior esforço e custo, seria importante realizar estudos que busquem, a depender do tipo de transitório estudado e das características da rede, flexibilizar esses critérios.

Após a explicação a respeito da natureza dos fenômenos transitórios e o comportamento da representação da rede, propõe-se avaliar a real necessidade da modelagem da rede por meio de um equivalente mais amplo em casos de estudos de Extinção de Arco Secundário.

3. O RELIGAMENTO MONOPOLAR E A EXTINÇÃO DE ARCO SECUNDÁRIO

Antes de iniciar avaliações dos efeitos da rede nas análises de extinção de arco secundário introduzir-se-ão vários aspectos do que é e da importância do religamento monopolar para o SIN e a Operação. Aborda-se o fenômeno do arco secundário e os critérios vigentes para avaliação de sua extinção.

3.1 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO MONOPOLAR - SUA IMPORTÂNCIA PARA O SIN

Parcela significativa das faltas que resultam em desligamento no SIN ocorrem em linhas de transmissão, uma vez que é um elemento que está altamente sujeito a efeitos de intempéries das mais diversas naturezas: efeitos de chuva, vandalismo, ação de animais, etc. Diferentemente de uma subestação, cujo acesso é restrito e limitado a alguns metros ou quilômetros quadrados, linhas de transmissão da rede básica comumente atingem centenas de quilômetros de distância, o que também torna complexa a possibilidade de medidas para reduzir o número de desligamentos.

As faltas podem ter natureza de causa: temporária (também chamadas faltas fugitivas) ou permanentes. As primeiras são aquelas em que o reestabelecimento do circuito foi realizado automaticamente ou tão logo as operações de manobra sejam realizadas. Já as segundas são aquelas que necessitam da intervenção da manutenção (correção, reparo ou substituição) para o reestabelecimento do componente. Exemplos para o primeiro tipo são: faltas devido a descargas atmosféricas e queimadas. Para o segundo: quedas de torre e explosão de equipamentos.

Para ilustrar o número de desligamentos ocorridos na rede básica nos últimos anos, consultou-se o relatório de análise estatística de desligamentos forçados do ano de 2017 em linhas de transmissão (ONS, 2018), de onde se obteve a Tabela 3.1 mostrada a seguir:

Tabela 3.1: Freqüência de Desligamentos Forçados das Linhas de Transmissão da Rede Básica de 2014 a 2017 (ONS, 2018)

Freqüência – FDFD (desligamentos/100h)				
Tensão	Todas as origens e causas			
	2014	2015	2016	2017
800 kV	-	-	-	0,034
750 kV	0,126	0,217	0,342	0,274
600 kV	0,332	0,297	0,445	0,696
500 kV	7,973	10,023	11,256	12,888
440 kV	1,099	1,199	1,233	1,050
345 kV	3,434	3,311	3,265	2,763
230 kV	16,609	19,247	17,489	17,306
138 kV	-	0,000	0,011	0,011

As origens desses desligamentos são diversas, havendo uma larga lista de categorizações realizadas pela equipe de estatística do ONS. Contudo, uma categoria bastante relevante é a da natureza elétrica do desligamento. Ela pode ser monofásica, bifásica ou trifásica, podendo ser aterrada ou isolada. De acordo com ONS, 2018, faltas monofásicas representaram 78,8% do total de desligamentos na rede básica. A Tabela 3.2 fornece a estatística mais completa da questão:

Tabela 3.2: Natureza Elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão da Rede Básica em 2017 (ONS, 2018)

Tensão	Fase-Terra	Bifásica	Trifásica	Bifásica-Terra	Trifásica-Terra	Sem Natureza Elétrica	Demais
800 kV	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
750 kV	83,3 %	0,0 %	0,0 %	5,6 %	0,0 %	0,0 %	11,1 %
600 kV	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	100,0 %
500 kV	77,8 %	11,3 %	1,0 %	1,6 %	0,0 %	0,4 %	8,0 %
440 kV	89,3 %	2,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %	6,7 %
345 kV	73,9 %	3,3 %	0,0 %	2,4 %	0,0 %	0,0 %	20,4 %
230 kV	81,8 %	6,6 %	0,6 %	3,3 %	0,0 %	1,8 %	5,8 %
138 kV	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Total	78,8 %	8,0 %	0,7 %	2,4 %	0,0 %	1,0 %	9,1 %

OBS.: As falhas definidas “Sem Natureza Elétrica” se referem a aberturas manuais de LTs.

Essa percentagem é ainda maior se for estendida a janela de avaliação, como exhibe a Figura 3-1:

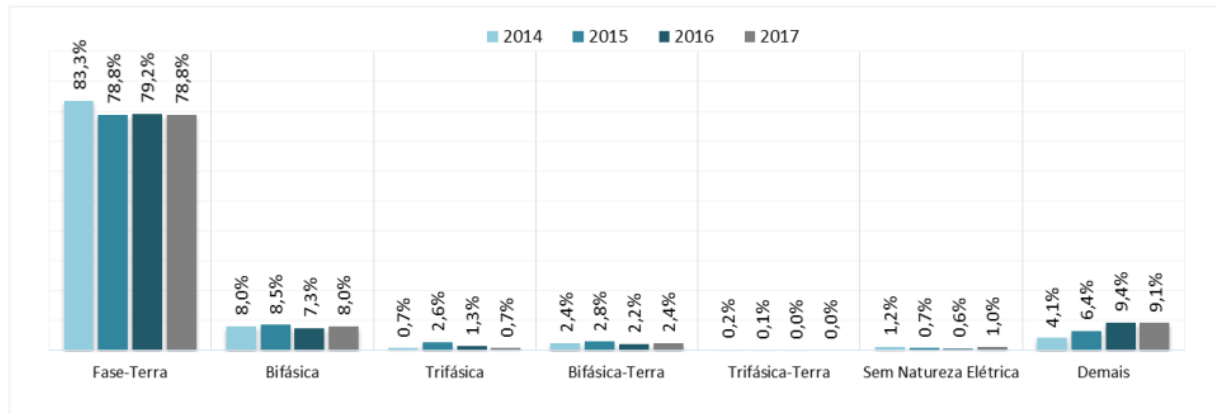


Figura 3-1: Natureza Elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão da Rede Básica nos anos de 2014 a 2017 (ONS, 2018).

Desligamentos forçados de elementos da rede, como é o caso de linhas de transmissão, podem representar um risco operativo ao sistema, pois, apesar de toda rede ser dimensionada para perda de um elemento, não é desprezível a possibilidade de ocorrer mais de uma perda dentro de uma janela de minutos em uma mesma região. Somado ainda a possibilidade da existência de intervenções programadas na área, por exemplo.

Para acelerar o processo de recomposição de elementos que foram desligados da rede utiliza-se o recurso de Religamentos Automáticos (RA). Estes nada mais são que esquemas implementados por meio de relés de proteção, ou *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) conectados às linhas de transmissão, com intuito de, em caso de desligamento forçado da linha sendo protegida, e respeitadas determinadas condições lógicas, sejam enviados sinais de comando que para os disjuntores se fechem, ou seja, religuem. A conclusão, bem sucedida ou não desse processo, depende de vários fatores, dentre eles a natureza da falta. RAs funcionam muito bem para faltas de natureza fugitiva, pois dentro de um tempo definido para o religamento esse defeito pode deixar de existir e ao religar o sistema se recompõe com sucesso. Caso a falta seja permanente, a tentativa de religamento será considerada falha e ele será bloqueado, mantendo a linha desligada. A atuação de um RA pode ser resumida através de uma sequência de eventos conforme mostra a Figura 3-2:

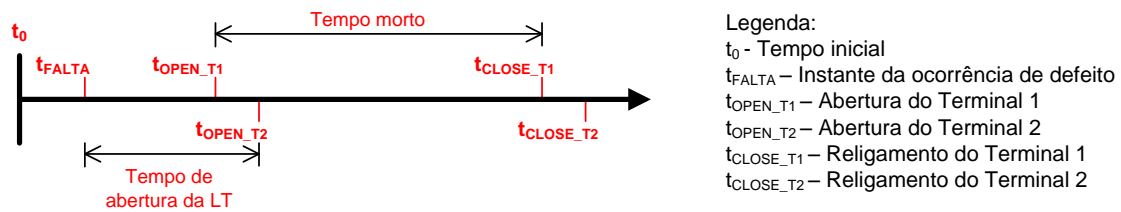


Figura 3-2: Sequência de eventos de um RA.

A partir da figura anterior é possível identificar duas definições importantes: o tempo de abertura da LT, que é a diferença entre o tempo de abertura do segundo terminal e do instante de ocorrência do defeito ($t_{OPEN_T2} - t_{FALTA}$) e o tempo morto, o qual corresponde ao tempo de abertura do primeiro terminal e o tempo de fechamento do primeiro terminal ($t_{CLOSE_T1} - t_{OPEN_T1}$). O tempo morto é uma variável importantíssima na determinação de um RA bem sucedido ou não. Sabe-se que quanto maior o tempo morto, maior a probabilidade de sucesso no RA, visto que há maiores chances de um defeito fugitivo deixar de existir (AQUINO, 2009).

Os RAs podem ser de diferentes modalidades: Monopolar (Mono), Tripolar (Tri) ou Monopolar/Tripolar (Mono/Tri), o que vai depender do ajuste programado no dispositivo de proteção e controle, além das características dos disjuntores.

Contudo, como demonstram as estatísticas apresentadas na Figura 3-1, são largamente predominantes defeitos de natureza elétrica fase-terra, que ocorrem em apenas uma das três fases. Tal fato permitiu que os profissionais do setor evoluíssem de uma aplicação de RA sempre tripolar para outras incluindo o monopolar. Neste tipo de religamento a abertura dos disjuntores terminais ocorre apenas em uma fase, e não nas três. Essa alternativa permite a manutenção do fluxo de potência ativa nas fases sãs do circuito. De acordo com (GODOY, 2012) há dois principais benefícios sistêmicos associados à adoção do religamento automático monopolar:

- a) Estabilidade angular transitória: A utilização de uma abertura monopolar, ao invés de uma abertura tripolar garante a transferência de potência nas fases sãs, o que significa o menor afastamento elétricos entre os sistemas conectados nas duas pontas de uma LT de interligação, por exemplo. Isso implica em uma menor aceleração dos rotores do sistema exportar de potência com relação ao sistema importador, podendo, em alguns casos, garantir o sincronismo da rede no primeiro *swing*.

- b) Estabilidade de tensão: Em redes que possuem corredores com LTs conectando sub-áreas de um sistema, a perda devido a abertura tripolar de uma linha resulta em sobrecarga nas demais. Quanto mais linhas desse corredor forem se desligando, maior a sobrecarga nas demais, sob risco de, em algum ponto, como as perdas reativas na linhas são função quadrática de seu carregamento, poder ocorrer problemas de falta de potência reativa nessa região. Com a adoção de religamento automático monopolar mantém-se a transferência de fluxo e reduz-se a probabilidade de carência de potência reativa.

Algumas outras vantagens do religamento automático monopolar sobre o tripolar são:

- I. Reduz a magnitude dos torques transitórios aplicados aos eixos de unidades geradoras próximas, especialmente em máquinas térmicas, que geralmente são mais sensíveis a perturbações.
- II. Quando concluído com sucesso reduz as sobretensões transitórias advindas da manobra de religamento.
- III. Em sistemas radiais com carga na ponta permite manter o fornecimento de energia para uma região, o que pode ser de grande valor a depender do tipo de carga sendo alimentada.
- IV. Em sistemas radiais com geração na ponta passa a ser possível manter as máquinas sincronizadas, enquanto uma abertura tripolar certamente implicaria em desconexão das máquinas com o sistema.
- V. Contribui para diminuir a intensidade e duração de afundamentos de tensão, reduzindo desligamentos desnecessários de usinas sem capacidade ampla de *fault ride through*, como é o caso típico de geração eólica, fotovoltaica, algumas térmicas e equipamentos com dispositivos conversores.

Por outro lado, existem alguns pontos positivos do religamento tripolar sobre o monopolar, como por exemplo:

- I. Não causa circulação de sequência negativa e sequência zero na rede durante o período de tempo morto.
- II. Não demanda equipamentos de acionamento monopolar como disjuntores e aparatos de proteção e controle.
- III. Não demanda a inclusão de reatores de neutro em reatores de linha com intuito de viabilizar o religamento automático. (OBS.: atualmente todo projeto de empreendimentos do SIN devem viabilizar o religamento monopolar e podem

demandar adoção de reatores de neutro, mesmo que na operação seja ativado somente o religamento tripolar).

Hoje no SIN, a filosofia geral adotada pelo Operador é limitar a aplicação do religamento automático monopolar a regiões sistêmicas específicas: em LTs próximas a usinas ou parques geradores de energia, sistemas com características radiais em geral ou casos específicos em que estudos apontaram benefícios expressivos em sua utilização.

De acordo com o relatório de desempenho dos Religamentos Automáticos (ONS, 2018), o percentual de atuações corretas (em que o religamento foi chamado a atuar e foi executado conforme esperado, seja com ou sem sucesso) e de atuações satisfatórias (religamentos automáticos com sucesso) por tipo de RA é mostrado na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Desempenho e eficácia por modalidade de esquema religamento automático – 2013 a 2017 (ONS, 2018)

Modalid.	Atuações Corretas						Atuações Satisfatórias					
	2013	2014	2015	2016	2017	2013-2017	2013	2014	2015	2016	2017	2013-2017
Tri	91,5%	91,8%	92,3%	94,2%	93,2	91,7%	69,6%	67,4%	69,1%	75,5%	76,5%	68,7%
Mono	92,1%	93,1%	93,5%	89,8%	94,0%	92,7%	67,3%	77,3%	73,5%	75,6%	71,2%	72,0%
Mono-Tri	80,6%	81,0%	90,0%	96,8%	95,9%	85,9%	48,4%	51,2%	57,7%	80,0%	73,1%	55,1%
<i>Restart</i> ELO CC	-	-	100%	100%	-	100%	-	-	61,5%	92,9%	-	38,5%
Total	90,6%	91,3%	92,3%	93,9%	93,6%	92,6%	67,5%	68,0%	68,7%	76,1%	75,4%	68,4%

Um dos principais fatores que definem o sucesso ou não do RA é a eliminação ou não do defeito. Nos casos de religamentos tripolares, a depender do tipo de defeito, sua eliminação ocorre como consequência direta do desligamento do circuito e interrupção da alimentação do arco elétrico. Já em religamentos monopolares, o fenômeno é mais complexo, já que as fases sãs continuam operando e alimentam o arco elétrico na fase aberta.

O item 3.2 trata de alguns aspectos associados ao arco elétrico e viabilização do religamento monopolar.

3.2 A EXTINÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO

3.2.1 O Arco Secundário

Na tese de doutoramento de CÂMARA, (2010), é proposto um modelo de arco elétrico para utilização em estudos de extinção de arco, contém explicações interessantes a respeito do comportamento do arco.

Nela afirma-se que o arco se trata de um plasma a alta temperatura, de baixa resistividade elétrica e que conduz corrente quando submetido a um campo elétrico. O arco se desenvolve ao redor de uma coluna principal, de característica aproximadamente cilíndrica, entre seus terminais, onde o calor produzido pelas perdas tipo Joule mantém a ionização fluindo axialmente na direção dos eletrodos e radialmente para o exterior do arco.

Em (CÂMARA, 2010), é apresentada a formulação do arco elétrico segundo Cassie e Mayr relacionam a tensão de arco $u(t)$ e a corrente de arco $i(t)$ com sua condutância $g(t)$ e constante de tempo (θ).

Cassie considera o arco confinado num canal com temperatura, densidade da corrente e intensidade do campo elétrico constantes, sendo a perda de energia sempre por convecção. Já Mayr assume que o arco é resfriado exclusivamente pelo ar, ou seja, a troca de energia ocorre por condução térmica. O primeiro melhor se adequa à condição de corrente de arco elevada enquanto a segunda à condição de baixa corrente de arco. A equação 2 apresenta o modelo de Cassie e a 3 o modelo de Mayr,

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{|u|}{|u_0|} - 1 \right) \quad (\text{EQ.2})$$

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{(u \cdot i)}{|P_0|} - 1 \right) \quad (\text{EQ.3})$$

Sendo:

u_0 → Tensão de arco estacionária;

θ → A constante de tempo do arco;

P → A perda de potência

Através de estudos experimentais, sabe-se que a característica elétrica de arcos é extremamente não linear e está intimamente relacionada ao fenômeno térmico que caracteriza arco elétrico. A sequência de eventos termo-elétricos que podem ocorrer durante a presença de uma falta mantida através de arco elétrico é diversa e torna-se difícil definir modelos simplistas para representar o fenômeno.

De acordo com CÂMARA, (2010), é possível destacar três fenômenos físicos básicos associados à presença do arco elétrico: Processo de Ionização e Recombinação, Distribuição

de Temperatura no Arco e Extinção Térmica/Dielétrica. Em seu trabalho, são apresentados maiores detalhes sobre cada um deles

O arco elétrico é tipicamente encontrado em condições de defeitos em redes elétricas. Em se tratando de linhas de transmissão aéreas, o acontecimento de um defeito que ocorra através de arco elétrico pode ser dividido em dois grupos: Arco primário e arco secundário. O arco primário é aquele alimentado pelas correntes de curto-circuito do sistema antes de abertura dos disjuntores e é também chamado de arco de potencia. Já o arco secundário se manifesta na rede elétrica geralmente na abertura monopolar de linhas de transmissão. Essa situação tem origem, por exemplo, na ocorrência de um curto-circuito monofásico na rede que cause a disrupção de uma cadeia de isoladores da LT.

Inicialmente o que há é o arco primário, porém, ao haver a abertura monopolar dos disjuntores dos terminais da fase em falta o defeito pode permanecer alimentado por tensões induzidas de fases ou circuitos externos à fase em falta. O arco que permanece após a abertura monopolar da LT é conhecido como arco secundário. A Figura 3-3 ilustra essa condição.

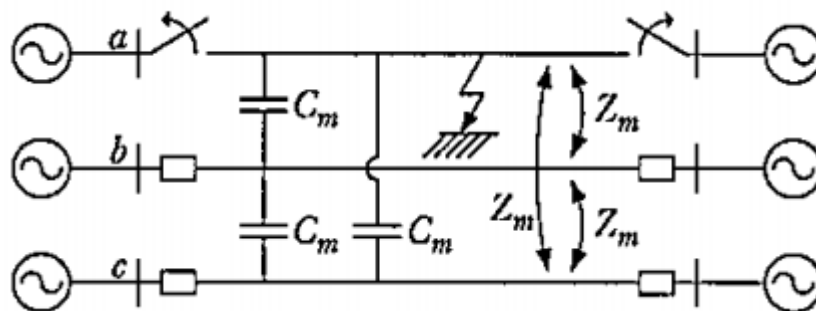


Figura 3-3: Circuito equivalente trifásico da condição de abertura monopolar (ZANETTA Jr., 2003).

Apesar de destacar a complexidade do fenômeno, CÂMARA, (2010) afirma que a tensão de arco secundário é praticamente proporcional ao comprimento, para igual valor de corrente. O comprimento do arco varia acentuadamente com o tempo. Os principais fatores que influenciam a variação do comprimento do arco são a velocidade do vento, a convecção e a turbulência do ar, a magnitude e a duração da corrente de falta precedente.

Em (HAUBRICH, H. J. et al., 1974) são avaliados diversos aspectos da extinção de arco secundário a partir de ensaios de laboratório. Em seu item 4 – *Arc Tests*, é mencionado a respeito de dois comportamentos básicos de extinção observados: (a) Interrupção instantânea; (b) Extinção estacionária. A Figura 3-4 ilustra cada um desses casos:

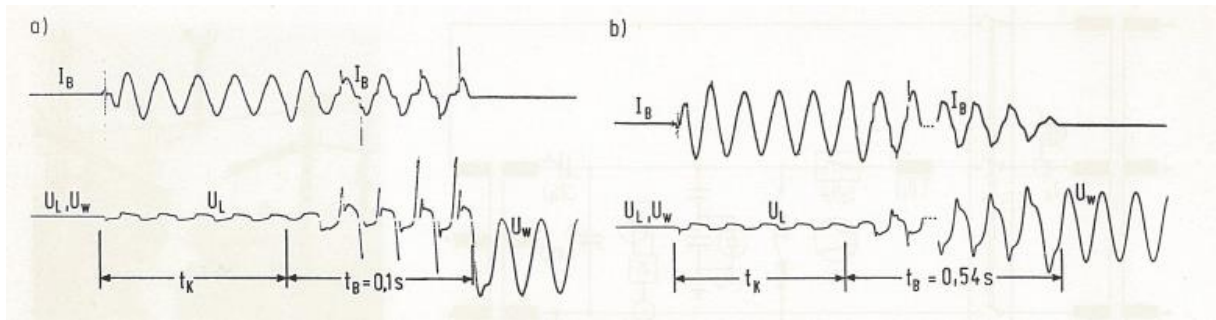


Figura 3-4: Tipos de extinção de arco secundário (HAUBRICH, H. J. et al., 1974).

Onde:

I_b – Corrente de arco secundário;

U_L – Tensão de arco;

U_w – Tensão de restabelecimento;

t_k – Duração do arco primário;

t_b – Duração do arco secundário.

No caso (a) o arco secundário tem processo de extinção muito rápido após a eliminação do arco de potência, contudo a capacidade dielétrica do ar ainda não suporta essa nova condição, causando reignições sucessivas até uma extinção definitiva. Esse tipo de extinção, segundo o artigo, tem mais chances de ocorrer para correntes de curto-circuito elevadas e com ventos maiores. Isso porque correntes de curto-circuito mais elevadas implicam em comportamentos dinâmicos do arco mais acentuados, influenciando sua característica rotacional e o balanço térmico. Quando há a passagem de arco primário ou de potência (com dezenas de quilo ampères) para condição de arco secundário (tipicamente de dezenas de ampères), o arco teria uma característica instável, não sendo possível manter seu comportamento térmico e essa variação resultaria em uma extinção mais rápida do arco. Esse comportamento também é encontrado nos testes presentes em (BALOSSI, 1966), que afirma que os ensaios realizados com maiores correntes de curto-circuito implicaram tempos de extinção menores que de correntes inferiores.

Já a extinção (b) está associada, geralmente, as correntes de curto-circuito menores do que as que causam extinções do tipo (a), pois como as correntes de arco primário não são tão elevadas os arcos são mais estáveis e, portanto, mais difíceis de serem extintos de forma muito rápida. Nessa condição mais estável os fenômenos térmicos se sustentam mais facilmente e tendem a prolongar o comprimento do arco secundário. Em função desse prolongamento a probabilidade de extinção do arco é aumentada. A publicação também relata

que é possível um processo de extinção ser uma mescla dos tipos (a) e (b), porém ele só pode proceder iniciando-se em (b) e se tornar o tipo (a), e não o contrário.

O tempo de arco primário é outra variável de influência na extinção do arco secundário, segundo HAUBRICH, H. J. et al., (1974), que afirmam que para valores inferiores a 100 ms o tempo de eliminação de falta tem pouca influência, mas para tempos superiores, quanto mais longo o tempo para eliminação do defeito, menor o tempo de extinção do arco secundário, pois no instante da passagem para arco secundário, o arco encontra-se mais longo, facilitando sua extinção.

Há ainda variáveis de grande relevância, como a velocidade do vento e o valor da tensão de restabelecimento com relação ao tamanho do *air gap*. Para o vento, quanto maior sua velocidade, menor o tempo de extinção do arco secundário. Já para a tensão de restabelecimento (kV/m), quanto menor seu valor, menor o tempo de extinção do arco secundário. Adicionalmente destaca-se a natureza estatística dos fenômenos climáticos, comprimento da cadeia de isoladores e posição da cadeia de isoladores.

Há ainda outros fatores que influenciam o tempo associado à extinção do arco secundário, contudo, neste item limitou-se a tratar dos efeitos mais associados às características física do mesmo, as quais são mais complexas e de difícil entendimento. A proposta de um modelo adequado para sua representação em estudos propiciaria melhora nos resultados e conclusões obtidas em estudo, contudo, devido à sua complexidade, não é comumente utilizado na prática. No item 3.2.2, tratar-se-á sob uma ótica mais elétrica, detalhando mais o comportamento da corrente de arco secundário com relação à rede elétrica.

3.2.2 A Corrente de Arco Secundário e a Tensão de Restabelecimento pós-extinção

Para que se garanta o sucesso de um religamento, caso este seja executado adequadamente, deve ser garantido que o arco secundário tenha sido extinto, sendo esta a preocupação do estudo de análise de extinção de arco secundário mencionado no Apêndice A.

Tendo em vista a importância dessa questão, buscou-se listar alguns fatores de origem elétrica que teriam influência significativa no valor da corrente de arco secundário e conseqüentemente no seu processo de extinção.

- a. Comprimento da LT;
- b. Transposição da linha de transmissão;
- c. Grau de compensação do circuito;

- d. Magnitude da corrente de arco secundário;
- e. Magnitude e duração da corrente de arco primário;
- f. Tensão de restabelecimento transitória após a extinção do arco secundário;
- g. Ponto da LT onde ocorre o defeito;
- h. Nível de tensão;
- i. Impedância vista do ponto de falta;
- j. Silhueta e cabeça de torre da LT;
- k. Geometria dos subcondutores por fase;
- l. Proximidade entre circuitos.

Há, dentro das referências bibliográficas sobre o assunto, algumas análises das características que exercem grande influência sobre a corrente de arco secundário e a tensão de restabelecimento após a extinção.

De acordo com HAUBRICH, H. J. et al.(1974), a corrente de arco secundário é resultante de duas componentes, sendo uma induzida pelo acoplamento eletromagnético e a outra pelo acoplamento eletrostático entre a fase sob defeito e as fases sãs, bem como entre a fase sob defeito e eventuais circuitos próximos.

Na mesma referência há uma formulação descrita considerando o circuito como parâmetros concentrados para cálculo dos efeitos eletrostáticos (índice inf) e eletromagnéticos (índice ind), tanto da corrente de arco secundário (I_B^{inf} e I_B^{ind}) quanto da tensão de restabelecimento (U_W^{inf} e U_W^{ind}), desprezando a resistência do arco. As tensões e correntes com índice “u” são referentes aos circuitos sem compensação.

Nessas expressões, C'_1 e C'_0 são as capacitâncias de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, L'_1 e L'_0 as indutâncias de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, “ ω ” representa a frequência de operação, “ λ ” o comprimento de onda na frequência do sistema, “ ℓ ” o comprimento do circuito, “ U_m ” a tensão máxima fase-fase do sistema em análise, “ β ” o grau de compensação da LT, X_1 e X_0 as reatâncias de sequência positiva e zero dos reatores de LT e “x” a distância entre o ponto de defeito e o início da linha de transmissão. Têm-se ainda as seguintes definições:

$$\beta_0 = 1 - \frac{C'_0}{C'_1} \quad (\text{EQ.4})$$

$$I_B = I_B^{inf} + I_B^{ind} \quad (\text{EQ.5})$$

$$U_B = U_B^{inf} + U_B^{ind} \quad (\text{EQ.6})$$

A primeira série de equações, apresentada a seguir, refere-se ao caso de circuito simples sem compensação *shunt*.

$$I_{Bu}^{inf} \approx \frac{1}{3} (C_1' - C_0') \cdot \omega \cdot \ell \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \beta_0 = 1 - \frac{C_0'}{C_1'} \quad (\text{EQ.7})$$

$$I_{Bu}^{ind} \approx \frac{1}{3} (2 \cdot C_1' + C_0') \cdot \omega \cdot \ell^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{\ell} \right) \cdot \left(\frac{\frac{L_0'}{L_1'} - 1}{2 \cdot \frac{L_0'}{L_1'} + 1} \right) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (\text{EQ.8})$$

$$U_{Wu}^{inf} \approx \left(\frac{C_1' - C_0'}{2 \cdot C_1' + C_0'} \right) \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (\text{EQ.9})$$

$$U_{Wu}^{ind} \approx \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{\ell} \right) \cdot \ell \cdot \left(\frac{\frac{L_0'}{L_1'} - 1}{2 \cdot \frac{L_0'}{L_1'} + 1} \right) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (\text{EQ.10})$$

Já a segunda refere-se ao caso de circuito simples com compensação *shunt* e sem reator de neutro.

$$\frac{I_B^{inf}}{I_{Bu}^{inf}} \approx \left(1 - \frac{\beta}{\beta_0} \right) \cdot \left(1 - \frac{X_1}{X_0} \right) = 1 \text{ for } X_1 = X_0 \quad (\text{EQ.11})$$

$$\frac{I_B^{ind}}{I_{Bu}^{ind}} \approx \left(1 - \frac{\beta}{3 - \beta_0} \right) \cdot \left(2 + \frac{X_1}{X_0} \right) = 1 - \frac{\beta}{1 - \frac{\beta_0}{3}} \text{ for } X_1 = X_0 \quad (\text{EQ.12})$$

$$\frac{U_W^{inf}}{U_{Wu}^{inf}} \approx \frac{\left(1 - \frac{\beta}{\beta_0} \right) \cdot \left(1 - \frac{X_1}{X_0} \right)}{\left(1 - \frac{\beta}{3 - \beta_0} \right) \cdot \left(2 + \frac{X_1}{X_0} \right)} = \frac{1}{1 - \frac{\beta}{1 - \frac{\beta_0}{3}}} \text{ for } X_1 = X_0 \quad (\text{EQ.13})$$

$$\frac{U_W^{ind}}{U_{Wu}^{ind}} \approx 1 \quad (\text{EQ.14})$$

Já um terceiro grupo de equações considera caso de circuito simples com compensação *shunt* e com reator de neutro sintonizado segundo a condição: $\frac{X_0}{X_1} = \frac{\beta}{\beta - \beta_0}$.

$$I_B^{inf} \approx 0 \quad \text{EQ.15}$$

$$\frac{I_B^{ind}}{I_{Bu}^{ind}} \approx \frac{1 - \beta}{1 - \frac{\beta_0}{3}} \quad \text{EQ.16}$$

$$U_W^{inf} \approx 0 \quad \text{EQ.17}$$

$$\frac{U_W^{ind}}{U_{Wu}^{ind}} \approx 1 \quad \text{EQ.18}$$

A Figura 3-5 a seguir apresenta o crescimento da corrente de arco e da tensão de restabelecimento com o aumento do tamanho da linha para um circuito de 700 kV. As curvas 1 e 2 representam, resultados calculados com LTs modeladas com parâmetros distribuídos e considerando elementos concentrados (vide equações (3) até (16)), respectivamente.

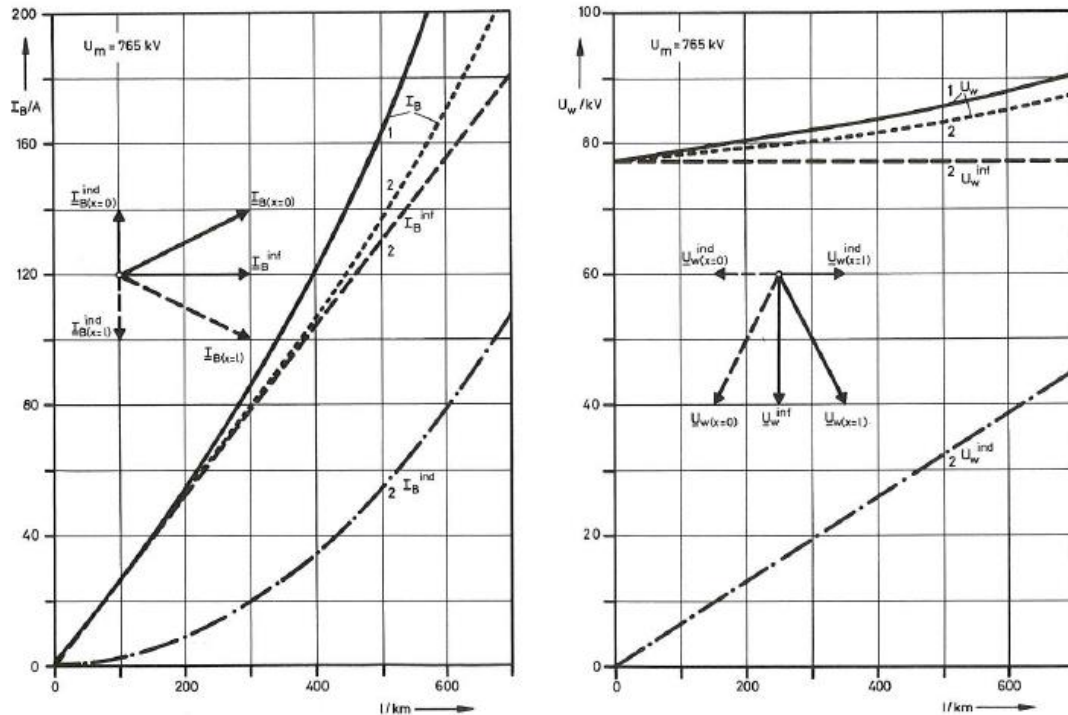


Figura 3-5: Corrente de arco secundário (I_B) e tensão de restabelecimento (U_w), função do comprimento da LT (HAUBRICH, H. J. et al., 1974).

Outra sensibilidade mostrada foi o efeito da transposição e da presença de circuitos com acoplamento mútuo, conforme exibido na Figura 3-6.

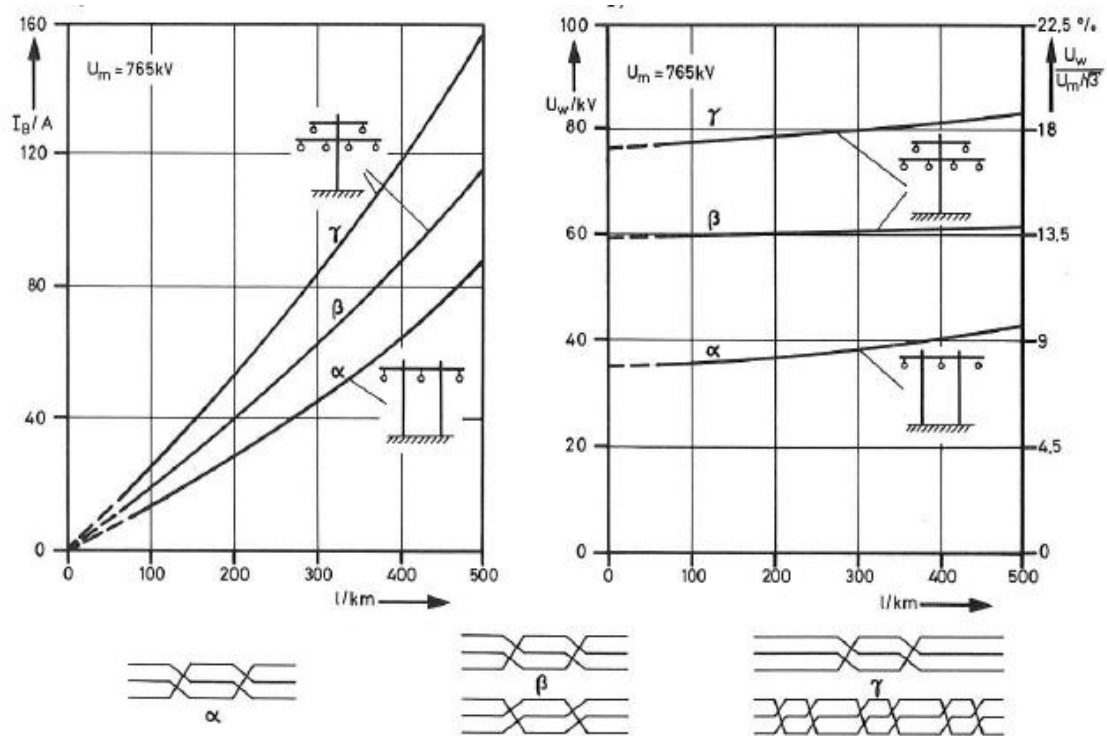


Figura 3-6: Influência da configuração de torre e do tipo de transposição em I_B e V_w (HAUBRICH, H. J. et al., 1974).

É apresentado em (ZANETTA, 2003) uma abordagem mais simplificada do fenômeno, afirmando que o acoplamento capacitivo é preponderante e de mais fácil abordagem analítica que o acoplamento indutivo, que por sua vez é dependente da corrente de carga passante nas fases sãs. Ele descarta no tratamento analítico a influência do acoplamento indutivo.

Através de modelagem dos acoplamentos eletromagnéticos através de impedâncias de sequência concentradas em linha de transmissão transposta o autor elabora o circuito equivalente para obtenção da tensão na fase aberta. A equação para obtenção dessa tensão é:

$$V_a = \frac{E}{2} \cdot \frac{Z_0}{1,5Z + Z_0} \quad (\text{EQ.19})$$

Onde:

V_a é a tensão na fase aberta

E é tensão nominal do sistema;

Z é dado por: $-\frac{j}{\omega(c_1 - c_0)} // j \cdot \frac{X_0 \cdot X_1}{X_0 - X_1}$

Z_0 é dado por: $-\frac{j}{\omega c_0} // j \cdot X_0$

Evoluindo ainda mais, obtém a corrente de arco secundário I_S por:

$$I_S = \frac{E}{3Z} \quad (\text{EQ.20})$$

Apesar de não realizar uma análise de sensibilidade das características da LT para obtenção de curvas, conforme visto na Figura 3-5, são claras as diferenças entre os cálculos adotados por cada referência.

3.3 CRITÉRIOS VIGENTES DE EXTINÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO

As práticas atuais do Setor Elétrico Brasileiro para determinação da extinção ou não do arco secundário e, conseqüentemente, da viabilidade de implementação do religamento monopolar, é descrito nos anexos técnicos gerais dos leilões de transmissão, no Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2018) e em (ONS, 2013).

São indicados dois critérios distintos que, caso o primeiro não se aplique, deve-se recorrer ao segundo.

Ambos os critérios se limitam a características elétricas e desprezam qualquer efeito prévio à condição de arco secundário, como por exemplo, a magnitude da corrente de arco primário ou tempo de eliminação de defeito.

Pelas atuais diretrizes (ONS, 2013), os critérios devem ser avaliados na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz, e para toda ela ser viável a aplicação do religamento automático monopolar. Essa consideração é uma extrapolação assumida, visto que, em nenhuma das publicações que deram origem aos critérios há qualquer menção a respeito de sua eficácia em situações de frequências diferentes de 60 Hz.

3.3.1 Critério 1

O critério 1 toma como base o trabalho (BALOSSI, 1966) e visa determinar uma região na curva do Primeiro Pico de TRT após a Extinção (kV_{pico}) x Corrente de Arco Secundário (I_{Arms}), na qual entende-se haver alta probabilidade de extinção do arco em tempos inferiores a 500ms. Destaca-se que os resultados se referem a um torre de 440kV, sendo a sua extrapolação para outras configurações uma aproximação, cuja precisão não se pode afirmar, visto que a corrente de arco secundário e o tempo de arco também dependem da disposição física do circuito. A Figura 3-7 ilustra a curva que delimita o critério 1.

Para avaliação para frequências diferentes de 60 Hz há uma flexibilização na forma de aplicação do critério. Há aplicações em que são avaliadas tanto a corrente de arco secundário quanto o primeiro pico da TRT para toda faixa de frequência enquanto há situações em que se

avalia apenas a corrente de arco secundário na frequência, sendo as duas formas aceitas no Projeto Básico, sendo a mais simplificada indicada no guia de diretrizes (ONS, 2013).

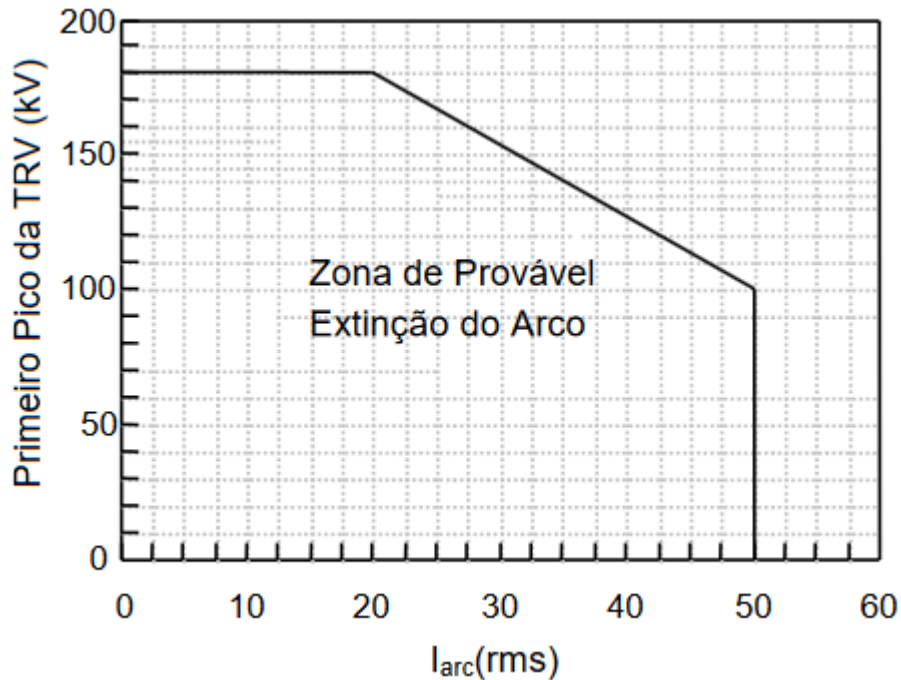


Figura 3-7: Curva que define a área de alta probabilidade da extinção de arco secundário em tempos inferiores a 500ms – Critério 1. (ONS, 2018).

3.3.2 Critério 2

O critério 2 é adotado apenas para tempos mortos superiores a 500 ms. Ele advém de (HAUBRICH, 1974), o qual indica forte influência da relação da tensão de restabelecimento transitória com relação ao comprimento do arco (kV/m) e afirma que seria suficiente a determinação do tempo morto a ser ajustado apenas em função da magnitude da corrente de arco secundário, conforme exhibe a Figura 3-8:

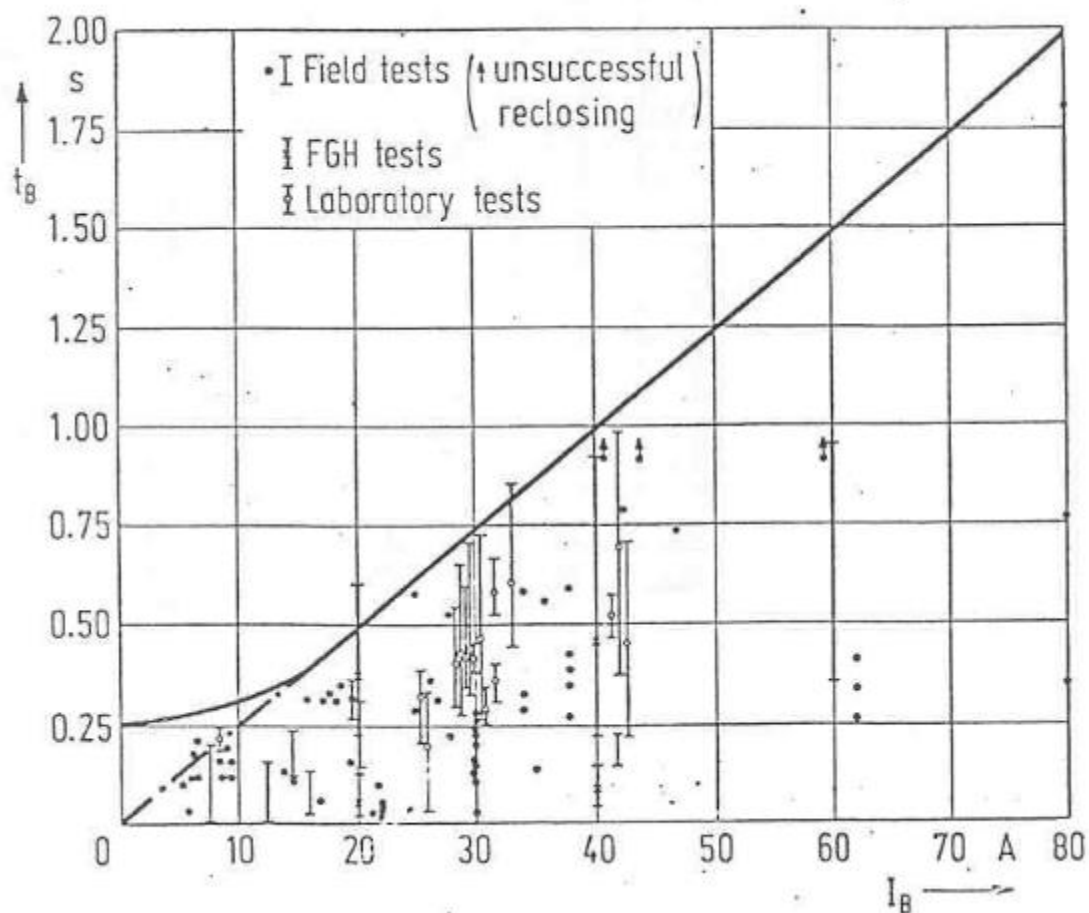


Figura 3-8: Curva indicativa do tempo morto do RA monopolar com relação a magnitude da corrente de arco secundário obtida – Critério 2. (ONS, 2018).

Nos testes que compõem este ábaco estão incluídos ensaios de LTs com características de 400 kV a 700 kV.

É pontuado ainda que o tempo morto deve ser, no mínimo, igual a 0,25s.

3.3.3 Comentários Gerais Sobre os Critérios

A utilização dos critérios acima é claramente uma grande aproximação de um fenômeno bastante complexo. Isso é percebido, por exemplo, no fato do critério 1 ser elaborado sobre ensaios em estruturas de 440 kV, enquanto o critério 2 sobre estruturas de 400 kV a 700 kV. Como já apontado no item 3.2.1, uma variável de grande influência no tempo de extinção é o comprimento do arco, o qual depende, dentre outras coisas, do tamanho da cadeia de isoladores. Portanto, a extrapolação dos critérios vigentes, estabelecidos sobre estruturas bem definidas, para toda e qualquer estrutura já se torna bastante questionável.

A estratégia de abdicar de um modelo de arco secundário para estimar as tendências do fenômeno de extinção é entendida como válida, contudo é necessária a realização de uma vasta bateria de ensaios em laboratórios de alta tensão com variação de diversas variáveis e grande detalhamento para se obter um conjunto de dados sólidos a respeito do assunto. Há diversos trabalhos que apresentam testes e avaliações desse tipo, mas ainda não se encontrou algo que pudesse ser aplicado com segurança e de forma geral.

Todavia, como este trabalho se propõe a avaliar metodologias e propor possíveis melhorias nos processos de planejamento e projeto básico, toda discussão tomará como base esses dois critérios.

4. REAVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA EXTINÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO

Conforme discutido no capítulo 2 deste trabalho, a representação da rede elétrica nos estudos é relevante e deve ser realizada com diligência para que os resultados não sejam comprometidos.

Atualmente, os estudos de Religamento Monopolar e Extinção de Arco Secundário dos Projetos Básicos devem ser realizados considerando a presença da rede equivalente segundo o critério para definição da rede retida (ONS, 2018). Por outro lado, observando os equacionamentos propostos no item 3.2, não é percebida a influência de parâmetros da rede diretamente sobre a corrente de arco secundário e tensão de fase aberta.

Buscando esclarecer os efeitos da representação da rede elaborou-se uma metodologia que permita verificar o efeito dessa representação nesse tipo de estudo.

4.1 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE MODELAGEM DA REDE

Como visto no capítulo 3, há diversas variáveis que podem influenciar os resultados a respeito da extinção de arco secundário segundo os critérios vigentes no setor elétrico brasileiro.

A partir dessas variáveis, propõem-se selecionar uma estrutura de linha de transmissão utilizada na rede básica que opere em tensão nominal de 500 kV, e testar os efeitos de diferentes modelagens de redes possíveis. Para cada uma delas variar alguns parâmetros, tanto da LT como do sistema, que podem influenciar os resultados de extinção e comparar, para cada caso, as diferenças apresentadas nas grandezas que fundamentam os critérios vigentes: Corrente de Arco Secundário e Primeiro Pico da tensão de Restabelecimento Transitória.

A opção de se avaliar inicialmente apenas uma estrutura de 500 kV nasceu da experiência adquirida de que em linhas de transmissão de maiores tensões os problemas associados a acoplamentos entre circuitos sejam mais acentuados que os ocorridos para tensões inferiores.

Após uma consolidação do entendimento sobre o efeito da representação da rede elétrica, pode-se aplicar a metodologia sobre projetos de LTs reais que foram realizados com rede completa e verificar se há ou não divergência nos resultados obtidos.

Os itens a seguir apresentam quais foram as modelagens de rede avaliadas e quais variáveis foram selecionadas para aplicar as variações.

4.1.1 Modelos de Rede Avaliados

Foram definidos 4 representações de rede, da mais completa à mais simplificada, para que, comparadas entre si, fosse possível concluir até onde seria adequado facilitar a representação sem prejudicar os resultados.

As representações avaliadas foram:

- a) Rede Completa em ambos os terminais (S1 – S2);
- b) Rede Completa a montante e carga fictícia a jusante (S1 – Carga);
- c) Rede equivalente em ambos os terminais (EQ1 – EQ2);
- d) Fontes ideais em ambos os terminais (F1 – F2).

onde, S1 – Sistema conectado ao terminal SA da LT; S2 – Sistema conectado ao terminal SB da LT; EQ1 – Equivalente conectado ao terminal SA da LT; EQ2 – Equivalente conectado ao terminal SB da LT; F1 – Fonte ideal conectado ao terminal SA da LT e F2 – Fonte ideal conectado ao terminal SB da LT.

A modelagem a) é a referência, pois contempla a rede completa (equivalente com critério de duas barras) e é a maneira utilizada pelas Transmissoras para realização da Análise da Extinção do Arco Secundário.

A modelagem b) é uma simplificação que buscar facilitar o ajuste do carregamento na LT. Algumas Transmissoras têm apresentado estudos com essa metodologia, considerando que avaliações com carregamentos mais altos forneçam resultados mais pessimistas.

A modelagem c) é uma simplificação do sistema em ambos os lados, aplicando nos terminais equivalentes Thévenin ajustados com a potência de curto na frequência fundamental em ambos os terminais. Essa representação já é considerada bastante simplificada. Não são considerados quaisquer equivalentes de transferência entre os terminais da LT.

A modelagem d) extrapola a anterior conectando fontes ideais (barras infinitas) diretamente aos terminais da LT. Nesse caso todo sistema é desprezado e as tensões terminais da LT são fixas no ajuste determinado.

4.1.2 Variações Contempladas

Para uma comparação mais completa das representações supracitadas foram realizadas diversas simulações no ATP variando características tanto do sistema quanto da linha de

transmissão para verificar essas modelagens sob diferentes configurações. Foram aplicadas variações nas seguintes grandezas:

- a) Comprimento da linha (referência = 100%):
 - a. Variação positiva = 130%;
 - b. Variação negativa = 70%.
- b) Compensação *shunt* (referência = 66,33%):
 - a. Variação positiva = 90%;
 - b. Variação negativa = 50%.
 - c. Ajuste para ressonância em 60 Hz.
- c) Carregamento (referência = 23,7 % do SIL):
 - a. Variação positiva 1 = 90%;
 - b. Variação positiva 2 = 100%.
- d) Nível de curto-circuito:
 - a. Variação positiva.
 - b. Variação negativa.
- e) Transposição (referência = LT transposta em 1/3-1/6-1/6-1/3):
 - a. Não-Transposta.
- f) Reator de Neutro (referência = sem reatores de neutro):
 - a. 800 Ω .

Destaca-se que as variações nos níveis de curto-circuito das barras terminais não foram planejadas para valores específicos, mas sim a aplicação de uma variação positiva e negativa que permitisse avaliar seu efeito. A tentativa de reproduzir uma variação específica nessa grandeza mostrou-se de difícil realização, ainda mais se tratando de curtos-circuitos trifásicos e fase-terra. O Apêndice B contém os valores exatos dos ajustes.

O valor de referência do carregamento foi obtido como o carregamento operativo da linha tomada como base em seu ano de entrada em operação.

Toda variação de parâmetros foi realizada de forma individual, a fim de que os resultados representassem estritamente a influência do parâmetro sendo alterado. Em todos os casos verificados consideraram-se as tensões nas barras terminais da LT iguais a 1,1 pu (máxima tensão operativa permitida).

4.1.3 Métodos de Avaliação

A avaliação das representações se dividiu em três etapas, nas quais em cada uma há a comparação de duas formas de modelagem da rede. As etapas foram:

- a) Etapa 1 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema Equivalente em ambos os terminais (EQ1 – EQ2);
- b) Etapa 2 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema Completo à Montante e Carga a Jusante (S1 – Carga);
- c) Etapa 3 - Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema com Fontes Ideais (F1 – F2)

Em cada etapa foram ajustados casos bases para as duas representações de rede em comparação, na qual se buscou equalizar a tensão em ambos os terminais (1,1 pu), o fluxo de potência ativa base (415 MW) e os níveis de curto-circuito trifásicos e fase-terra em ambos os terminais da linha. Com os ajustes realizados, o primeiro grupo de comparação verifica as seguintes características:

- i. Tensão na fase aberta a 60 Hz (V_{aberta_60Hz});
- ii. Corrente de arco secundário a 60 Hz (I_{ARC_60Hz});
- iii. $Z(\square)$ no terminal SA com a linha conectada nas três fases.
- iv. $Z(\square)$ no terminal SB com a linha conectada nas três fases.
- v. $Z(\square)$ no ponto de falta na fase aberta.
- vi. Tensão na fase aberta para a faixa de frequência de 56 Hz a 67 Hz.
- vii. Corrente de arco secundário na faixa de frequência de 56 Hz a 67 Hz.

As simulações para obtenção da $Z(\square)$ foram realizadas através da metodologia de aterrar todas as fontes de tensão, abrir todas as fontes de corrente e injetar uma fonte de corrente de sequência positiva (se nos terminais da LT) ou monofásica (se na fase aberta) e de magnitude 1 A em uma simulação não no domínio do tempo, mas sim no domínio da frequência. A tensão medida no ponto de injeção de corrente corresponde à impedância equivalente vista daquele ponto para uma frequência específica.

Após essas análises, um segundo grupo de comparações é realizado, na qual são simulados os casos para obtenção da corrente de arco secundário e do primeiro pico da tensão de restabelecimento após extinção do arco para todas as variações descritas no item 4.1.2.

Esse conjunto de avaliações para todas as representações de rede em comparação auxilia a identificar quais são as diferenças esperadas quando adotando cada uma das modelagens e permite concluir a respeito da viabilidade de uma representação simplificada ou não.

Finalmente, para confirmar a conclusão obtida, foi selecionado um projeto básico de uma linha de transmissão de 500 kV, cuja representação da rede é a mais detalhada, e foi reproduzido, a partir das informações disponíveis do projeto, o estudo de extinção de arco secundário com as modelagens mais simplificadas, com equivalente ajustado para 60 Hz e fontes ideais.

4.2 PREMISSAS E CRITÉRIOS CONSIDERADOS

São listadas a seguir as premissas e critérios considerados na execução e realização das análises:

- A tensão máxima operativa considerada atende ao Procedimento de Rede submódulo 23.3 (ONS, 2018) que define o valor de 1,1 pu para o sistema de 500 kV.
- Entende-se rede completa como a rede representada no ATP que respeita o critério de no mínimo duas barras entre a barra onde ocorre manobra e as barras de fronteira do equivalente, conforme critérios estabelecidos em (ONS, 2013).
- O modelo utilizado para representação das LTs foi o modelo de Bergeron com parâmetros calculados para 60 Hz, conforme geralmente utilizado em estudos de Projeto Básico.
- Não foram considerados elementos de compensação série nos circuitos avaliados.
- Nos casos de simulação no domínio do tempo o passo de integração adotado foi de 10 μ s.
- Foram avaliados curtos-circuitos monofásicos em ambos os terminais da linha de transmissão.
- O Fluxo de potência foi considerado sempre no sentido de SA para SB.
- Os defeitos foram aplicados sempre na fase C, fase na qual se identificou maior efeito do acoplamento eletromagnético.
- Todas as simulações foram realizadas no programa *ATPDraw*.

- As simulações no domínio da frequência foram executadas através do recurso *FREQUENCY SCAN* do programa *ATPDraw*.
- Na modelagem da rede retida, todas as fontes foram representadas por fonte de tensão ideal em série com impedância Thèvenin associada.
- Os reatores de linha foram considerados solidamente aterrados.
- A LT foi considerada transposta, sendo a transposição realizada no padrão 1/6, 1/3, 1/3, 1/6 e todas as variações de comprimento foram realizadas distribuídas proporcionalmente por cada trecho.
- O caso base para o estudo foi ajustado para possuir, a 60 Hz, as características expostas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1:Características do Caso Base

Tensão em SA	1,10 pu
Tensão em SB	1,10 pu
Curto-circuito monofásico em SA	21,97 kA _{rms}
Curto-circuito trifásico em SA	31,65 kA _{rms}
Curto-circuito monofásico em SB	8,85 kA _{rms}
Curto-circuito trifásico em SB	15,95 kA _{rms}
Carregamento da LT	415 MW
Comprimento	418 km
Reator de Linha	Solidamente aterrado
Transposição	LT Transposta (1/6,1/3, 1/3, 1/6)

4.3 LINHA DE TRANSMISSÃO BASE PARA O ESTUDO

As características da LT 500 kV tomada como base para o estudo são encontradas no Apêndice C.

Trata-se de um circuito simples com estrutura característica de linhas de transmissão com potência natural elevada. A LT de referência tem 418 km de comprimento, possui compensação *shunt* fixa em ambos os terminais num total de 600 Mvar (300 Mvar em cada terminal), sem reatores de neutro nos reatores de linha e transposta.

4.4 SIMULAÇÕES COMPARATIVAS ENTRE AS MODELAGENS DE REDE

4.4.1 Etapa 1 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema Equivalente em ambos os terminais (EQ1 – EQ2)

Nesta etapa foram comparadas as seguintes modelagens:

- i. Sistema completo em ambos os terminais (S1 e S2)

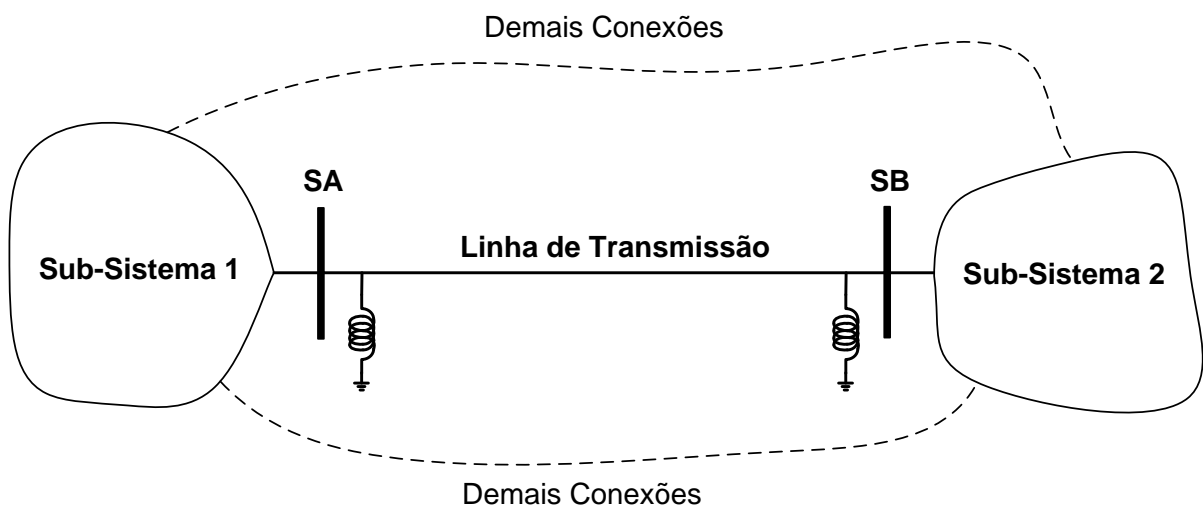


Figura 4-1: Rede Modelada para Etapa 1 – Sistema S1-S2.

- ii. Sistema Equivalente em ambos os terminais (EQ1 e EQ2)



Figura 4-2: Rede Modelada para Etapa 1 – Sistema EQ1-EQ2.

O ajuste de 60 Hz das duas redes foi realizado e as leituras de tensão na fase aberta e corrente de arco secundário são apresentadas a seguir na Tabela 4.2:

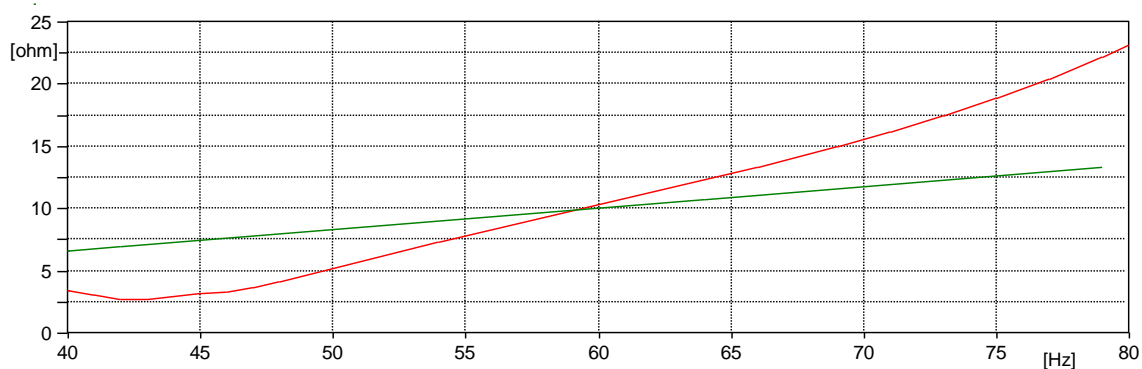
Tabela 4.2: Ajuste dos casos para Etapa 1 – Sistema Completo “S1-S2” x Sistema Equivalente “EQ1-EQ2”

Grandeza	Sistema Equivalente		Sistema Completo		Desvio (%)
	Magnitude		Magnitude		
v:SA	1,101	pu	1,102	pu	0,1%
v:SB	1,107	pu	1,100	pu	-0,6%
FLUXO	415	MW	415	MW	0,0%
SA					
CC1	21,58	kA _{rms}	21,97	kA _{rms}	1,8%
CC3	31,77	kA _{rms}	31,65	kA _{rms}	-0,4%
SB					
CC1	8,652	kA _{rms}	8,85	kA _{rms}	2,3%
CC3	15,68	kA _{rms}	15,95	kA _{rms}	1,7%
V _{aberta_60Hz}	1,575	pu	1,574	pu	-0,1%
I _{60Hz}	249,17	A _{rms}	248,8	A _{rms}	-0,1%

Observa-se que o ajuste realizado apresentou diferenças de até 2,3% no ajuste de nível de curto circuito monofásico, mas que os resultados de corrente de arco secundário e tensão na fase aberta, ambos a 60 Hz, apresentaram desvios inferiores a 1%.

Em seguida foi realizada uma análise da impedância vista de um determinado ponto para verificar, em uma janela de frequência, o comportamento da impedância $Z(\square)$ entre os dois modelos de rede.

A Figura 4-3 e a Figura 4-4 ilustram a impedância vista para cada terminal da LT, com a mesma em operação, na faixa de frequência de interesse.

Figura 4-3: Etapa 1 – $Z(\square)$ no terminal SA para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).

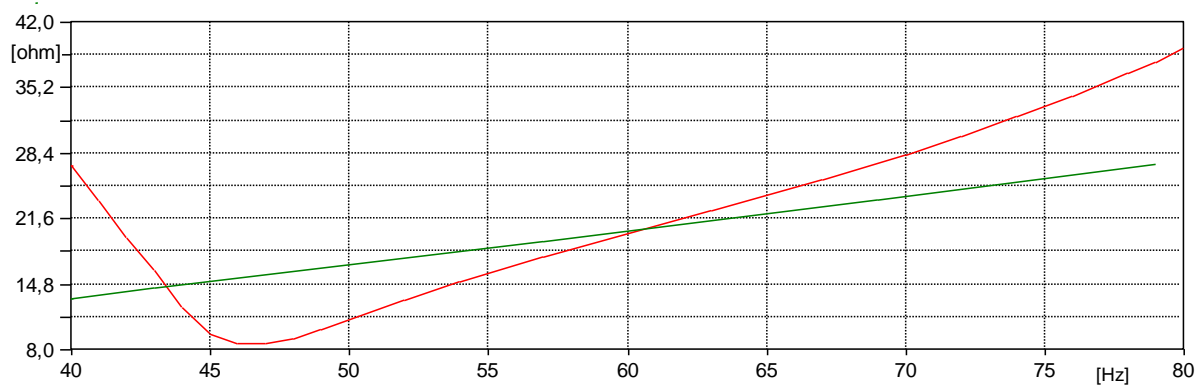


Figura 4-4: Etapa 1 – $Z(\square)(\square)$ no terminal SB para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).

Comparando o $Z(\square)$ entre as duas redes observa-se como a rede equivalente possui perfil de impedância mais próximo de uma reta, o que é coerente, uma vez que a representação da rede se resume a um elemento RL série que influencia diretamente a resposta obtida. Já o sistema completo possui uma rede mais complexa de resistências, indutâncias e capacitâncias, que implicam em características de impedâncias um pouco diferentes. Esses efeitos não são tão claros devido à pequena janela de frequência verificada.

Os dois sistemas apresentam a mesma impedância nos terminas SA e SB na frequência de 60 Hz, pois foi para essa frequência que se elaborou o ajuste de nível de curto-circuito.

Avaliou-se também a $Z(\square)$ vista do ponto da falta monofásica na condição de fase aberta (abertura monopolar realizada), por se tratar do ponto onde ocorrerá a circulação da corrente de arco secundário. As Figura 4-5 e Figura 4-6 e ilustram a impedância vista da fase aberta em cada terminal da LT na faixa de frequência de interesse.

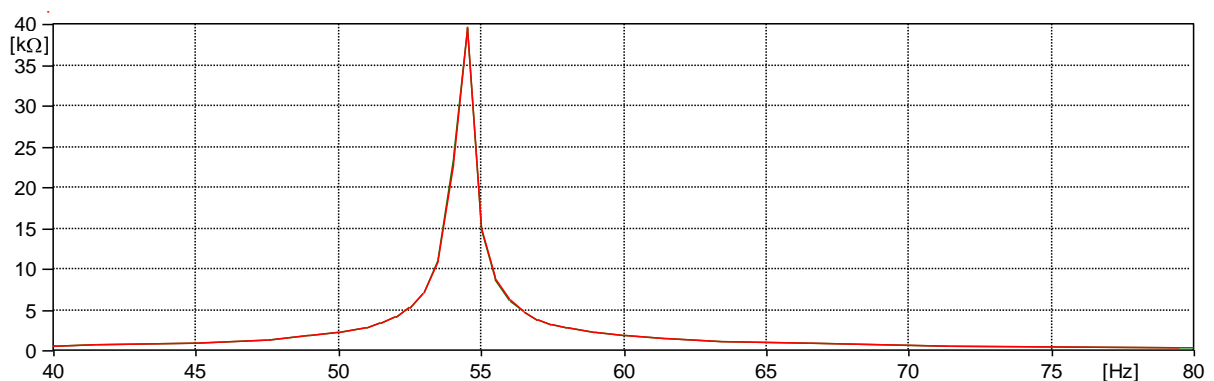


Figura 4-5: Etapa 1 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SA para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).

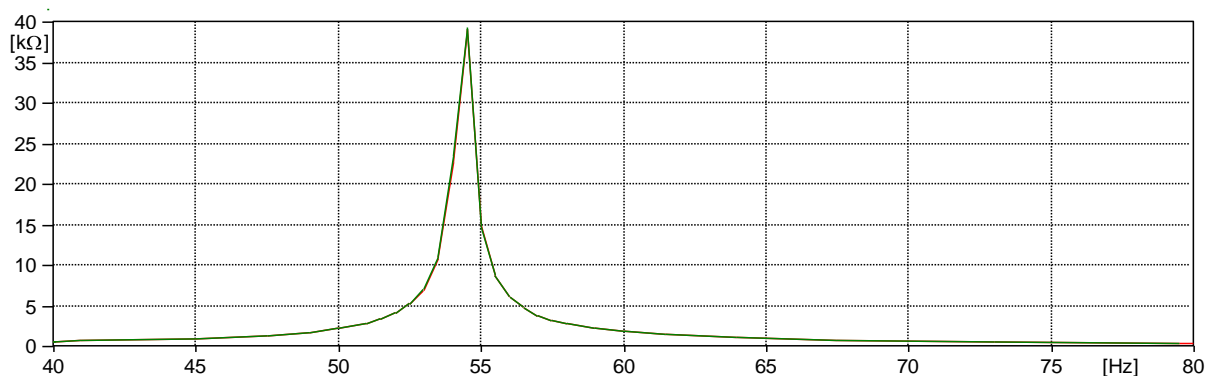


Figura 4-6: Etapa 1 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SB para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).

Ao observar a $Z(\square)$ vista da fase aberta identifica-se uma enorme alteração na característica dessa curva e que agora, ambas as modelagens de rede se mostram bastante aderentes ao longo de toda faixa de frequência em análise. Diferentemente do observado nas $Z(\square)$ vistas dos terminais da LT, agora há uma frequência de ressonância associada ao circuito, que neste caso ocorre para aproximadamente 54 Hz. Neste ponto, a impedância vista chega a cerca de 40 $k\Omega$

Comparando as Figura 4-3 e Figura 4-4 com as Figura 4-5 e Figura 4-6 tem-se um indicativo da predominância do efeito da LT sobre a rede quando se trata de fenômenos na fase aberta.

À luz desses fatos, foram simuladas a corrente de arco secundário e tensão na fase aberta para a faixa de 56 Hz a 66 Hz, que são as verificadas no estudo de projeto básico. Essa análise tem por intuito mostrar se a coerência obtida na $Z(\square)$ da fase aberta se repete nessas duas grandezas. Foram obtidas a Figura 4-7- e a Figura 4-8.

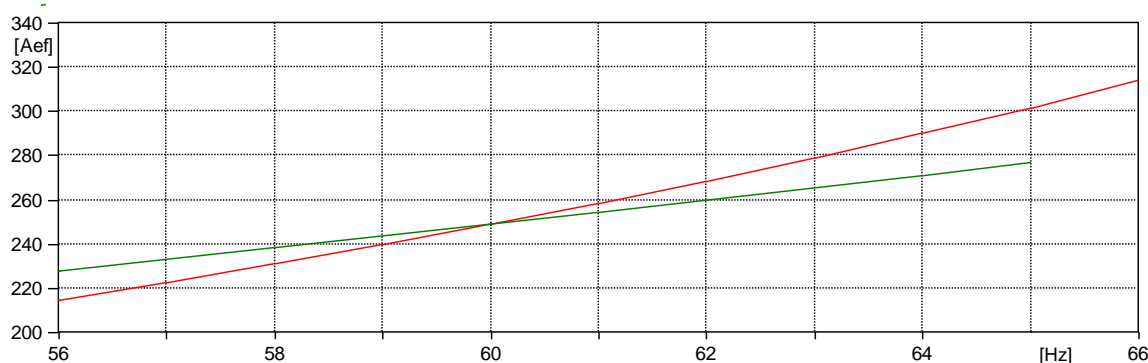


Figura 4-7: Etapa 1 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).

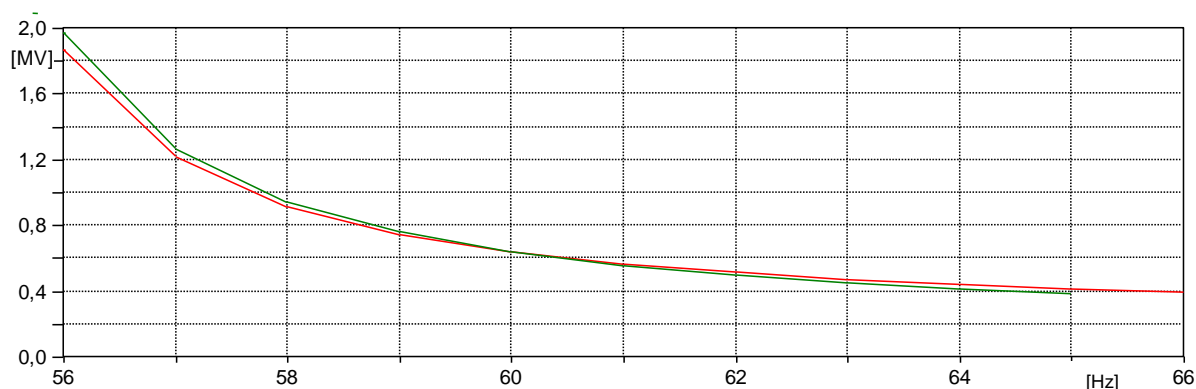


Figura 4-8: Etapa 1 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).

Ao avaliar as grandezas: corrente de arco secundário e tensão na fase aberta, verifica-se o que já foi identificado na Tabela 4.2, ou seja, os valores entre os dois modelos são compatíveis na frequência de 60 Hz. Nas demais frequências esses valores são diferentes. O maior desvio atinge aproximadamente 11%, sendo a rede completa com valores superiores em ambas as grandezas.

Como as respostas de $Z(\square)$ foram extremamente compatíveis dentro de toda faixa de frequência buscou-se averiguar a origem da divergência para frequências diferentes de 60 Hz. Nesse sentido foram simulados novos casos de comparação entre rede completa e equivalentes.

Recuperou-se o caso base e ele foi reajustado para compatibilizar, não mais a 60 Hz, mas sim a 66 Hz, as duas modelagens em questão no que tange a seus níveis de curto-circuito, fluxo e tensões máximas nos barramentos terminais da LT. A expectativa é que dessa forma, para frequência de 66 Hz, fosse obtido um desvio tão pequeno quanto verificado na $Z(\square)$ para essa frequência.

Os resultados, a 66 Hz entre as duas representações são apresentados na Figura 4-9- e na Figura 4-10.

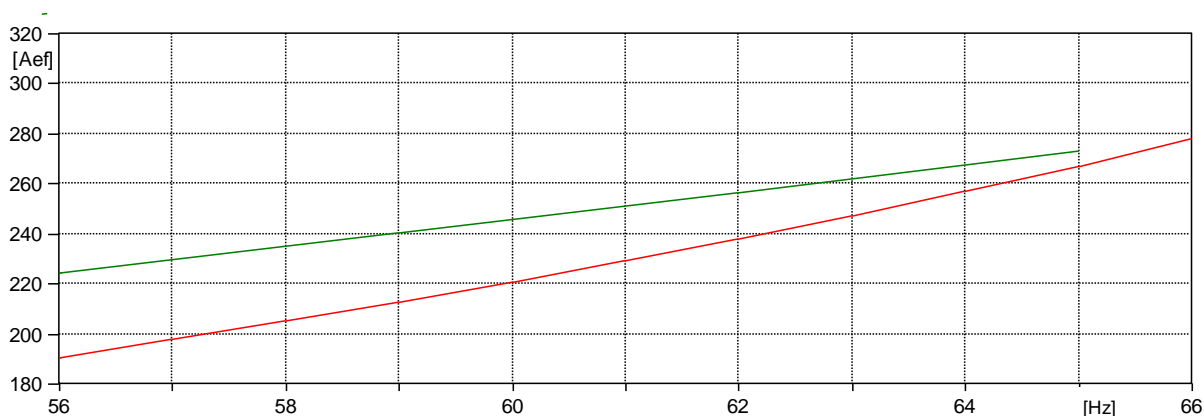


Figura 4-9: Etapa 1 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde) – Ajuste 66 Hz.

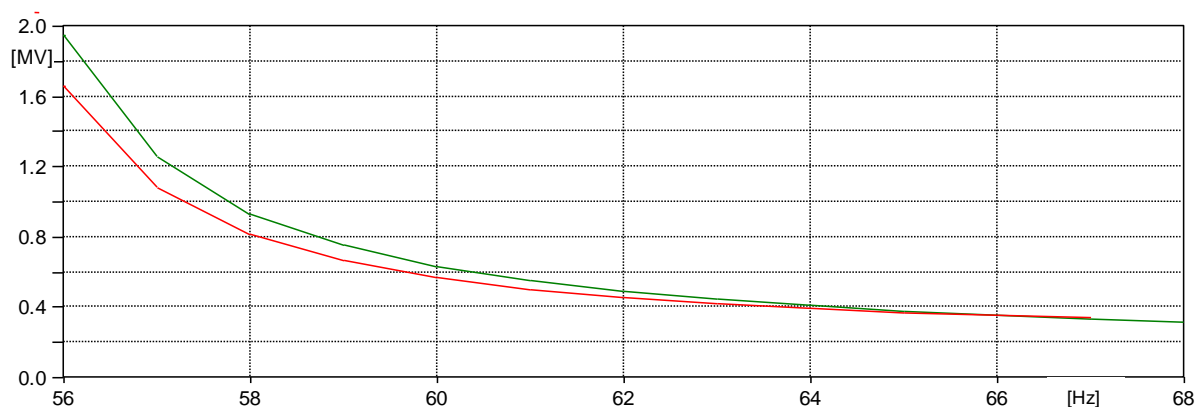


Figura 4-10: Etapa 1 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde) – Ajuste 66 Hz.

Com o novo ajuste das redes na frequência de 66 Hz nota-se que, para essa frequência, o desvio se torna quase nulo, da ordem de 0,3 % para as duas grandezas.

Portanto, as diferenças encontradas na Figura 4-7 e Figura 4-8 não são diretamente um efeito causado exatamente pela forma de representação da rede elétrica, mas sim como consequência da metodologia utilizada para cálculo desses valores a qual não reajusta o ponto de operação em outras frequências para a mesma da frequência nominal, inviabilizando, portanto, uma comparação adequada. É evidente que em casos de variação na frequência da rede (fenômeno que não é devidamente representado neste tipo de ferramenta computacional), o ponto de operação não será mantido e tensões irão variar, mas o critério de extinção de arco secundário verifica, em tese, as grandezas em sua condição de tensão máxima operativa.

A maneira usualmente utilizada para obtenção dos valores de corrente de arco secundário e tensão na fase aberta é através do *FREQUENCY SCAN*. O programa ATP executa “n” simulações de regime permanente modificando as frequências das fontes em cada uma delas. Como consequência, são alterados os pontos de operação da rede para cada frequência, o que impacta diretamente os valores da corrente de arco secundário e da tensão na fase aberta, pois estes dependem, majoritariamente, além das impedâncias da LT, da tensão nas fases sãs e da impedância vista no ponto de falta na fase aberta.

Finalmente, ainda dentro da Etapa 1, realizou-se uma análise de sensibilidade com as variáveis indicadas no item 4.1.2 a fim de verificar se os valores de corrente de arco secundário e primeiro pico de TRT após extinção do arco são coerentes tanto nas simulações com a rede completa quanto nas simulações com equivalentes conectados às barras terminais da LT. Ressalta-se que essas variáveis sendo monitoradas são as que compõem o critério de extinção de arco secundário vigente, conforme item 3.3.

Os resultados apresentados das correntes de arco secundário se resumirão à frequência 60 Hz, tendo em vista que as diferenças associadas à variação na frequência existem devido a variações no ajuste da rede.

A Tabela 4.3 apresenta, para cada caso de rede (base, variação de comprimento, de compensação, etc), os maiores desvios encontrados em cada uma das duas grandezas de interesse. Para consultar essas variações quantitativamente, deve-se verificar o Apêndice B. Os desvios são admitidos como sendo da rede equivalente com relação à rede completa.

Tabela 4.3: – Comparativo entre Sistema Completo “S1 – S2” x Sistema Equivalente “EQ1 – EQ2”

TERMINAL COM DEFEITO APLICADO	CASO	SISTEMA COMPLETO (S1-S2)			SISTEMA EQUIV. (EQ1-EQ2)			S X EQ		
		I_{arc_60Hz} (Arms)	I_{arc_66Hz} (Arms)	1º pico TRT (kV)	I_{arc_60Hz} (Arms)	I_{arc_66Hz} (Arms)	1º pico TRT (kV)	DESVIO I_{arc_60Hz} (Arms)	DESVIO I_{arc_66Hz} (Arms)	DESVIO 1º pico TRT (kV)
SA	Base	248.8	313.86	114.1	249.2	282.75	112.9	0.16%	-9.91%	-1.05%
	↓ Pcc	248.75	318.13	113.18	248.58	282.68	112.68	-0.07%	-11.14%	-0.44%
	↑ Pcc	249.17	306.11	115.3	249.25	282.83	112.89	0.03%	-7.61%	-2.09%
	↑ Comprimento	330.46	425.07	111.82	330.56	382.63	117.48	0.03%	-9.98%	5.06%
	↓ Comprimento	172.02	214.07	117.02	172.02	192.54	118.52	0.00%	-10.06%	1.28%
	↓ Compensação	254.76	321.28	128.33	255.65	289.92	127.09	0.35%	-9.76%	-0.97%
	↑ Compensação	239.67	303.07	97.901	239.43	272.29	96.789	-0.10%	-10.16%	-1.14%
	↑ Carregamento	250.58	343.06	113.73	250.55	285.26	113.53	-0.01%	-16.85%	-0.18%
	↑↑ Carregamento	251.64	318.84	115.67	251.13	287.61	113.79	-0.20%	-9.79%	-1.63%
	Ressonância a 60 Hz	242.8	306.6	102.51	242.67	275.79	101.88	-0.05%	-10.05%	-0.61%
	LT não Transposta	271.34	341.49	122.51	271.8	307.24	122.19	0.17%	-10.03%	-0.26%
Xneuro = 800 Ω	64.849	123.6	33.341	65.259	112.16	32.623	0.63%	-9.26%	-2.15%	
SB	Base	249.82	317.75	110.86	250.32	285.45	110.72	0.20%	-10.17%	-0.13%
	↓ Pcc	249.33	324.1	111.61	249.19	284.37	110.24	-0.06%	-12.26%	-1.23%
	↑ Pcc	250.32	310.71	110.73	250.33	285.12	110.83	0.00%	-8.24%	0.09%
	↑ Comprimento	332.29	432.59	116.03	332.22	387.43	118.94	-0.02%	-10.44%	2.51%
	↓ Comprimento	172.44	215.75	115.95	172.39	193.28	118.83	-0.03%	-10.41%	2.48%
	↓ Compensação	256.32	327.95	125.99	256.62	293.57	125.21	0.12%	-10.48%	-0.62%
	↑ Compensação	241.74	305.53	94.605	241.85	274.15	96.41	0.05%	-10.27%	1.91%
	↑ Carregamento	250.24	318.01	110.97	250.04	285.05	110.59	-0.08%	-10.36%	-0.34%
	↑↑ Carregamento	248.87	316.41	110.83	248.46	283.74	109.89	-0.16%	-10.33%	-0.85%
	Ressonância a 60 Hz	244.48	309.52	100.26	244.37	277.56	100.67	-0.04%	-10.33%	0.41%
	LT não Transposta	274.49	350.08	122.08	275.1	313.83	121.52	0.22%	-10.35%	-0.46%
Xneuro = 800 Ω	64.153	127.99	31.984	64.51	114.56	32.189	0.56%	-10.49%	0.64%	

Nota-se que os desvios na frequência de ajuste (60 Hz), são praticamente nulos. Já para máxima frequência da faixa (66 Hz) os desvios ficam na faixa dos 10 %, chegando até 18 %. Quanto ao primeiro pico de TRT após extinção do arco secundário têm-se desvios de -5%, aproximadamente. Ressalta-se que a TRT possui característica distinta da corrente de arco secundário, pois, segundo o critério, ela não é obtida em regime permanente, mas sim através de simulação no tempo, o que implica em outras aleatoriedades como efeitos das ondas trafegantes.

Nota-se, portanto, que a utilização de equivalentes diretamente nas barras terminais da LT pode apresentar, para a linha e a rede consideradas, uma boa aproximação para a obtenção da corrente de arco secundário e da tensão induzida na fase aberta, desde que o ponto de operação da rede esteja previamente ajustado para a frequência de análise. Caso isso não seja realizado os valores irão se alterar a depender da característica do sistema.

4.4.2 Etapa 2 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema Completo à Montante e Carga a Jusante (S1 – Carga)

Nesta etapa foram comparadas as seguintes modelagens:

- i. Sistema completo em ambos os terminais (S1 e S2)

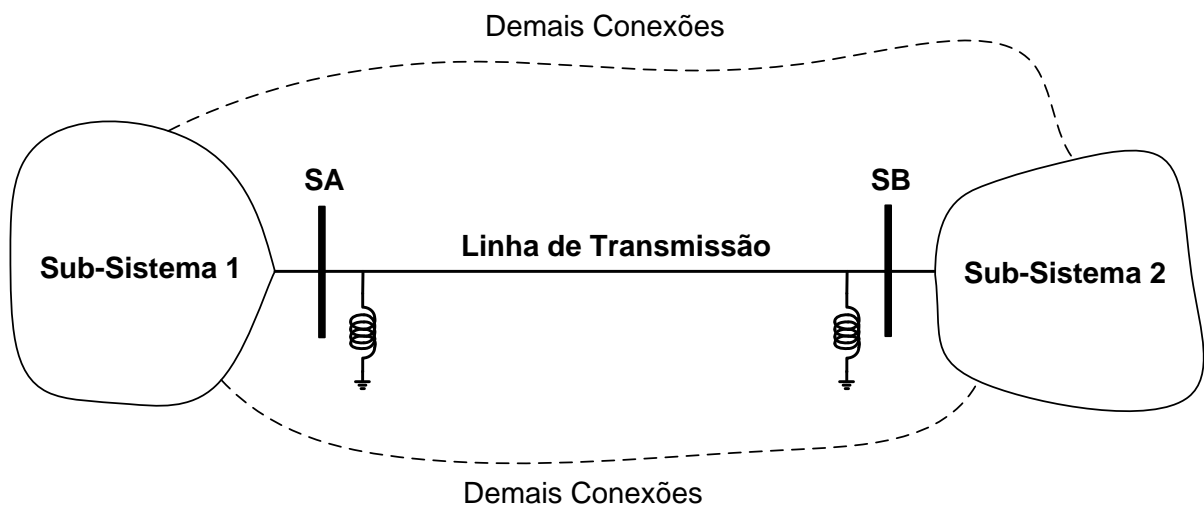


Figura 4-11: Rede Modelada para Etapa 2 – Sistema S1-S2.

- ii. Sistema Completo em um terminal e Carga Fictícia em outro (S1 e Carga RL)

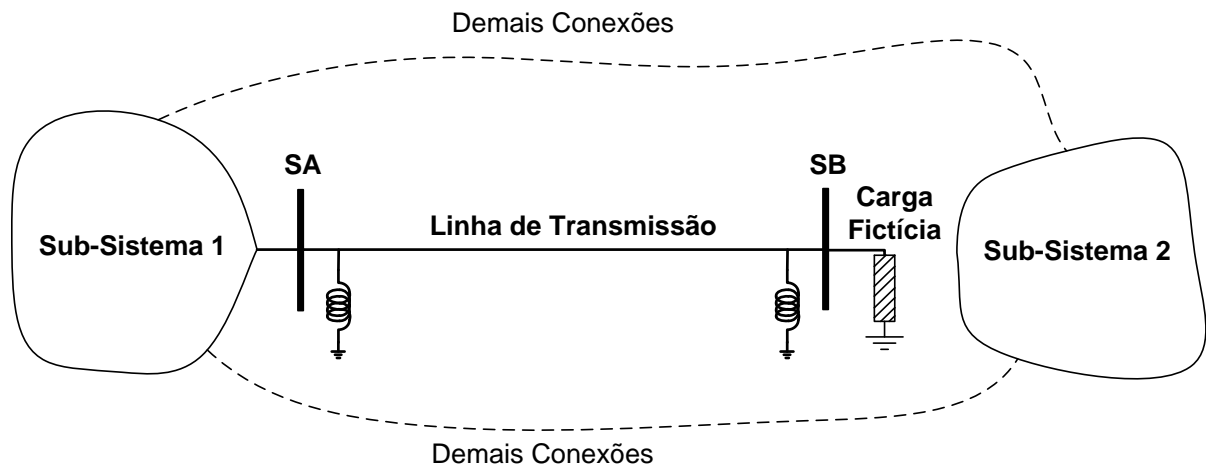


Figura 4-12: Rede Modelada para Etapa 2 – Sistema S1-Carga.

O ajuste da rede foi realizado para 60 Hz e como o carregamento de referência é inferior ao SIL da LT, escolheu-se uma carga de característica RL em paralelo.

A Tabela 4.4 apresenta as condições base do ajuste da Etapa 2.

Tabela 4.4: - Ajuste dos casos para Etapa 2 – Sistema Completo “S1-S2” x Sistema com carga fictícia “S1-Carga RL”

Grandeza	Sistema Completo (S1-S2)		Sistema Completo (S1 – Carga)		Desvio (%)
	Magnitude		Magnitude		
v:SA	1,102	pu	1,101	pu	-0,1%
v:SB/CARGA	1,100	pu	1,097	pu	-0,3%
FLUXO	413,2	MW	413,2	MW	0,0%
R	NA	ohm	628	ohm	-
L	NA	ohm	251	ohm	-
SA					-
CC1	21,97	kA _{rms}	21,14	kA _{rms}	-3,8%
CC3	31,65	kA _{rms}	29,85	kA _{rms}	-5,7%
SB					-
CC1	8,85	kA _{rms}	NA	kA _{rms}	-
CC3	15,95	kA _{rms}	NA	kA _{rms}	-
V _{aberta_60Hz}	1,574	pu	1,328	pu	-15,6%
I _{60Hz}	195,0	A _{rms}	196,0	A _{rms}	-10,9%

Diferentemente da etapa anterior, cujos desvios foram quase nulos, observa-se erros da ordem de -11 e 16% nas correntes de arco secundário e tensão na fase aberta, mesmo em 60 Hz.

Avaliando a $Z(\square)$ no terminal SA, foram obtidas curvas conforme a Figura 4-13.

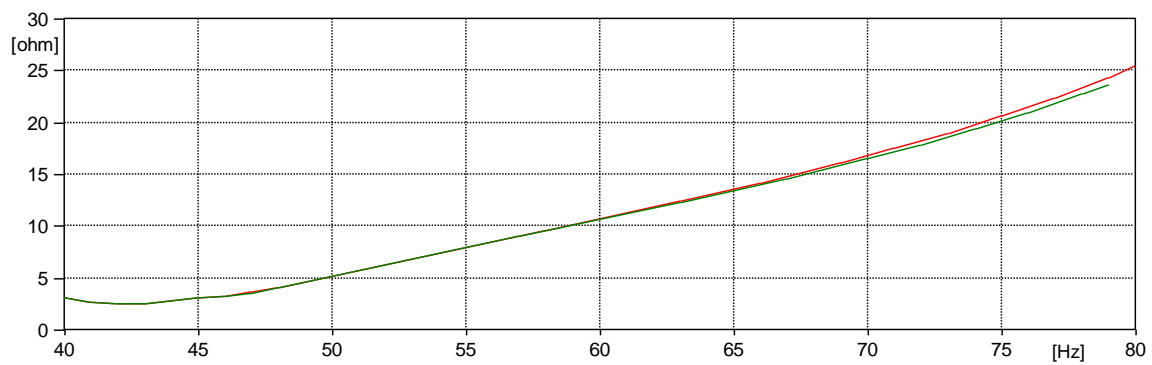


Figura 4-13: Etapa 2 – $Z(\square)$ no terminal SA para rede completa (vermelho) e Sistema- Carga RL (verde).

Como a representação no terminal SA é igual nas duas modelagens, a $Z(\square)$ vista desse ponto é bastante semelhante na faixa de frequência. Uma diferença se inicia a partir de 65 Hz, onde a representação da carga no terminal SB começa a influenciar a impedância vista de SA.

A Figura 4-14 ilustra a $Z(\square)$ vista do ponto de aplicação de defeito na fase aberta, no terminal SA.

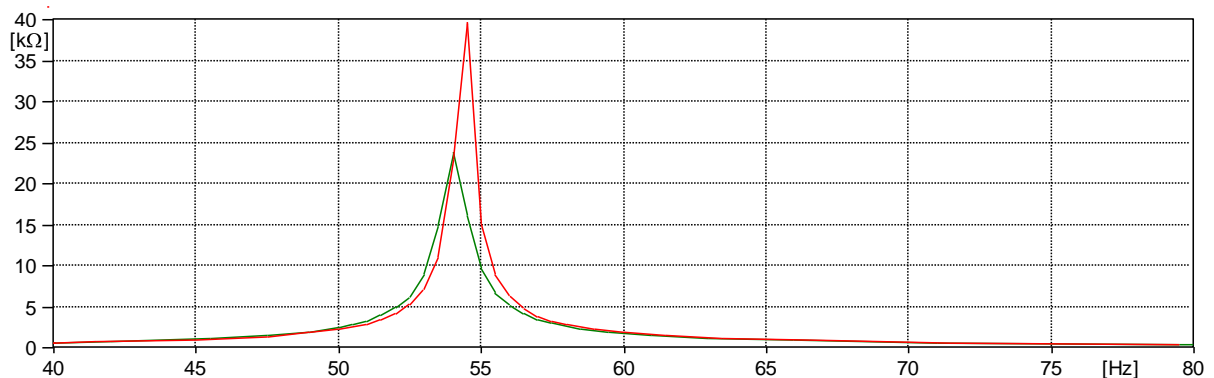


Figura 4-14: Etapa 2 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SB para rede completa (vermelho) e sistema completo – Carga RL (verde).

Nota-se que a $Z(\square)$ para as duas representações são distintos nas frequências ao redor da frequência de ressonância, esta por sua vez apresentou um deslocamento de 0,5 Hz para a esquerda se comparado ao caso de rede completa. O desvio observado a 60 Hz foi de -4,9 %, enquanto na Etapa 1 a $Z(\square)$ apresentou desvio quase nulo para toda faixa de frequência.

A Figura 4-15 e a Figura 4-16 são avaliações na frequência da corrente de arco secundário e tensão na fase aberta.

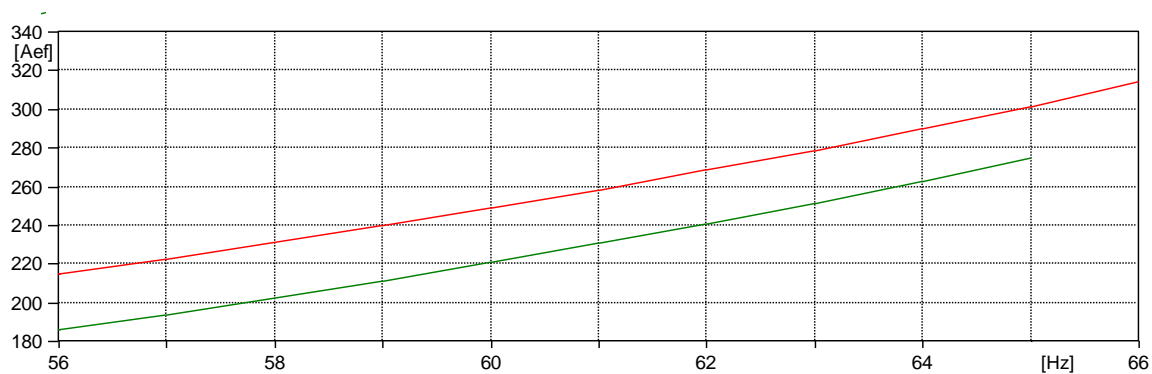


Figura 4-15: Etapa 2 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e equivalentes (verde).

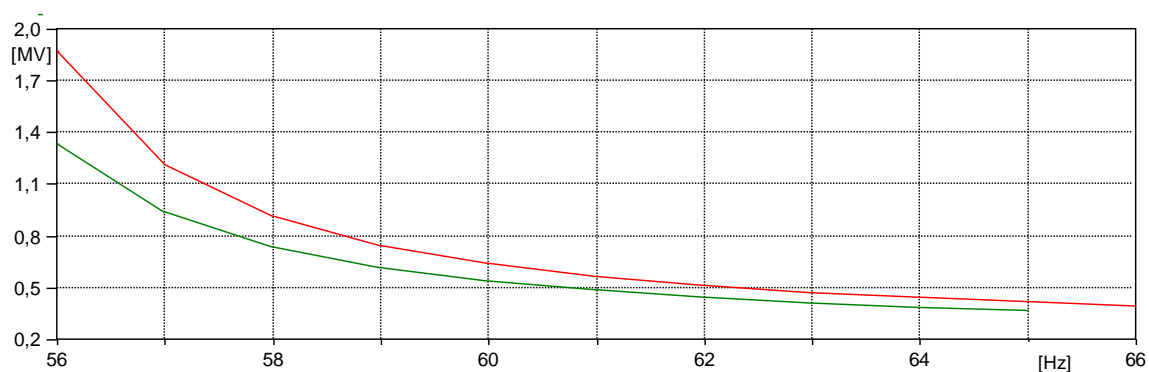


Figura 4-16: Etapa 2 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e sistema completo – Carga RL (verde).

Conforme visto nas figuras acima, a forma de representação da rede pode resultar em desvios significativos nos valores de corrente de arco secundário e tensão na fase aberta com relação à modelagem mais completa, mesmo na frequência de ajuste do caso (60 Hz). O desvio da corrente de arco secundário na frequência fundamental foi de -11%, e da tensão induzida na fase aberta de -16%, sendo a representação S1-S2 a de maior valor.

Observa-se que o erro de 2,4% identificado na $Z(\square)$ entre as representações (modelagem S1-S2 com valor superior) se amplifica quando observadas a corrente de arco secundário e a tensão induzida na fase aberta.

Uma explicação para a elevação do desvio, além de diferenças na $Z(\square)$, é o fato de que com a carga fictícia RL a tensão tende a ser reduzida nas fases sãs, impactando, conseqüentemente, a tensão da fase aberta e a corrente de arco secundário. Se realizado com carga RC, espera-se que os desvios se reduzam, pois quando da abertura monopolar as tensões nas fases sãs teriam maior sustentação do que com carga RL, e a expectativa é que se aproxime mais dos resultados da modelagem com o sistema completo.

A Tabela 4.5 apresenta a análise de sensibilidade sobre parâmetros da rede e da LT. Para consultar essas variações quantitativamente, pode-se verificar o Apêndice A. Os desvios são admitidos como sendo da rede com carga fictícia com relação à rede completa.

Tabela 4.5: – Comparativo entre Sistema Completo “S1 – S2” x Sistema com Carga Fictícia “S1 – CG”

TERMINAL COM DEFEITO APLICADO	CASO	SISTEMA COMPLETO (S1-S2)			SISTEMA CARGA (S1-CARGA)			S X Carga		
		I_{arc_60Hz} (Arms)	I_{arc_66Hz} (Arms)	1º pico TRT (kV)	I_{arc_60Hz} (Arms)	I_{arc_66Hz} (Arms)	1º pico TRT (kV)	DESVIO I_{arc_60Hz} (Arms)	DESVIO I_{arc_66Hz} (Arms)	DESVIO 1º pico TRT (kV)
SA	Base	248.8	313.86	114.1	220.87	287.48	103.31	-11.23%	-8.41%	-9.46%
	↓ Pcc	248.75	346.94	113.18	220.58	288.46	103.06	-11.32%	-16.86%	-8.94%
	↑ Pcc	249.17	306.11	115.3	221.11	279.95	104.71	-11.26%	-8.55%	-9.18%
	↑ Comprimento	330.46	425.07	111.82	291.09	389.71	98.27	-11.91%	-8.32%	-12.12%
	↓ Comprimento	172.02	214.07	117.02	155.61	197.69	106.22	-9.54%	-7.65%	-9.23%
	↓ Compensação	254.76	321.28	128.33	239.96	308.95	123.05	-5.81%	-3.84%	-4.11%
	↑ Compensação	239.67	303.07	97.901	193.09	256.72	80.04	-19.44%	-15.29%	-18.24%
	↑ Carregamento	250.58	343.06	113.73	208.84	274.84	97.95	-16.66%	-19.89%	-13.88%
	↑↑ Carregamento	251.64	318.84	115.67	195.27	264.04	91.86	-22.40%	-17.19%	-20.59%
	Ressonância a 60 Hz	242.8	306.6	102.51	207.86	272.83	90.30	-14.39%	-11.01%	-11.91%
	LT não Transposta	271.34	341.49	122.51	256.22	328.21	114.30	-5.57%	-3.89%	-6.70%
Xneuro = 800 Ω	64.849	123.6	33.341	79.63	144.94	40.91	22.79%	17.27%	22.70%	
SB	Base	249.82	317.75	110.86	210.96	262.52	94.04	-15.56%	-17.38%	-15.17%
	↓ Pcc	249.33	324.1	111.61	210.26	262.66	92.91	-15.67%	-18.96%	-16.76%
	↑ Pcc	250.32	310.71	110.73	211.24	255.69	93.93	-15.61%	-17.71%	-15.18%
	↑ Comprimento	332.29	432.59	116.03	276.42	356.32	99.08	-16.81%	-17.63%	-14.60%
	↓ Comprimento	172.44	215.75	115.95	150.00	182.71	97.97	-13.01%	-15.31%	-15.50%
	↓ Compensação	256.32	327.95	125.99	215.46	273.42	105.57	-15.94%	-16.63%	-16.21%
	↑ Compensação	241.74	305.53	94.605	210.51	254.99	83.27	-12.92%	-16.54%	-11.98%
	↑ Carregamento	250.24	318.01	110.97	183.59	215.49	84.97	-26.63%	-32.24%	-23.43%
	↑↑ Carregamento	248.87	316.41	110.83	152.85	167.67	71.03	-38.58%	-47.01%	-35.91%
	Ressonância a 60 Hz	244.48	309.52	100.26	215.59	265.94	89.18	-11.82%	-14.08%	-11.05%
	LT não Transposta	274.49	350.08	122.08	257.35	331.69	112.78	-6.24%	-5.25%	-7.62%
Xneuro = 800 Ω	64.153	127.99	31.984	45.40	96.69	25.54	-29.24%	-24.45%	-20.16%	

Conforme esperado, os desvios nas grandezas avaliadas anteriormente se repetem e até se amplificam quando da variação de características da rede e do circuito.

Assim, conclui-se que a representação de sistema completo e carga fictícia RL apresenta erros significativos na $Z(\square)$, tensão induzida na fase aberta, na corrente de arco secundário e

no primeiro pico de TRT, mesmo na frequência de ajuste do caso (60 Hz), sendo, portanto, uma representação não recomendada para esse tipo de estudo, ainda que ofereça fácil controle sobre o fluxo passante na LT.

4.4.3 Etapa 3 – Comparação entre Sistema Completo em ambos os terminais (S1 – S2) e Sistema com Fontes Ideais/Barras infinitas (F1 – F2)

Tendo em vista os resultados obtidos na Etapa 1 (item 4.4.1), decidiu-se então avaliar um caso de representação ainda mais simplificada. Ao invés de considerar equivalentes nos terminais da LT, considerar barras infinitas ($Z_{eq} = 0$ ohm) em ambos os terminais, e comparar os resultados com o sistema completo.

Os casos considerados nesta etapa são ilustrados na Figura 4-17 e na Figura 4-18.

- i. Sistema completo em ambos os terminais (S1 e S2)

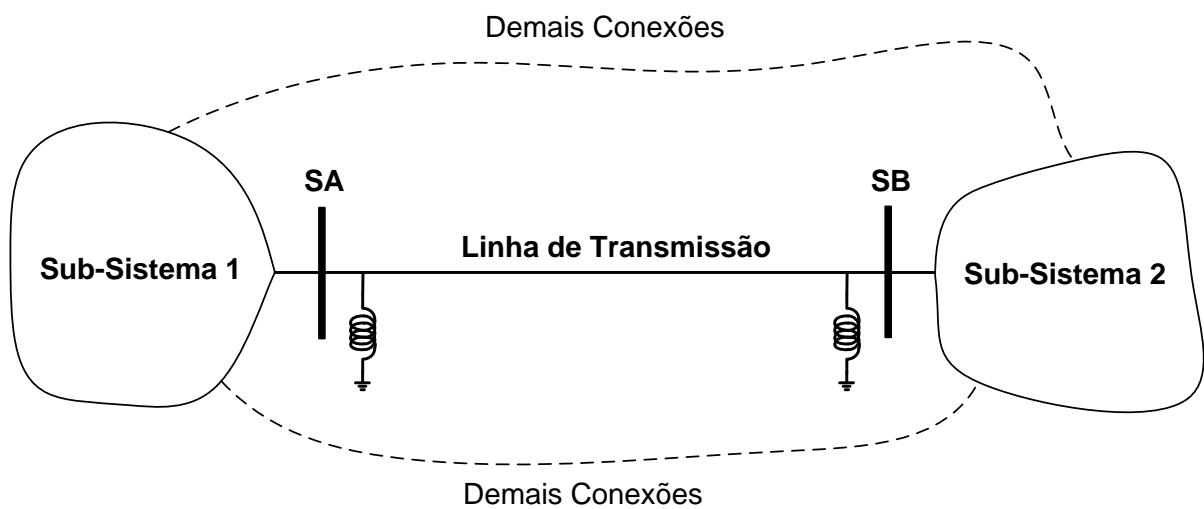


Figura 4-17: Rede Modelada para Etapa 3 – Sistema S1-S2.

- ii. Barra Infinita em ambos os terminais (F1 e F2)

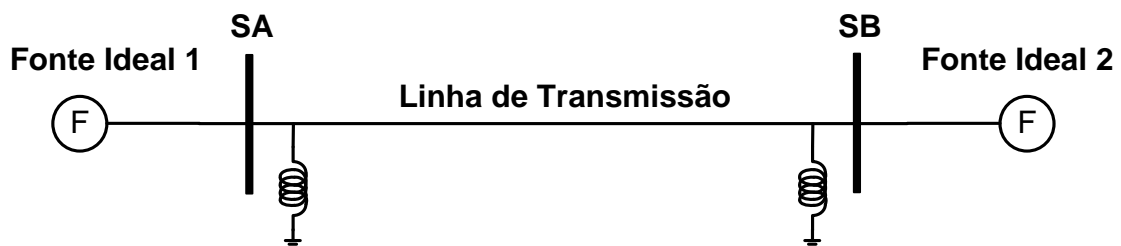


Figura 4-18: Rede Modelada para Etapa 3 – Sistema F1-F2.

O ajuste da rede foi realizado para 60 Hz. Destaca-se que não se aplica avaliação de nível de curto-circuito nas barras terminais por se tratar de barras infinitas.

A Tabela 4.6 apresenta as condições base do ajuste da Etapa 2.

Tabela 4.6: - Ajuste dos casos para Etapa 3 – Sistema Completo “S1-S2” x Sistema com Fontes Ideais “F1-F2”

Grandeza	Sistema Completo		Barra Infinita		Desvio (%)
	Magnitude		Magnitude		
v:SA	1,102	pu	1,100	pu	-0,2%
v:SB	1,100	pu	1,100	pu	0,0%
FLUXO	413,2	MW	415	MW	0,4%
MIGI-					-
CC1	21,97	kA _{rms}	NA (*)	kA _{rms}	-
CC3	31,65	kA _{rms}	NA (*)	kA _{rms}	-
GIMI-					-
CC1	8,85	kA _{rms}	NA (*)	kA _{rms}	-
CC3	15,95	kA _{rms}	NA (*)	kA _{rms}	-
V _{aberta_60Hz}	1,574	pu	1,66	pu	5,5%
I _{60Hz}	248	A _{rms}	253	A _{rms}	2,0%

(*) – NA = Não se Aplica

Os erros encontrados para tensão na fase aberta e corrente de arco secundário a 60 Hz foram de 5,5% e 2,0%, respectivamente.

A representação por fontes ideais torna algo incoerente a verificação do $Z(\square)$ nas barras terminais e, portanto, não consta nesta etapa a referida comparação.

Todavia, é viável avaliar a $Z(\square)$ no ponto de aplicação de falta na fase aberta, onde se obtêm a Figura 4-19 e a Figura 4-20.

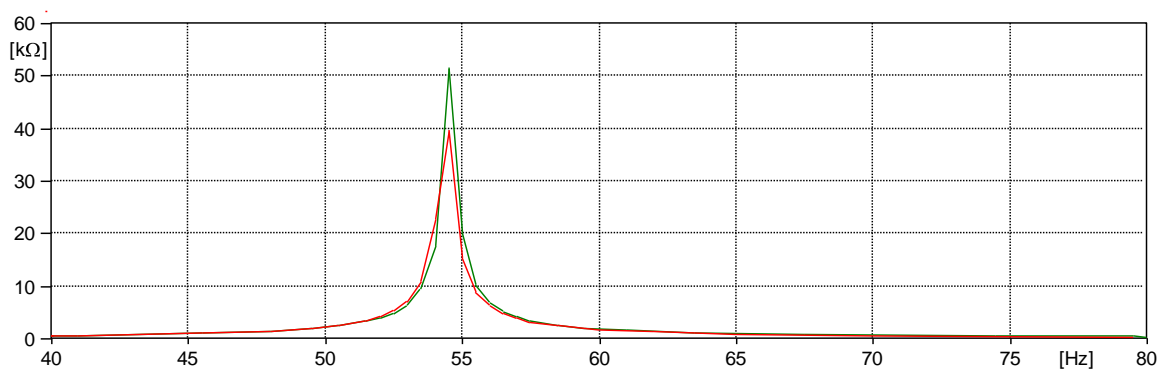


Figura 4-19: Etapa 3 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SA para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).

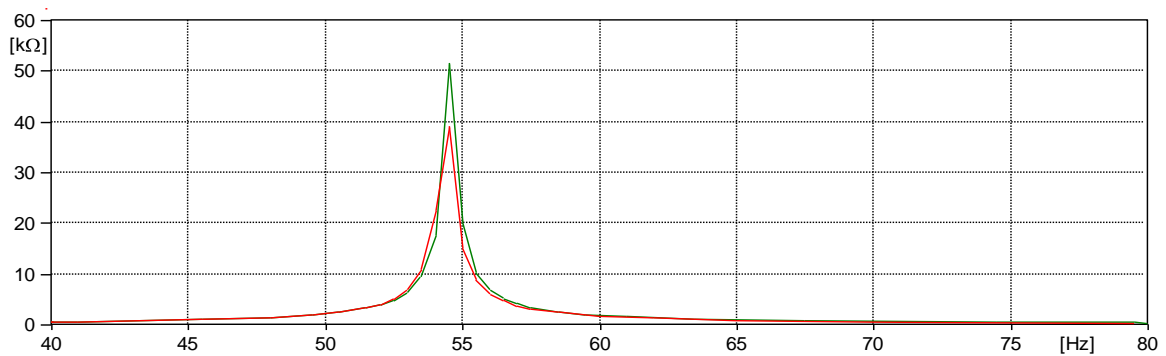


Figura 4-20: Etapa 3 – $Z(\square)$ na fase aberta no terminal SB para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).

Nota-se que a $Z(\square)$ vista do ponto de falta na fase aberta possui diferenças entre as duas representações, especialmente em valores ao redor da frequência de ressonância. O desvio a 60 Hz foi de até 5,7%, sendo o caso de barras infinitas o de maior valor.

Avaliou-se a resposta em frequência da corrente de arco secundário e da tensão na fase aberta a fim de verificar se, nessas grandezas, o comportamento identificado para impedância é coerente. A Figura 4-21 e a Figura 4-22 mostram os resultados encontrados.

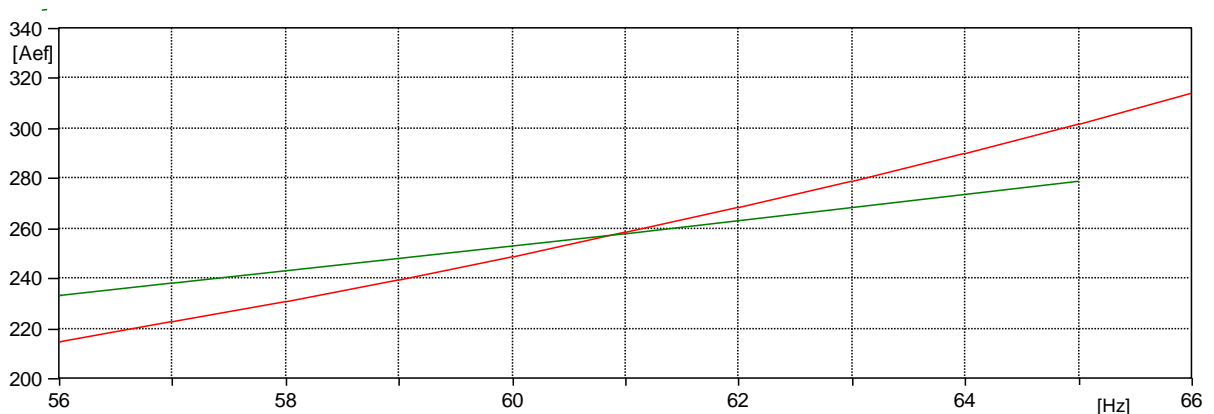


Figura 4-21: Etapa 1 – Corrente de Arco secundário na frequência para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).

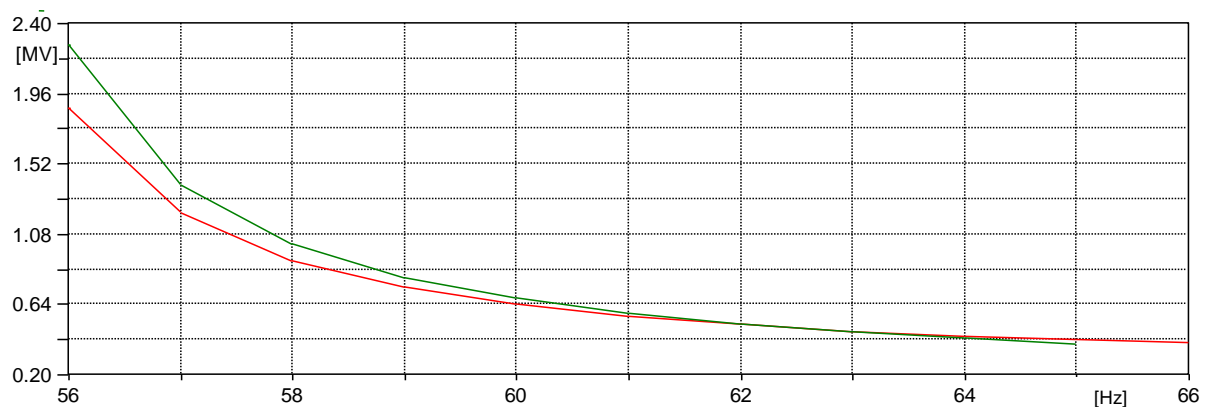


Figura 4-22: Etapa 3 – Tensão na fase aberta na frequência para rede completa (vermelho) e barras infinitas (verde).

Os valores de corrente de arco secundário e tensão na fase aberta possuem, em 60 Hz, desvio de 2% entre as duas representações de rede em questão. Já a tensão na fase aberta, o desvio é de 5,5% a 60 Hz. Para as duas grandezas, na frequência ajustada, tensões e correntes na rede com barra infinita foram superiores à rede completa.

Um fato que se destaca é que na rede com barra infinita, a $Z(\square)$ a 60 Hz vista no ponto de falta é superior à da rede completa e, por outro lado, a corrente de arco secundário para mesma frequência, é também superior. O que inicialmente poderia representar uma incoerência justifica-se pelo fato de que, com barras infinitas, a tensão nas fases sãs nos terminais se mantém em 1.1 pu, o que eleva a tensão de fase aberta e também a corrente de arco secundário com relação a modelagem de rede completa nesta frequência. Portanto, pelos erros verificados em I_{arc} e V_{abe} , conclui-se que, para frequência de 60 Hz, há uma compensação do erro encontrado na $Z(\square)$ pelo fato da tensão ser absoluta nos terminais da LT.

Portanto, os resultados apontam que o fato das tensões nos terminais da LT serem fixas em 1,1 pu, obtém-se, em 60 Hz, resultados com erros relativamente pequenos e, para o caso estudado, as diferenças demonstram que sempre a modelagem por barras infinitas é mais conservadora do que por rede completa nessa frequência, o que não necessariamente ocorre nas demais.

Como exemplo, tem-se que Figura 4-21 aponta que para frequências superiores a 61 Hz a corrente de arco secundário da rede completa se torna superior à da rede com fonte ideal, principalmente pelo fato das tensões terminais se elevarem até valores superiores à máxima tensão operativa (1,1 pu em 500 kV) com o aumento da frequência, enquanto a modelagem por barras infinitas mantém as tensões sempre nesse patamar.

Foram realizadas ainda análises de sensibilidade com parâmetros da LT e da rede a fim de verificar se os valores de corrente de arco secundário e primeiro pico de TRT após extinção do arco secundário são coerentes para a rede completa e com equivalentes conectados às barras terminais da LT. A tabela a seguir apresenta um resumo do impacto dos desvios encontrados considerando as variações de cada uma das grandezas listadas. Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados dessas simulações de forma mais detalhada. Para consultar essas variações quantitativamente, pode-se verificar o Apêndice B. Os desvios são admitidos como sendo da rede como barras infinitas com relação à rede completa.

Tabela 4.7: – Comparativo entre Sistema Completo “S1 – S2” x Sistema com Barras Infinitas “F1 – F2”

TERMINAL COM DEFEITO APLICADO	CASO	SISTEMA COMPLETO (S1-S2)			FONTES IDEAIS (F1-F2)			S X F		
		I_{arc_60Hz} (Arms)	I_{arc_66Hz} (Arms)	1º pico TRT (kV)	I_{arc_60Hz} (Arms)	I_{arc_66Hz} (Arms)	1º pico TRT (kV)	DESVIO I_{arc_60Hz} (Arms)	DESVIO I_{arc_66Hz} (Arms)	DESVIO 1º pico TRT (kV)
SA	Base	248.8	313.86	114.1	252.99	283.95	113.95	1.68%	-9.53%	-0.13%
	↓ Pcc	248.75	346.94	113.18	NA	NA	NA			
	↑ Pcc	249.17	306.11	115.3	NA	NA	NA			
	↑ Comprimento	330.46	425.07	111.82	336.5	383.41	113.95	1.83%	-9.80%	1.90%
	↓ Comprimento	172.02	214.07	117.02	174.44	193.81	119.17	1.41%	-9.46%	1.84%
	↓ Compensação	254.76	321.28	128.33	257.3	288.97	128.64	1.00%	-10.06%	0.24%
	↑ Compensação	239.67	303.07	97.901	247.37	277.38	98.371	3.21%	-8.48%	0.48%
	↑ Carregamento	250.58	316.20	113.73	254.88	286.7	114.8	1.72%	-9.34%	0.94%
	↑↑ Carregamento	251.64	318.84	115.67	255.6	288.79	115.12	1.57%	-9.42%	-0.48%
	Ressonância a 60 Hz	242.8	306.6	102.51	249.4	279.79	103.28	2.72%	-8.74%	0.75%
	LT não Transposta	271.34	341.49	122.51	275.46	308.52	124.12	1.52%	-9.65%	1.31%
Xneuro = 800 Ω	64.849	123.6	33.341	64.544	110.62	32.281	-0.47%	-10.50%	-3.18%	
SB	Base	249.82	317.75	110.86	252.82	284.14	114.56	1.20%	-10.58%	3.34%
	↓ Pcc	249.33	324.1	111.61	NA	NA	NA			
	↑ Pcc	250.32	310.71	110.73	NA	NA	NA			
	↑ Comprimento	332.29	432.59	116.03	336.5	384.49	114.56	1.27%	-11.12%	-1.27%
	↓ Comprimento	172.44	215.75	115.95	174.22	193.59	118.99	1.03%	-10.27%	2.62%
	↓ Compensação	256.32	327.95	125.99	257.27	289.44	128.14	0.37%	-11.74%	1.71%
	↑ Compensação	241.74	305.53	94.605	246.96	277.16	98.709	2.16%	-9.29%	4.34%
	↑ Carregamento	250.24	318.01	110.97	253.68	285.11	114.95	1.37%	-10.35%	3.59%
	↑↑ Carregamento	248.87	316.41	110.83	252.8	284.4	114.55	1.58%	-10.12%	3.36%
	Ressonância a 60 Hz	244.48	309.52	100.26	249.05	279.63	103.79	1.87%	-9.66%	3.52%
	LT não Transposta	274.49	350.08	122.08	276.71	311.3	124.69	0.81%	-11.08%	2.14%
Xneuro = 800 Ω	64.153	127.99	31.984	63.073	109.65	31.423	-1.68%	-14.33%	-1.75%	

Com os valores apresentados anteriormente nota-se que a modelagem da rede por barras infinitas apresenta desvios de até 3,21 % na corrente de arco secundário a 60 Hz (valor ajustado), 16,43% para frequência de 66 Hz e 4,34 % no primeiro pico da TRT após extinção do arco secundário.

4.4.4 Resumo dos maiores desvios encontrados

A Tabela 4.8 e a Tabela 4.9 apresentam os maiores desvios encontrados nas correntes de arco secundário a 60 Hz e 66 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco para cada tipo de variação aplicada. Esses dados foram obtidos diretamente das Tabela 4.3, Tabela 4.5 e Tabela 4.7. Os resultados reforçam as observações mencionadas nos itens 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3.

Tabela 4.8: – Maiores desvios nas correntes de arco secundário a 60 Hz e 66 Hz por tipo de variação e modelagem da rede.

Variação	DESVIO PB x EQ		DESVIO PB x CF		DESVIO PB x ID	
	I _{arc_60Hz}	I _{arc_66Hz}	I _{arc_60Hz}	I _{arc_66Hz}	I _{arc_60Hz}	I _{arc_66Hz}
Não	0,2 %	-10,2 %	-15,6 %	-17,4	1,7 %	-10,6 %
Pcc	-0,1 % (78%MONO /85%TRI)	-12,3 % (78%MONO /85%TRI)	-15,7 % (78%MONO /85%TRI)	-19,7 % (78%MONO /85%TRI)	NA	NA
Comprimento	0,0 % (-)	-10,4 % (130%)	-16,8 % (130%)	-17,6% (130%)	1,8 % (130%)	-10,7 % (70%)
Compensação	0,4 % (50%)	-10,5 % (50%)	-19,4 % (90%)	-16,5 % (90%)	3,2 % (90%)	4,3 % (90%)
Carregamento	-0,2 % (100% SIL)	-10,4 % (90% SIL)	-38,6 % (100% SIL)	-47,0 % (100% SIL)	1,7 % (90% SIL)	-9,3 % (90% SIL)
Ressonância À 60 Hz	-0,1 %	-10,3 %	-14,4 %	-14,1 %	2,7 %	-9,7 %
Sem Transp.	0,2 %	-10,4 %	-6,2 %	-5,2%	1,5 %	-11,1 %
Xneutro = 800 Ω	0,6 %	-10,5 %	-29,2 %	22,8 %	-1,7 %	-14,3 %

Tabela 4.9: – Maiores desvios no primeiro pico de TRT após extinção do arco por tipo de variação e modelagem da rede.

Variação	DESVIO PB x EQ	DESVIO PB x CF	DESVIO PB x ID
	TRT _{60Hz}	TRT _{60Hz}	TRT _{60Hz}
Não	-1,1 %	-15,2 %	3,34 %
Pcc	-2,1 % (115 %MONO /120 %TRI)	-16,8 % (78 %MONO /85 %TRI)	NA
Comprimento	5,06 % (130%)	-15,5 % (70 %)	2,62% (70 %)
Compensação	1,9 % (90 %)	-18,2% (90 %)	4,3 % (90 %)
Carregamento	-1,6 % (100 % SIL)	-35,9 % (100 % SIL)	3,6 % (90 % SIL)
Ressonância À 60 Hz	-0,4 %	-11,9 %	3,5 %
Sem Transp.	-0,5 %	-7,6 %	2,1 %
Xneutro = 800 Ω	-2,2 %	22,7 %	-3,2 %

4.5 COMPARAÇÃO COM PROJETO BÁSICO REAL

A partir das constatações anteriores a respeito da modelagem da rede selecionou-se um projeto para realizar a comparação dos resultados obtidos nos estudos do Projeto (que considerou rede completa) com os resultados por modelagens de rede simplificadas: através de equivalentes calculados para 60 Hz e barras infinitas no terminal da LT. O objetivo é verificar se com a representação simplificada haveria alteração nas conclusões do estudo.

Considerações gerais a respeito da comparação:

- As informações contidas nos relatórios, seja a modelagem dos elementos, sejam os resultados apresentados, são as referências de comparação adotadas. Contudo, não há qualquer garantia da exatidão dos resultados. As análises de Projeto Básico não contemplam resimulação de casos, tornando difícil a identificação de certas inconformidades.
- Foi realizada a simulação com o mesmo nível de curto-circuito trifásico e monofásico (para modelagem com equivalentes) a partir dos dados apresentados no estudo de projeto.
- Será considerado o fluxo em apenas um sentido, o que também não é detalhado relatório de projeto.
- A LT 500 kV foi modelada tendo como referência seu projeto e a modelagem em ATP reproduziu os mesmos parâmetros que os definidos na documentação do projeto da LT.
- Foi adotado um fator de qualidade nos reatores de linha de 300. Esse valor não é mencionado no relatório e possui bastante influência sobre a magnitude dos resultados encontrados próximos aos pontos de ressonância.
- Preservando a identificação dos projetos, foram definidos nomes fictícios para as barras terminais, as quais doravante serão chamadas Itália e França.
- Não é enfoque deste trabalho avaliar as solicitações de tensões e correntes sobre os reatores de neutro que porventura venham a ser necessários. Consequentemente, todas as conclusões aqui apontadas se restringem a questões associadas a extinção do arco secundário. Na prática, essa questão deve ser verificada juntamente à especificação do equipamento e às sobretensões de manobra como religamentos e rejeição de carga, que sofrem impacto direto do valor do reator de neutro escolhido.

Os dados da LT 500 kV referentes ao Projeto de comparação são encontrados no Apêndice D. A referida linha possui 221 km e possui compensação *shunt* em seus dois terminais, sendo 150 Mvar cada um deles.

4.5.1 Verificação sem Reatores de Neutro

A primeira avaliação do estudo de referência é o comportamento da tensão na fase aberta sem a presença de reatores de neutro nos reatores de linha de transmissão. A Figura 4-23 e a Figura 4-24 ilustram, respectivamente, a tensão na fase aberta encontrada no projeto (rede completa) e através da modelagem simplificada (com equivalentes – curva vermelha, com barras infinitas – curva verde).

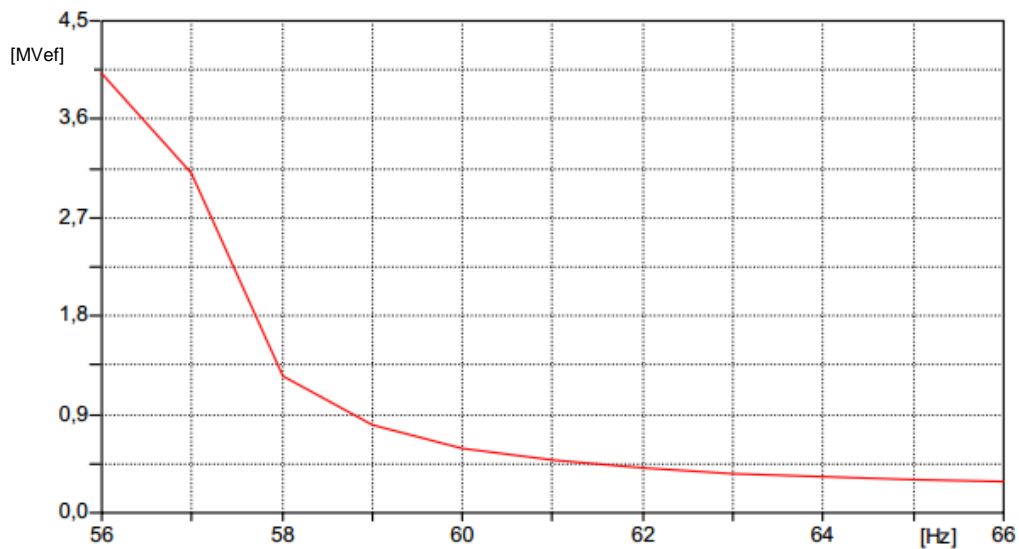


Figura 4-23: Tensão em RMS na fase aberta da LT na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentada no estudo de Projeto Básico.

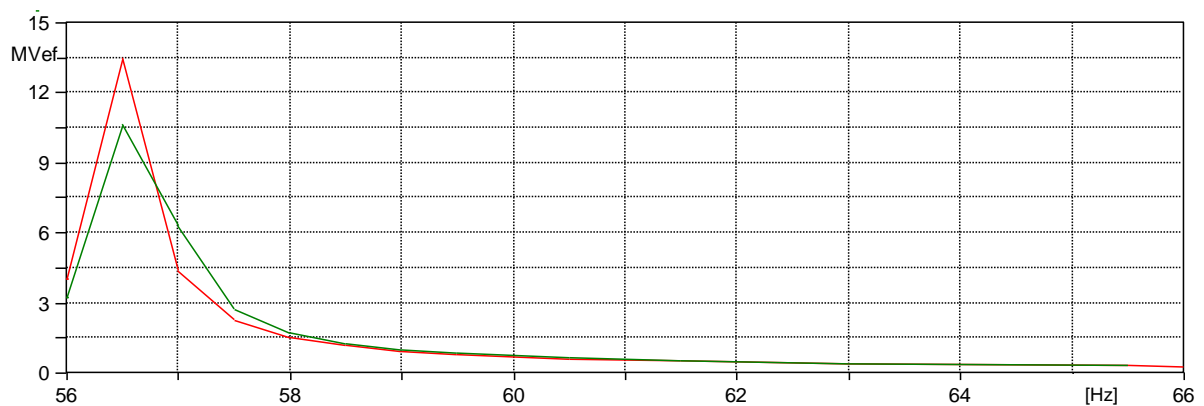


Figura 4-24: Tensão RMS na fase aberta na faixa de frequência de 56Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede com equivalentes (vermelho) e barras infinitas (verde).

É notório que as tensões de fase aberta identificadas são distintas entre si, inclusive há um deslocamento na frequência de ressonância da LT. Na frequência de 60 Hz o Projeto

apontou uma tensão na fase aberta por volta de 570 kVrms. Já na modelagem simplificada encontraram-se 688 kVrms (equivalente) e 732 kVrms (fontes ideais). Reforça-se que a magnitude da tensão na fase aberta nas proximidades da ressonância sofre grande impacto pelo valor da resistência dos reatores, porém este valor de resistência não foi encontrado na documentação disponível do projeto, de tal forma que os valores comparativos devem ser observados com cautela.

Comparou-se também a corrente de arco secundário na faixa de frequência definida para aplicação de defeitos em ambos os terminais, como visto em Figura 4-25, Figura 4-26 e Figura 4-27.

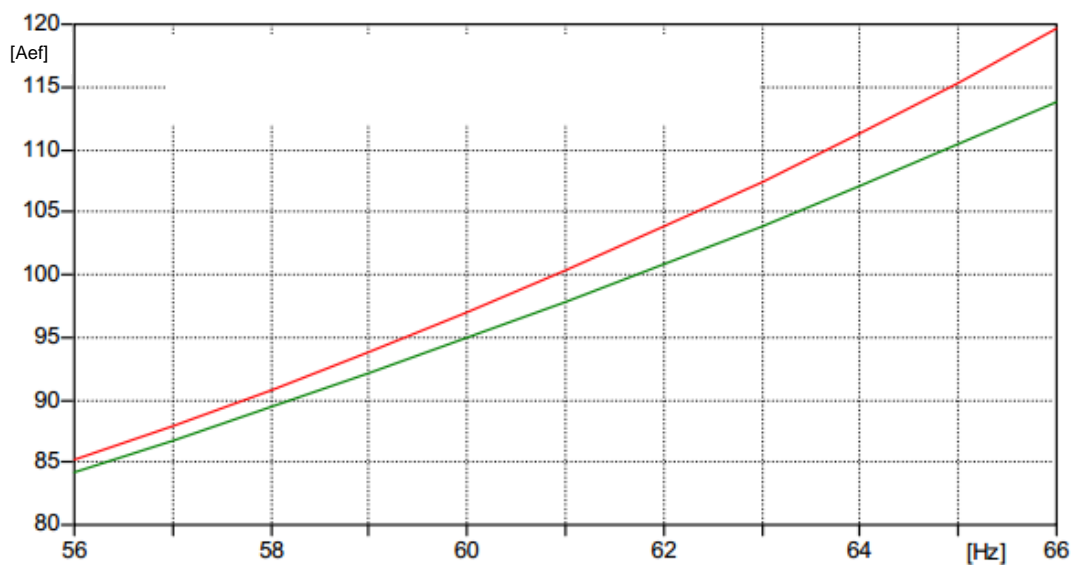


Figura 4-25: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentadas no estudo de Projeto Básico – Terminal Itália (vermelho) e terminal França (verde).

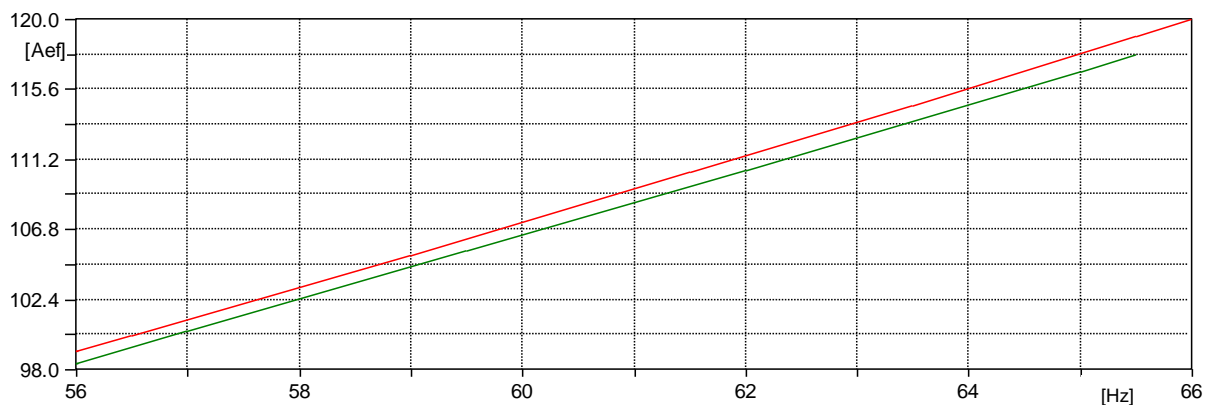


Figura 4-26: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como equivalentes Terminal Itália (vermelho) e terminal França (verde).

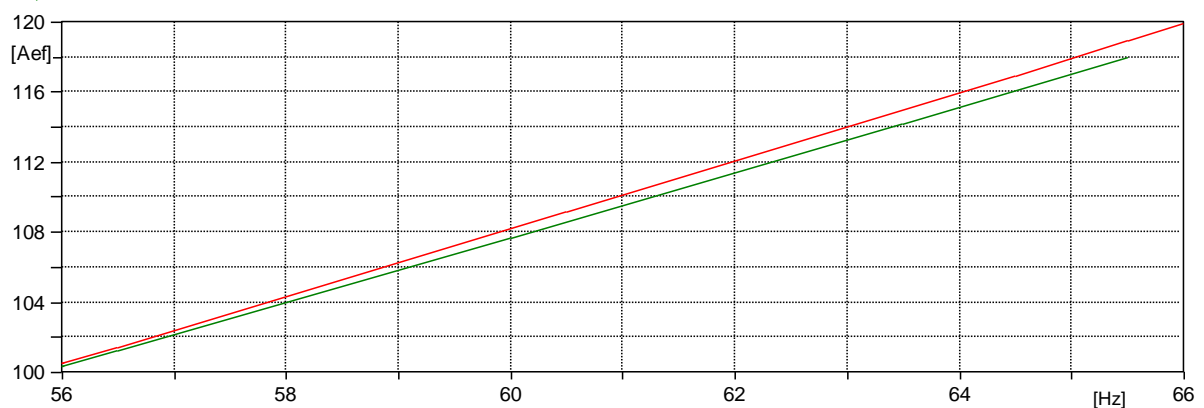


Figura 4-27: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como barras infinitas - Terminal Itália (vermelho) e terminal França (verde).

Houve, novamente, notória discrepância entre os resultados identificados na faixa de frequência verificada, entre o projeto e as modelagens simplificadas. As modelagens com fontes ideais e por equivalentes ajustados para 60 Hz se mostraram bastante semelhantes. Nestas, a corrente de arco secundário ficou entre 106,4 a 108,2 Arms. Já no projeto, essa corrente varia de 95 a 97 Arms.

O resultado da corrente de arco secundário para falta no terminal Itália, tanto na rede do Projeto quanto nas redes simplificadas se mostraram bastantes próximas na frequência de 66 Hz.

Sabe-se, conforme apresentado nos itens anteriores deste capítulo, que a $Z(\square)$ vista do ponto de aplicação de defeito quando em fase aberta e a tensão induzida tem grande influência nos resultados de corrente de arco secundário e que, ao variar a frequência por meio do *FREQUENCY SCAN* do programa ATP as tensões terminais variam de forma dependente da modelagem da rede. Isso altera as tensões induzidas na fase aberta e a corrente de arco secundário, portanto, não são esperadas respostas agregadas para todas as frequências.

Entretanto, em contraposição ao concluído na LT teste, os resultados de tensão e correntes na frequência de ajuste da modelagem da rede como equivalentes Thèvenin apresentou erros significativos, o que sinaliza divergência na $Z(\square)$ vista do ponto de defeito. Porém, não está disponível o caso ATP utilizado no Projeto, o que permitiria avaliar, por exemplo, a $Z(\square)$ da rede e também confirmar as modelagens utilizadas e seus resultados.

4.5.2 Verificação com Reatores de Neutro

Tendo em vista que os resultado do Projeto apontaram tensões de fase aberta elevadas dentro da faixa de frequência de interesse e as correntes de arco secundário facilmente

extrapolam o critério 1 de extinção do arco (vide item 3.3), foi averiguada a utilização de reatores de neutro de 400Ω , 600Ω e 800Ω nos neutros dos reatores de linha na tentativa de mitigar os problemas identificados. A Figura 4-28 ilustra os resultados de tensão na fase aberta rms para cada um desses reatores. A Figura 4-29 contém as tensões na fase aberta para os 3 valores de reatores e modelagem da rede por equivalentes calculados para 60 Hz e a Figura 4-30 para modelagem por meio de barras infinitas.

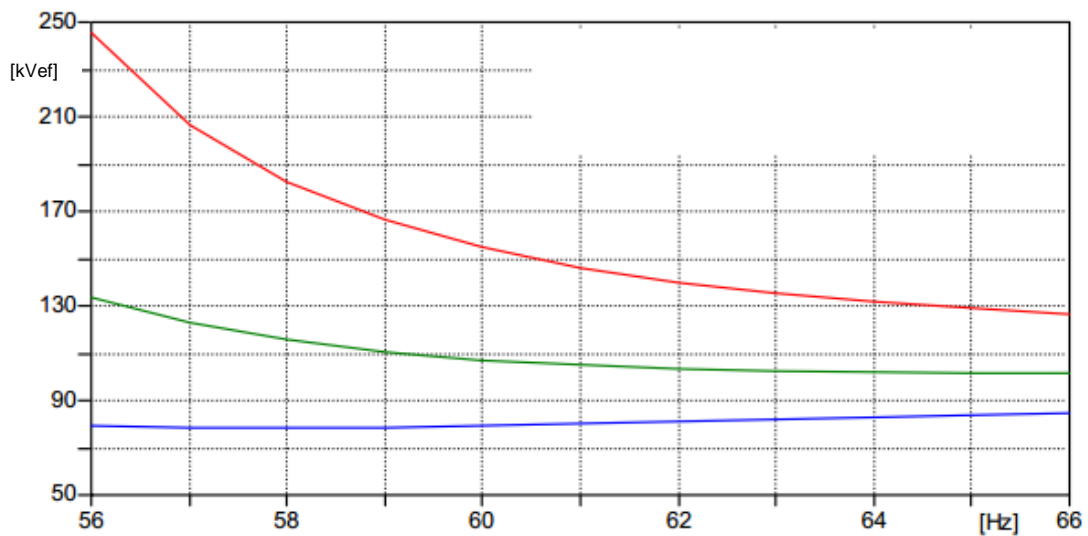


Figura 4-28: Tensões na fase aberta em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentadas no estudo de Projeto Básico – Reator de Neutro 800Ω (azul), 600Ω (verde) e 400Ω (vermelha).

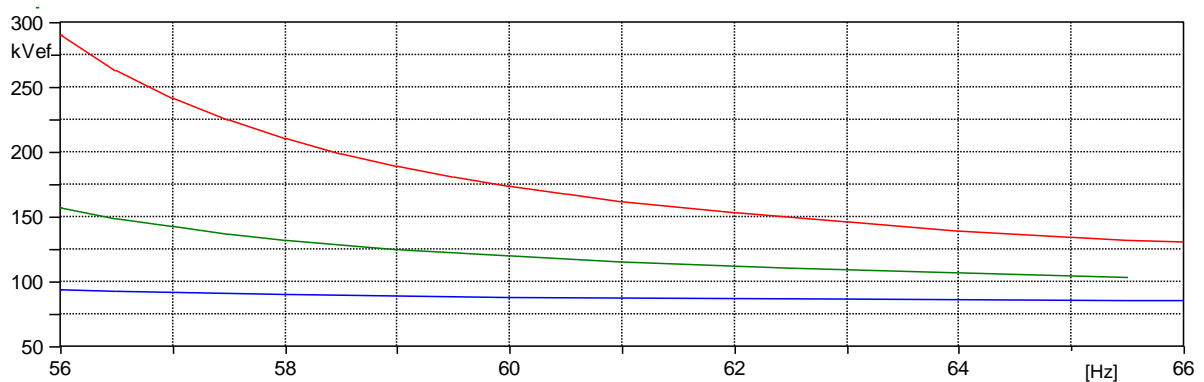


Figura 4-29: Tensões na fase aberta em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como equivalentes – Reator de Neutro 800Ω (azul), 600Ω (verde) e 400Ω (vermelha).

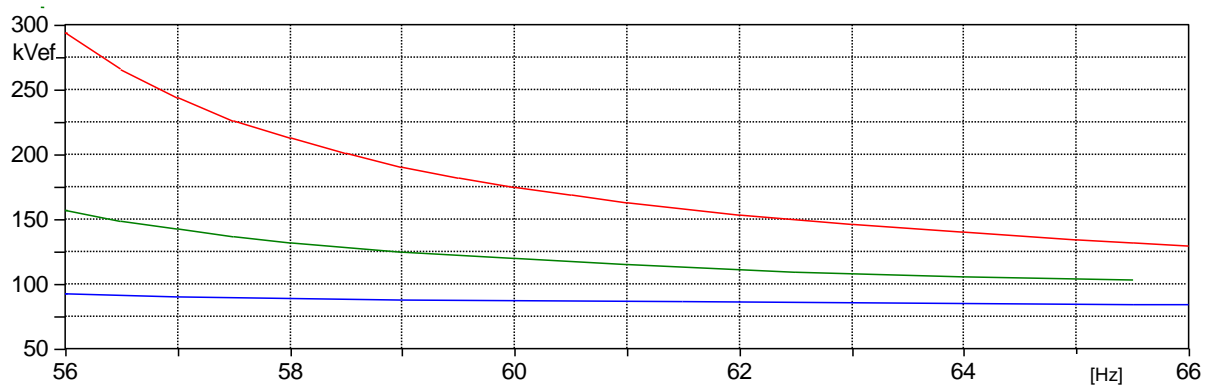


Figura 4-30: Tensões na fase aberta em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como barras infinitas – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).

Quanto às correntes de arco secundário tem-se a Figura 4-31, Figura 4-32 e Figura 4-33. São apresentados casos apenas do terminal Itália.

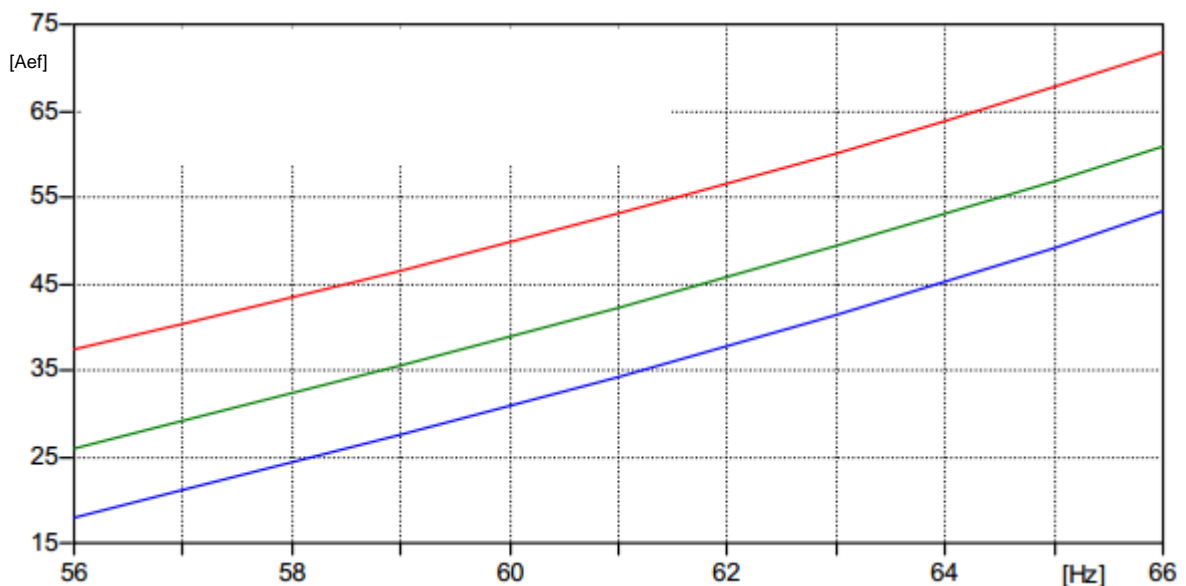


Figura 4-31: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz apresentadas no estudo de Projeto Básico – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).

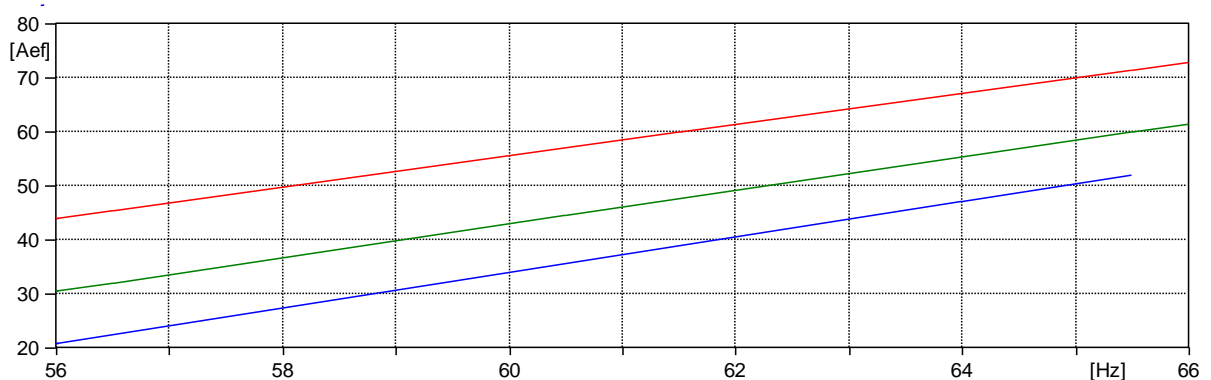


Figura 4-32: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como equivalentes – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).

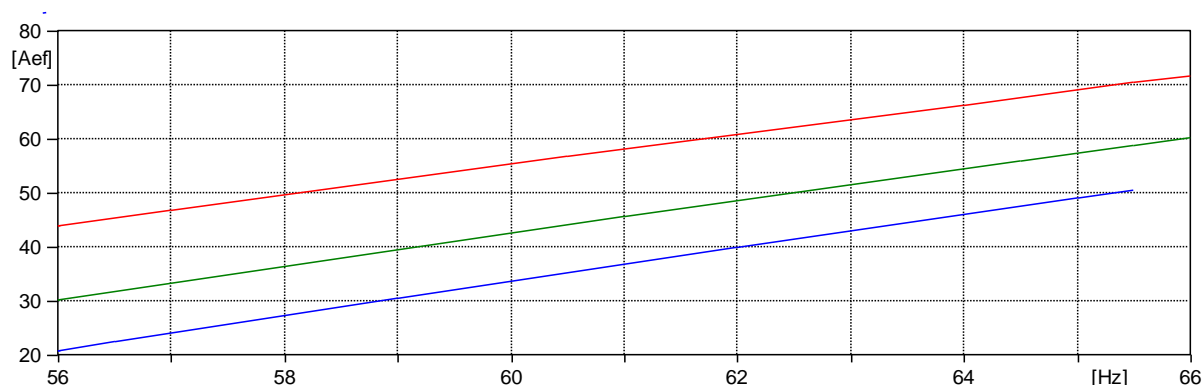


Figura 4-33: Correntes de arco secundário em RMS na faixa de frequência de 56 Hz a 66 Hz considerando modelagem da rede como barras infinitas – Reator de Neutro 800 Ω (azul), 600 Ω (verde) e 400 Ω (vermelha).

Novamente, percebe-se diferenças nas magnitudes entre os modelos simplificados e o Projeto, sendo as modelagens simplificadas mais conservadoras. Entre as modelagens simplificadas os desvios são muito pequenos.

Foi realizado no Projeto uma análise de TRT após a extinção do arco secundário. Esta foi realizada apenas para 60 Hz e no caso com reator de neutro 800 Ω . A Figura 4-34 foi obtida do projeto, a Figura 4-35 contém as TRTs para modelagem por equivalentes e a Figura 4-36 por fontes ideais.

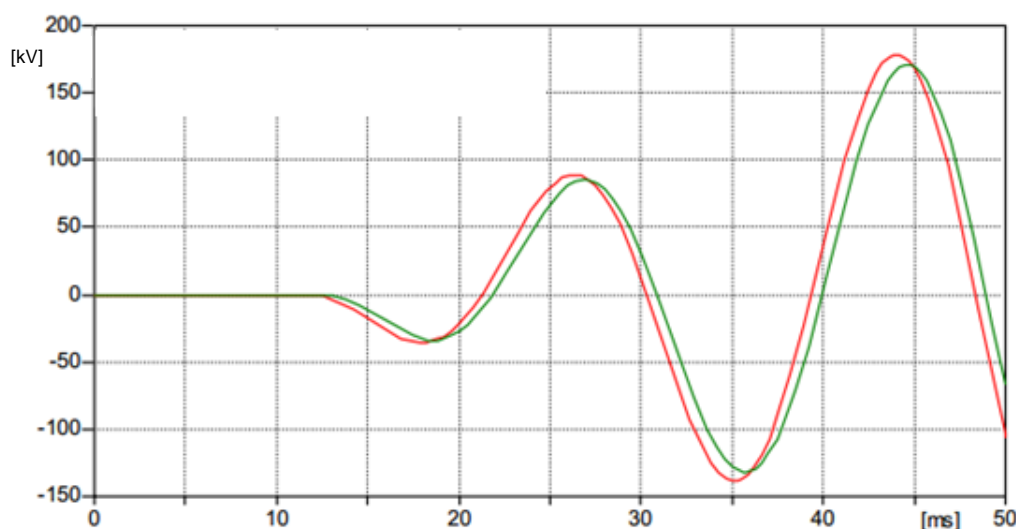


Figura 4-34: TRTs após extinção da corrente de arco secundário na frequência de 60 Hz e reator de neutro 800 Ω apresentadas no estudo de Projeto Básico – Terminal Itália (vermelha) e terminal França (Verde).

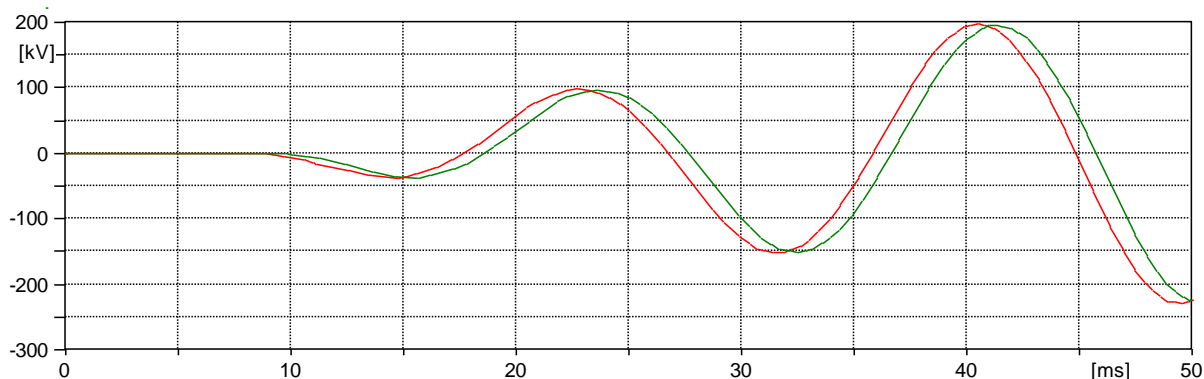


Figura 4-35: TRTs após extinção da corrente de arco secundário na frequência de 60 Hz e reator de neutro 800Ω considerando modelagem da rede como equivalentes – Terminal Itália (vermelha) e terminal França (Verde).

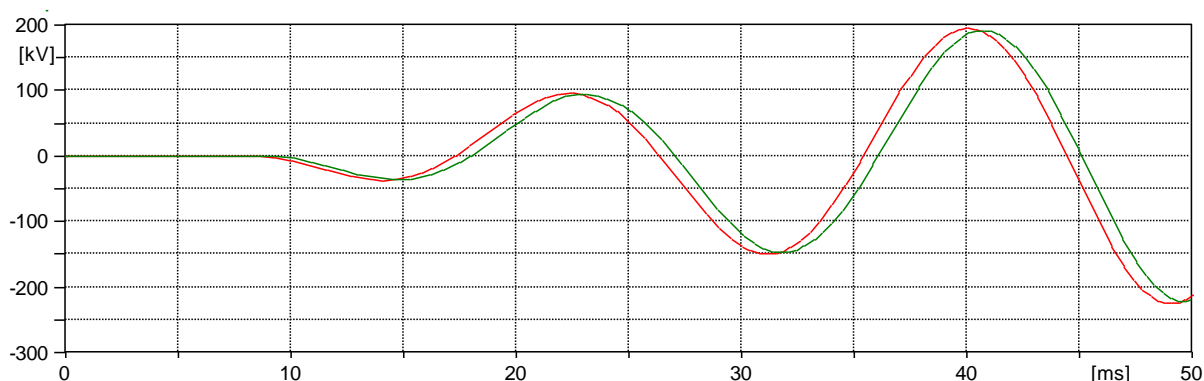


Figura 4-36: TRTs após extinção da corrente de arco secundário na frequência de 60 Hz e reator de neutro 800Ω considerando modelagem da rede como barras infinitas – Terminal Itália (vermelha) e terminal França (Verde).

As formas de onda de TRT após extinção do arco secundário são bastante próximas, tanto para o projeto quanto para as modelagens aproximadas. Atentar-se ao comparar as figuras que o tempo de início da TRT são distintos entre os casos.

O valor do primeiro pico, variável importante pelos critérios vigentes para extinção do arco (vide item 3.3) foi de aproximadamente 36 kV no Projeto Básico e 37 kV com equivalentes e fontes ideais.

4.5.3 Resumo dos Resultados obtidos

A Tabela 4.10 (tensão na fase aberta), Tabela 4.11 (corrente de arco secundário) e Tabela 4.12 (primeiro pico da TRT) apresenta os resultados encontrados pelo Projeto e pela análise com modelagem simplificada. Quando comparando os dois terminais foram incluídos os maiores valores.

Decidiu-se tabular os valores fora da frequência fundamental apenas para 66 Hz, pois é geralmente nessa frequência que se verificam valores mais conservadores na ótica da extinção do arco secundário.

Ressalta-se que foi identificado o problema de ressonância na análise da tensão na fase aberta para uma frequência inferior à fundamental (vide item 4.5.1), caracterizando a necessidade de propor uma medida mitigadora para a questão.

Tabela 4.10: – Tabela resumo dos resultados encontrados para tensão na fase aberta para diferentes modelagens.

Reator de Neutro	Projeto Básico		Modelagem por Equivalentes		DESVIO PB x EQ		Modelagem por Barras Infinitas		DESVIO PB x ID	
	V _{open_60Hz} (KVrms)	V _{open_66Hz} (KVrms)	V _{open_60Hz} (KVrms)	V _{open_66Hz} (KVrms)	V _{open_60Hz}	V _{open_66Hz}	V _{open_60Hz} (KVrms)	V _{open_66Hz} (KVrms)	V _{open_60Hz}	V _{open_66Hz}
Não	570,0	300,0	685,6	292,0	20,3 %	-2,7 %	734,4	302,4	28,8 %	0,8 %
400 Ω	155,0	127,0	174,2	130,5	12,4 %	2,8 %	175,3	130,2	13,1 %	2,5 %
600 Ω	107,9	101,0	119,9	103,3	11,1 %	2,3 %	119,7	102,3	10,9 %	1,3 %
800 Ω	79,5	85,0	88,3	86,1	11,1 %	1,3 %	87,6	84,7	10,2 %	-0,4 %

Tabela 4.11: – Tabela resumo dos resultados encontrados para corrente de arco secundário para diferentes modelagens.

Reator de Neutro	Projeto Básico		Modelagem por Equivalentes		DESVIO PB x EQ		Modelagem por Barras Infinitas		DESVIO PB x ID	
	I _{arc_60Hz} (Arms)	I _{arc_66Hz} (Arms)	I _{arc_60Hz} (Arms)	I _{arc_66Hz} (Arms)	I _{arc_60Hz}	I _{arc_66Hz}	I _{arc_60Hz} (Arms)	I _{arc_66Hz} (Arms)	I _{arc_60Hz}	I _{arc_66Hz}
Não	97,0	119,6	107,3	120,0	10,6 %	0,3 %	108,2	119,2	11,5 %	-0,3 %
400 Ω	49,8	71,7	55,7	73,0	11,8 %	1,8 %	55,4	71,8	11,2 %	0,1 %
600 Ω	38,7	60,9	43,1	61,5	11,4 %	1,0 %	42,7	60,2	11,4 %	-1,1 %
800 Ω	30,8	53,3	34,2	53,5	11,0 %	0,4 %	33,8	52,1	11,0 %	-2,3 %

Tabela 4.12: – Tabela resumo dos resultados encontrados para primeiro pico da TRT após extinção do arco secundário para diferentes modelagens.

Reator de Neutro	Projeto Básico	Modelagem por Equivalentes	DESVIO PB x EQ	Modelagem por Barras Infinitas	DESVIO PB x ID
	TRT _{60Hz} (kVpico)	TRT _{60Hz} (kVpico)	TRT _{60Hz}	TRT _{60Hz} (kVpico)	TRT _{60Hz}
800 Ω	36,0	37,6	4,4 %	37,6	4,4 %

Observa-se que, de forma geral, os menores desvios, tanto de tensão na fase aberta quanto de corrente de arco secundário, ocorrem para frequências de 66 Hz, sendo a maior diferença de 2,8 %. Por outro lado, a 60 Hz atinge valores próximos a 29 %.

Para o único caso avaliado de TRT após a extinção do arco, o desvio foi de 4,4 % para ambas as modelagens simplificadas.

Nota-se que a adoção do reator de neutro foi suficiente para deslocar a ressonância da faixa de frequência avaliada, contudo, os três valores de impedâncias propostos não foram capazes de garantir a alta probabilidade de extinção em até 500 ms, ou seja, aplicar o critério 1. Neste critério o valor máximo da corrente de arco secundário é 50 Arms (vide Figura 3-7), enquanto o estudo indicou correntes de até 53,3 Arms. Isso demandaria, pela aplicação correta do critério, a utilização do critério 2, que recomendaria um tempo de

extinção de arco de 1,33 s. Todavia, nas conclusões e recomendações do estudo de projeto foi indicado o tempo de 500 ms, como se o reator de neutro indicado (800Ω) fosse suficiente para aplicação do critério 1. A indicação de tempo morto equivocada podea resultar em elevados índices de religamentos sem sucesso nessa linha de transmissão.

Destaca-se que não há garantias que outras inconsistências como essa não se repitam ao longo dos estudos do projeto.

Ao avaliar os tempos de extinção de arco para as modelagens com equivalentes e barras infinitas não haveria diferenças significativas, pois para os valores mais elevados de corrente de arco secundário (sempre em 66 Hz) apresentaram desvios pequenos com relação ao projeto. Ou seja, neste caso a modelagem simplificada não alteraria as conclusões do estudo, caso estas fossem construídas de forma coerente com os resultados atingidos.

4.6 EFEITOS DAS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS DA LT E DA REDE NA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EXTINÇÃO DO ARCO SECUNDÁRIO

Conforme mostra a tabela Tabela B.1, foram simulados diversos casos variando diferentes características da linha de transmissão e do sistema com intuito de confirmar a possibilidade da representação simplificada da rede em estudos de extinção de arco secundário.

A partir dos resultados obtidos, é possível avaliar a sensibilidade de cada variação sobre duas grandezas importantes nos critérios de extinção do arco secundário: corrente de arco secundário a 60 Hz e primeiro pico de TRT após extinção do arco.

Da Tabela 4.13 até a Tabela 4.17 apresentam-se a sensibilidade para cada variável. São apontados os casos base, tais quais explicitadas no item 4.2, e os casos de variação em alguma grandeza do circuito ou da rede. Os valores que quantificam as variações realizadas são indicada entre parênteses.

Tabela 4.13: – Efeito da variação do comprimento na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.

Comprimento	$I_{\text{arc}_{60\text{Hz_RMS}}}$	Desvio	1º pico TRT	Desvio
418 km	248,80 A	-	114,10 kV	-
543 km (+30%)	330,46 A	+32,8%	111,82 kV	-1,9%
293 km (-30%)	172,02 A	-30,9%	117,02 kV	+2,6%

Tabela 4.14: – Efeito da variação da compensação *shunt* na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.

Comp. <i>Shunt</i>	$I_{\text{arc}_{60\text{Hz_RMS}}}$	Desvio	1º pico TRT	Desvio
600 Mvar (66,33%)	248,80 A	-	114,10 kV	-
452 Mvar (50%)	254,76 A	+2,4%	128,33 kV	+12,5%
814 Mvar (90%)	239,67 A	-3,7%	97,90 kV	-14,2%
740 Mvar (78,67%)	244,48	-1,8%	100,26 kV	-12,1%

Tabela 4.15: – Efeito da variação do carregamento na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.

Carregamento	$I_{\text{arc}_{60\text{Hz_RMS}}}$	Desvio	1º pico TRT	Desvio
415 MW (24,7% do SIL)	248,80 A	-	114,10 kV	-
949 MW (56,5% do SIL)	250,58 A	+0,7%	113,73 kV	-0,3%
1680 MW (100% do SIL)	251,64 A	+1,1%	115,67 kV	+1,7%

Tabela 4.16: – Efeito da variação da potência de curto-circuito na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.

Nível de CC		$I_{\text{arc}_{60\text{Hz_RMS}}}$	Desvio	1º pico TRT	Desvio
F-T	3F-T				
21,97 kA	31,65 kA	248,80 A	-	114,10 kV	-
17,21 kA (78%)	26,94 kA (85%)	248,75 A	-0,02%	113,18 kV	-0,8%
25,34 kA (115%)	38,08 kA (120%)	249,17 A	+0,15%	115,30 kV	+1,9%

Tabela 4.17: – Efeito da aplicação do reator de neutro na corrente de arco secundário 60 Hz e primeiro pico da TRT após extinção do arco.

Reator de Neutro	$I_{\text{arc_60Hz_RMS}}$	Desvio	1º pico TRT	Desvio
Não	248,80 A	-	114,10 kV	-
800 Ω	64,85 A	-73,9%	79,63 kV	-30,2%

Dentre os resultados destaca-se a enorme influência da aplicação do reator de neutro. Isso se deve à sua capacidade de, a partir de um efeito de ressonância paralela com as capacitâncias de acoplamento, reduzir a influência das demais fases sobre a fase aberta. Seus efeitos são discutidos com clareza em (FURNAS, 1987) e em (ZANETTA, 2003).

Ressalta-se que esse recurso já é largamente utilizado nos projetos de transmissão quando os critérios para viabilização do religamento monopolar não são atingidos.

Quanto às demais características foi observado que a grandeza que apresentou maior influência sobre a corrente de arco secundário 60 Hz foi o comprimento da LT e sobre o primeiro pico da TRT após a extinção do arco foi o grau de compensação da LT. Para a primeira plotou-se o gráfico da Figura 4-37, onde é percebida que a relação entre o comprimento da LT e a corrente de arco secundário se aproxima de uma reta. Já a Figura 4-38 relaciona o primeiro pico da TRT com o grau de compensação.

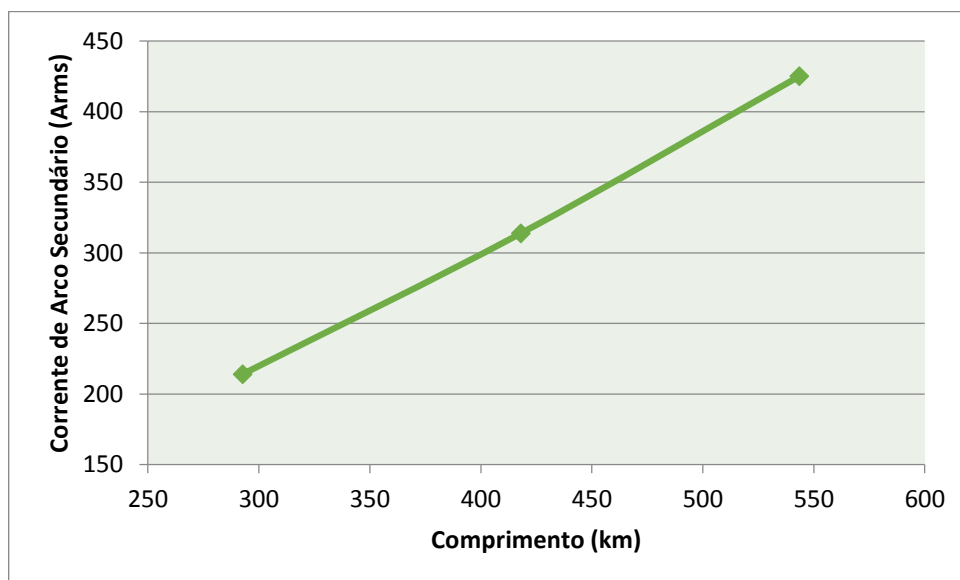


Figura 4-37: Relação entre a corrente de arco secundário e o comprimento da LT.

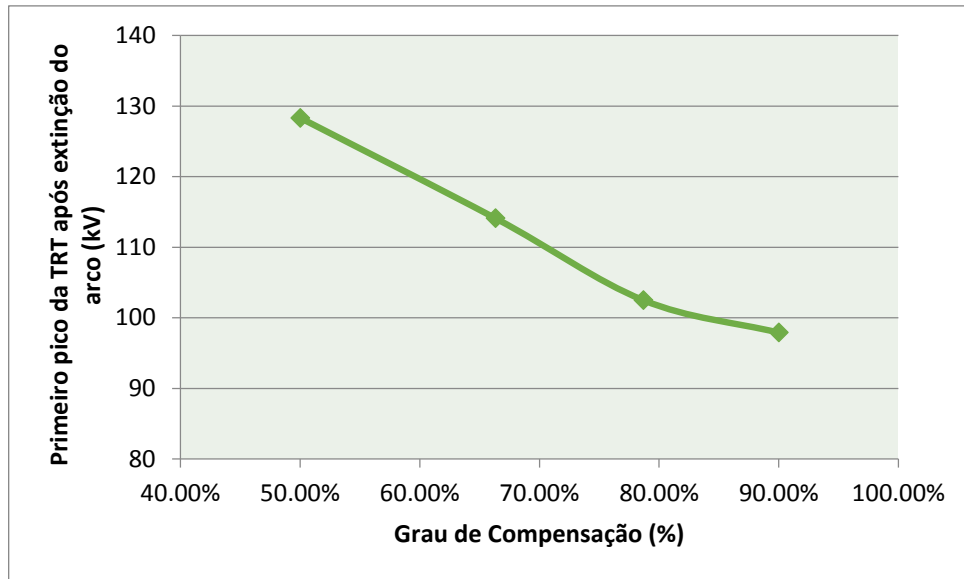


Figura 4-38: Relação entre o primeiro pico da TRT após extinção do arco e o grau de compensação da LT.

Chama a atenção a baixa influência do carregamento sobre as grandezas avaliadas, uma vez que era esperado que quanto maior o carregamento maior o efeito eletromagnético o que influenciaria a corrente de arco secundário. Uma possível explicação é a grande predominância do efeito eletrostático, visto que a estrutura em questão possui elevadíssimo acoplamento entre fases e comprimento expressivo. Contudo, carece de melhores avaliações.

Essas análises de sensibilidade foram feitas como consequência da análise principal deste trabalho. Sabe-se que o número de pontos é pequeno e não permite uma extrapolação direta. Contudo, isso já indica e instiga a realização de trabalhos futuros expandindo essas questões.

Destaca-se que esses resultados são referentes a um determinado tipo de estrutura, cujas características são bastante específicas e não necessariamente as conclusões são válidas para estruturas com características diferentes.

5. CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A análise de extinção do arco secundário é um estudo relevante dentre aqueles que compõem a elaboração do Projeto Básico de um empreendimento de Transmissão. É a partir dele que se garante a viabilidade da aplicação do recurso de religamento monopolar em linhas de transmissão, cuja utilização pode representar ganhos significativos ao SIN e ao Operador, conforme apresentado no capítulo 3.

O arco elétrico secundário e sua extinção caracterizam-se como fenômenos de enorme complexidade por serem de natureza térmica e elétrica, cuja modelagem é de difícil realização. Os critérios vigentes para determinação da extinção do arco secundário são simplificados, pois não modelam o arco em si, mas tomam como base publicações que descrevem testes de extinção de arco secundário sob determinadas condições. Da conclusão desses trabalhos, obtém-se, em termos de grandezas elétricas como a corrente de arco secundário e primeiro pico de TRT após a extinção, qual seria o tempo mínimo de extinção do arco secundário. Qualquer característica diferente que aponte influência sobre esse tempo é desprezada, como magnitude e tempo de duração da corrente de arco primário, tamanho da cadeia de isoladores, intensidade do vento, etc.

Na etapa de Projeto Básico, os estudos definidos como Transitórios Eletromagnéticos são cruciais para especificação de equipamentos dos empreendimentos. Devido à natureza complexa do fenômeno deve se atentar à modelagem de equipamentos e, igualmente, à representação da rede elétrica em programas computacionais para simulação de transitórios eletromagnéticos, cuja inserção do sistema elétrico completo se mostra, ainda hoje, inviável em termos práticos. Os diversos critérios definidos nos Procedimentos de Rede e nos anexos técnicos dos leilões de transmissão balizam todos os estudos de projeto e por vezes podem ser revisitados à procura de melhorias que podem afetar diretamente todos aqueles que se envolvem na execução de estudos elétricos, como as Transmissoras, Consultoras, o operador e o planejamento.

Observou-se que estudos de extinção de arco secundário, apesar de se submeterem à metodologia de modelagem de rede equivalente tal qual estudos transitórios eletromagnéticos de manobras, seria um estudo cuja representação da rede poderia ser simplificada. As principais constatações de cada análise de simulação deste trabalho são listadas a seguir:

5.1.1 LT 500 kV base

- A comparação da impedância vista no ponto de falta na fase aberta apresentou bastante coerência nas modelagens por equivalentes e barras infinitas quando comparadas com a rede completa para as frequências de 60 Hz e 66 Hz. As diferenças, via de regra são mais elevadas para frequências próximas da frequência de ressonância (próxima de 54 Hz), especialmente na modelagem por carga fictícia na qual o $Z(\square)$ foi bastante distinto ao redor dessa frequência.
- A modelagem da rede com equivalentes Thèvenin em ambos os terminais apresentam desvios inferiores a 0,40% na corrente de arco secundário a 60 Hz, de até 5,06% no primeiro pico da TRT após extinção e até 18,52 % na corrente de arco secundário a 66 Hz.
- A modelagem da rede com carga fictícia em um dos terminais apresentam desvios de até 38,58% na corrente de arco secundário a 60 Hz, de até 35,91 % no primeiro pico da TRT após extinção e até 18,96 % na corrente de arco secundário a 66 Hz.
- A modelagem da rede com fontes ideais em ambos os terminais apresentam desvios de até 3,21% na corrente de arco secundário a 60 Hz, de até 4,34 % no primeiro pico da TRT após extinção e até 16,43 % na corrente de arco secundário a 66 Hz.

A partir dessas considerações é possível concluir, para linhas de transmissão com características semelhantes à LT base, que:

- O estudo de extinção de arco secundário sofre influência majoritariamente da linha de transmissão em análise e pouco do sistema, tendo em vista que as $Z(\square)$ apresentadas para cada tipo de modelagem divergiram bastante entre si quando vistas das barras terminais, mas apresentaram comportamento bastante semelhante quando medido do ponto de aplicação de defeito na fase aberta.
- A modelagem simplificada por equivalentes apresentou desvios considerados satisfatórios, sendo uma aproximação bastante razoáveis para análise de extinção de arco secundário, pois facilita a elaboração do estudo e o ajuste do caso para simulação.
- A modelagem por carga fictícia, apesar de permitir o controle facilitado do carregamento da LT, apresentou erros significativos, não sendo uma modelagem de rede recomendada para esse tipo de estudo.

- Todas as modelagens a 66 Hz apresentaram desvios significativos com relação à rede completa, contudo, isso é efeito da variação do ponto de operação da rede quando da aplicação do *FREQUENCY SCAN*, conforme demonstrado no item 4.4.1. Caso o critério fosse aplicado reajustando, para cada frequência, as máximas tensões operativas nas barras terminais na rede completa, seus desvios seriam próximos de zero, caso a $Z(\square)$ seja compatível, quando comparados com as modelagens de equivalentes e fontes ideais.
- Ao avaliar a corrente de arco secundário para frequências diferentes da fundamental com a rede completa têm-se, para esta representação, os resultados mais conservadores. Isso significa que a rede completa, ao elevar a frequência, eleva as tensões terminais da LT mais que a modelagem por equivalentes ou barras infinitas. Tendo em vista o objetivo de desprezar a rede nas análises, sugere-se averiguar um fator multiplicativo na corrente de arco secundário a 66 Hz que compensasse essa diferença. Para isso mais avaliações devem ser realizadas de forma a consolidar um valor específico para isto.

5.1.2 Comparação com Projeto Básico de LT

Obs.: As comparações realizadas foram em função daquelas apresentadas no relatório de estudo de religamento monopolar do projeto da linha.

- Todos os resultados apresentados para modelagem de rede por equivalentes e por barras infinitas foram muito similares. Essas divergem de forma mais acentuada próximo a frequência de ressonância.
- A comparação entre a tensão na fase aberta sem reator de neutro em função da frequência apontou clara discrepância entre o resultado do projeto com as redes simplificadas, possivelmente alterando a frequência de ressonância, que no Projeto é 56 Hz ou inferior e nas redes simplificadas estaria próximo a 56,5 Hz.
 - O valor da magnitude da tensão na fase aberta é muito dependente do fator de qualidade dos reatores, o qual não foi disponibilizado nos estudos de projeto e estimado nas análises desse trabalho.
 - Portanto, a depender dos valores de R estimados para os indutores, existe a possibilidade da frequência de ressonância do Projeto também ser 56,5 Hz, porém, pelos pontos registrados isso não é explicitado.

- Na frequência de 60 Hz (a qual foi utilizada para ajuste dos equivalentes), o desvio na comparação da tensão na fase aberta foi de 20,3 % para modelagem com equivalentes e 28,8 % para modelagem com barras infinitas. Esses valores diferem bastante dos resultados encontrados na LT 500 kV base, pois os desvios na frequência de ajuste (60 Hz) foram sempre muito pequenos naquele caso. Para as configurações com reatores de neutro, os quais eliminam o problema da ressonância na faixa de frequência estudada, os erros diminuem, porém ainda são elevados, da ordem de até 13,1% e nunca inferiores a 10,2 %.
- Na frequência de 66 Hz, por outro lado, foram obtidas tensões na fase aberta com diferenças menores, tanto na condição sem reator de neutro como com este equipamento. O maior desvio foi de 2,8 %.
- De forma análoga, porém, com desvios menos elevados na condição sem reator de neutro, a corrente de arco secundário a 60 Hz atinge diferenças da ordem de 11% quando da modelagem da rede simplificada com relação ao Projeto. Já na frequência de 66 Hz a diferença não atinge 2,0 %.
- O único caso de TRT após extinção do arco contemplado no projeto foi com reator de neutro 800 Ω e para frequência 60 Hz. Nesse caso os desvios foram de 4,4 % para ambas as modelagens simplificadas.
- Estes resultados vão em oposição aos resultados apresentados no item 4.4 para LT base, pois lá, houve grande concordância nos valores na frequência de ajuste e diferenças da ordem de 10 a 11% para frequência de 66 Hz.
- Apesar dos resultados serem considerados insatisfatórios para permitir uma modelagem simplificada da rede, vale ressaltar que não há acesso às informações completa dos estudos do Projeto que permitisse confirmar as modelagens e resultados apresentados nos estudos. A informação da $Z(\square)$ vista do ponto de falta na fase aberta, por exemplo, seria fundamental para compreender completamente os resultados encontrados. Qualquer engano no fornecimento das informações nos relatórios do projeto pode comprometer as conclusões aqui listadas.
- Não é possível afirmar de forma definitiva a respeito da possibilidade de simplificação da rede em estudos de extinção de arco secundário, pois através o teste realizado com um projeto real apresentou divergências consideráveis. Isso

indica a necessidade de investigar essa questão em outras linhas de transmissão e em outro ponto da rede elétrica.

- Caso o estudo mencionado fosse realizado com a rede simplificada, nenhuma conclusão seria alterada, pois as máximas correntes de arco secundário apresentadas resultaram na necessidade de um mesmo tempo de extinção de arco secundário que do projeto. Todavia, isso ainda não caracteriza as aproximações como adequadas devido às diferenças já mencionadas.

5.1.3 Efeito das variações dos parâmetros

- O reator de neutro mostrou-se muito efetivo na redução da corrente de arco secundário e primeiro pico da TRT.
- O comprimento da LT apresentou maior influência sobre a corrente de arco secundário, sendo a relação próxima a uma reta. Quanto maior o comprimento, maior é o efeito de indução eletrostática na fase aberta.
- O grau de compensação apresentou maior influência sobre o primeiro pico da TRT após a extinção do arco secundário. Isso se justifica no fato de uma alteração nos parâmetros L ou C influenciar diretamente as trocas energéticas entre os elementos indutivos e capacitivos que ocorre após a eliminação do arco.
- Não foi observada influência significativa no carregamento da LT. Era esperado que com a variação no carregamento houvesse alteração no acoplamento eletromagnético que alterasse a corrente de arco secundário. Os resultados apontam para a necessidade de uma investigação mais detalhada a respeito desse comportamento.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com intuito de evoluir na compreensão dos conceitos que balizam os critérios atuais de estudos elétricos alguns pontos são visualizados como perspectivas de investigação futuras:

- Avaliar outras estruturas em diferentes pontos do sistema para confirmar a aplicabilidade de uma modelagem simplificada da rede, tendo em vista que na comparação com um projeto selecionado identificaram-se desvios expressivos.
- Expandir a verificação da modelagem reduzida da rede para análise de extinção de arco secundário com circuitos com acoplamento mútuo com outro circuito,

ou seja, ele compartilhando torre/faixa de passagem por todo seu comprimento ou por alguns trechos.

- Comparar casos com modelagem da rede com carga fictícia considerando carga RC ao invés de carga RL. A expectativa é de redução nos erros, se comparado com a carga RL.
- Analisar a representação por carga fictícia considerando modelos mais complexos de cargas elétricas.
- Com a confirmação da modelagem da rede simplificada, realizar uma análise de sensibilidade entre os parâmetros para identificar quais variáveis demonstram maior influência sobre a corrente de arco secundário e primeiro pico da TRT após extinção.
- Aplicar variações nas características da LTs para cada estrutura típica geralmente adotada hoje pelo planejamento, as quais não são em grande número, de maneira a prever quais as limitações de aplicação de cada estrutura em LTs de alta tensão. Com essas informações, desenvolver um ábaco para cada tipo de LT com as características limites de comprimento, compensação *shunt*, carregamento, etc. que garantem a viabilidade do religamento monopolar segundo os critérios de extinção vigentes.
- Aprofundar sobre os efeitos do acoplamento magnético na análise de extinção do arco secundário, visto que os resultados demonstraram que, para LTs com características semelhantes à LT base, o carregamento tem baixa influência no resultado.
- Avaliar os impactos da utilização de modelos de linhas de transmissão com parâmetros variantes na frequência considerando os critérios vigentes de análise de extinção do arco secundário. Comparar os diferentes modelos de linhas de transmissão e também o efeito da modelagem da rede para cada um deles.
- Expandir a avaliação de possível simplificação na modelagem da rede para outros estudos de projeto básico, como manobras de linhas de transmissão e de transformadores. Por serem fenômenos com características distintas outras abordagens podem se fazer necessárias.

REFERÊNCIAS

AMETANI, A., NAGAOKA, N., NODA, T., MATSUURA, T., **A simple and Efficient Method for Including a Frequency-Dependent Effect in a transmission line transient analysis**, Willey – IEEE Press, 1st edition, 2015.

AMETANI, A., OHNO, T., NAGAOKA, N., **Cable System Transient: Theory, Modelling and Simulation**, Willey – IEEE Press, 1st edition, 2015.

ANEEL, **Contratos de Concessão**, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/contratos1>>. Acessado em 12/10/2018.

ANEEL, **Leilões de Transmissão**, 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/transmissao4>>. Acessado em 12/10/2018.

AQUINO, A. F., MASSAUD, A. G., GONÇALVES, D. do N., **Utilização do Religamento Tripolar Lento em Linhas de Transmissão do SIN – Sistema Interligado Nacional: uma experiência bem sucedida**, XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 22 a 25/11/2009, Recife-PE.

AZEVÊDO, W. V. S., **Equivalentes de Redes Elétricas e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória**, dissertação de mestrado, UFCG, 2010.

BALOSSI, A., MALAGUTI M., OSTANO, P., **Laboratory Full-Scale Tests for the Determination of the Secondary Arc Extinction in High-Speed Reclosing**, IEEE Summer Power Meeting, New Orleans, July 10-15, 1966.

BARROSO, L. A., **Planejamento da Expansão da Transmissão**, Workshop on Power Transmission Business in Brazil, ANEEL/APEX-Brasil, São Paulo, 10 de Novembro de 2016.

CÂMARA, A. S. B., **Modelagem de Arco Elétrico no Ar. Aplicações em Sistemas de Potência**, Tese de Doutorado - COPPE, Rio de Janeiro, Novembro de 2010.

CHIESA, N., **Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation**, Doctoral theses at NTNU, 2010:64.

COSTA, C. O., **Equivalentes de Rede Utilizando Vizinhanças Elétricas com Possíveis Aplicações em Estudos de Harmônicos e Transitórios Eletromagnéticos**, Dissertação de mestrado - COPPE, Rio de Janeiro, Junho de 2013.

EPE, **Expansão da Transmissão, 2018**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-transmissao>>. Acessado em 12/10/2018.

EPE, **Planejamento da Expansão, 2018**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-transmissao/planejamento-da-expansao>>. Acessado em 12/10/2018.

FERREIRA, C., **Simulação e Análise de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência - Análise de TRV na Abertura de Disjuntores**, 2011.

FRONTIN, S. O., **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**, 1ª edição, Brasília, 2013.

FURNAS, **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**, 1987.

GODOY, E. et al, **Tutorial on Single-Pole Tripping and Reclosing, 39th Annual Western Protective Relay Conference**, October 16-18, 2012.

GREENWOOD, A., **Electrical Transients in Power Systems**, second edition, 1991.

GUSTAVSEN, B., SEMLYEN, A., **Rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting**, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 14, nº 3 (July 1999), pp. 1052-1061.

HAUBRICH, H. J., HOSEMAN, G., THOMAS, R., **Single-Phase Auto-Reclosing in EHV Systems**, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, August 1974.

IEC 60071-4, **Technical Report, "Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks**, 2004.

IEEE Switching Transients Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, **Modeling Guidelines for Switching Transients**, July 1998.

NETO, F. C., **Multiscale Simulation of Frequency Dependent Line Models and Network Equivalents**, Tese de Doutorado, COPPE, Rio de Janeiro, Setembro de 2017.

ONS, **Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão**, 2013.

ONS, **ONS DPL-REL-0102/2018 – Relatório de Análise Estatística de Desligamentos Forçados Referente ao Ano de 2017 – Linhas de Transmissão**, 2018.

ONS, **ONS DPL-REL-0197/2018 – Análise Estatística do Desempenho de Esquemas de Religamento Automático Referente ao Ano de 2017**, 2018.

ONS, **Submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede – Verificação da Conformidade das Instalações de Transmissão aos Requisitos Mínimos**, Revisão 2016.12, 01/01/2017.

ONS, **Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede – Requisitos Mínimos Para Subestações e Equipamentos**, Revisão 2016.12, 01/01/2017.

ONS, **Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos**, Revisão 2018.08, 13/08/2018.

ONS, **Submódulo 4.1 dos Procedimentos de Rede – Ampliações e Reforços: Visão Geral**, Revisão 2017.11, 04/12/2017.

PINCETI, P., GIANNETTONI, M., **A simplified model for zinc oxide surge arresters**, IEEE Trans. Power Deliv. 14(2): 393-398, 1999.

STATE GRID BRASIL HOLDING & ELETROBRAS ELETRONORTE, **Ultra High Voltage Transmission in Alternating Current – Applied Research in the Brazilian Electrical System**, 1st edition, Brasilia, 2017.

VELASCO, J. A. M., **Power System Transients – Parameter Determination**, 2010.

WG13.05, **The Calculation of Switching Surges – I: A comparison of Transient Network Analyser Results**, ELECTRA N° 19, p. 67-78, 1971.

WG13.05, The Calculation of Switching Surges – II: Networkrepresentation for energization and re-energization studies on lines fed by an inductive source, ELECTRA N° 32, p. 17-42, 1974.

WG13.05, The Calculation of Switching Surges – III: Transmission Line Representation for energization and re-energization studies with complex feeding networks, ELECTRA N° 65, p. 45-78, 1979.

ZANETTA Jr, L. C., Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, Edusp, 2003.

Apêndice A. INTEGRAÇÃO DE OBRAS DE TRANSMISSÃO AO SIN – DO PLANEJAMENTO AO PROJETO BÁSICO

Este apêndice tem por objetivo apresentar alguns detalhes a respeito do processo do Projeto Básico, que é fundamental na integração de novos empreendimentos de transmissão ao SIN. Sua compreensão é essencial para entender em que contexto devem ser melhorados os critérios e metodologias de estudo.

A.1 ANTECEDENTES – ESTUDOS DE PLANEJAMENTO E LEILÃO DE TRANSMISSÃO

De acordo com a ANEEL (ANEEL, 2018), “A Constituição brasileira estabelece que o desenvolvimento, o uso e a venda de energia elétrica podem ser realizados diretamente, pelo Governo Federal, ou indiretamente, por meio da outorga de concessões, permissões e autorizações a outros agentes públicos, bem como para empresas privadas.”.

Hoje no Brasil, a forma mais comum de expansão do sistema de transmissão se dá através de outorgas concedidas pelo MME às transmissoras, por meio da realização de leilões de transmissão organizados pela ANEEL. Os leilões ofertam, basicamente, novas linhas de transmissão e subestações que irão fazer o sistema interligado crescer na sua capacidade de fornecimento de energia ou elevar sua confiabilidade. Os leilões são hoje formatados como leilões reversos sobre o valor da Receita Anual Permitida (RAP) a ser recebida pela transmissora. Ou seja, aquele que realizar lances se propondo a realizar o empreendimento recebendo o menor valor possível, é sagrado vencedor. O intuito dessa filosofia é reduzir ao máximo o custo dos serviços de transmissão e reduzir as tarifas de energia, respeitando assim a modicidade tarifária.

As concessões de Transmissão duram tipicamente 30 anos a partir de uma data de referência contratual, tendo acordado também o tempo máximo para que a Transmissora projete e construa o empreendimento, tornando-o disponível para o sistema. Dentro desses 30 anos a transmissora detentora dessa concessão é regida pelas cláusulas contratuais e todo amplo arcabouço regulatório do setor elétrico, sendo ela remunerada de acordo com a condição arrematada em leilão. As cláusulas contratuais regem que, quanto mais eficiente uma empresa for no projeto, na manutenção e operação de suas instalações, evitando

desligamentos, melhor será sua receita (ANEEL, 2015). Empreendimentos enquadrados neste processo são denominados Ampliações do sistema de transmissão.

Há também processos relacionados aos chamados Reforços e Melhorias. Estes compõem o Plano de Ampliações e Reforços (PAR), que é proposto pelo ONS ao MME buscando viabilizar a inclusão de novos elementos ou substituição de equipamentos existentes na rede básica.

Conforme explicitado no submódulo 4.1 dos Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2017), diferentemente de ampliações, que são novas instalações de transmissão resultantes de novas concessões de transmissão, os reforços “compreendem a instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de transmissão existentes ou a adequação dessas instalações, visando aumento de capacidade de transmissão, o aumento de confiabilidade do SIN, de vida útil de equipamentos ou a conexão de usuários”.

Já as melhorias caracterizam a “substituição de equipamentos de grande porte (transformador, equipamento de compensação reativa ou linha de transmissão) e equipamentos relacionados, por motivo de obsolescência, vida útil esgotada, falta de peças de reposição, risco de dano a instalações, desgastes prematuros ou restrições operativas intrínsecas, visando manter a prestação de serviço adequado de transmissão”. Tanto reforços como melhorias são obras autorizadas pelo MME às Transmissoras.

Em termos gerais, a Tabela A.1 resume, de forma simplificada, as diferentes formas de modificações que podem ocorrer ao sistema de transmissão.

Tabela A.1: Processos que regem alterações no sistema de Transmissão

Ampliação	Obra que expande a capacidade de fornecimento de energia. Concedida à Transmissora vencedora de processo licitatório por um período de 30 anos.
Reforço	Obra que expande a capacidade de fornecimento de energia. Autorizada pelo MME à Transmissora através de indicação no PAR.
Melhoria	Não caracteriza expansão de capacidade de fornecimento de energia. Autorizada pelo MME à Transmissora através indicação no PAR.

Este trabalho limita-se a discutir critérios associados às ampliações, uma vez que pelos processos vigentes, apenas ampliações devem apresentar Projeto Básico. Obras de autorização, as quais poderiam se submeter a processo similar no que tange a verificação de conformidade do projeto, não o fazem segundo o regulamento vigente. Todavia, nada impede que as conclusões de cunho técnico deste trabalho possam ser aplicadas a estudos com diferentes finalidades.

A origem das ampliações se dá através da EPE juntamente com o MME que definem os rumos da expansão da Transmissão em função de uma avaliação próxima das necessidades regionais de suprimento de energia.

A EPE, mais especificamente sua divisão de planejamento da expansão, exerce essa complexa função tendo como alicerces (EPE, 2018):

- A necessidade de otimizar a utilização dos recursos energéticos do país, que se espalham por todo território nacional.
- Lidar com as enormes incertezas intrínsecas à atividade de planejamento: perfil e crescimento da demanda (extremamente ligada à condição econômica nacional e até mundial), produção e localização da oferta de geração, falha de equipamentos, mudanças de estratégias governamentais, etc.
- Respeitar as condições socioambientais.
- Atender a critérios de custo mínimo na expansão da transmissão.
- Manter a confiabilidade do sistema, especialmente das interligações regionais.

Os estudos de planejamento da expansão da transmissão são conduzidos em caráter regional pelos Grupos de Estudos da Transmissão – GET, que contam com a colaboração das concessionárias de transmissão e distribuição de cada região. O mapa da Figura A-1 apresenta a subdivisão regional considerado pela empresa:

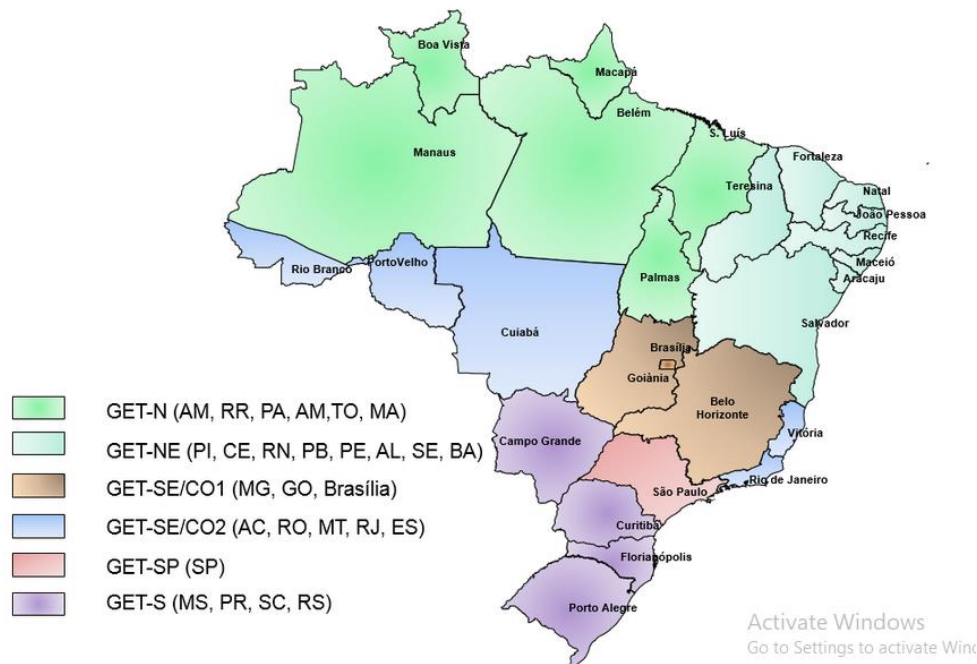


Figura A-1: Distribuição dos GET da Empresa de Planejamento Energético (EPE, 2018).

A partir da necessidade de atender o crescimento de algum mercado dentro das sub-áreas são iniciados os estudos de planejamento pela EPE. A empresa coordena a elaboração de um conjunto de quatro (ocasionalmente cinco) relatórios que são anexados aos editais para os leilões de transmissão da ANEEL e servem como referência para elaboração dos Projetos Básicos. Os itens a seguir apresentam uma explicação a respeito desses documentos, conforme detalhado em (FRONTIN, 2013).

A 1.1 Relatório R1

O relatório R1, ou relatório de “Viabilidade Técnico-Econômica e Socioambiental” é realizado pela própria EPE, sendo o principal estudo, aquele que efetivamente define o empreendimento. Nele são realizadas propostas de alternativas tecnicamente equivalentes com o objetivo de atender a demanda do mercado específico. Todas essas alternativas, que não necessariamente correspondem a um mesmo número de elementos (subestações, linhas de transmissão, transformadores, etc), são avaliadas segundo aspectos técnico-econômicos através de um estudo de Mínimo Custo Global (MCG), que relacionam os custos iniciais associados a cada alternativa e as perdas elétricas dentro de um horizonte máximo de análise. São contemplados também aspectos sócio-ambientais das alternativas.

Os principais estudos e análises que podem ser realizados dentro do relatório R1 são:

- Estudos de fluxo de potência.
- Estudos de estabilidade de tensão em regime permanente.
- Estudos de energização em regime permanente.
- Estudos de rejeição de carga em regime permanente.
- Estudos de estabilidade eletromecânica.
- Estudos de curto-circuito.
- Definição da compensação reativa série e em derivação.
- Definição da utilização de religamento monopolar.
- Análise dos aspectos socioambientais.
- Análise econômica.

Naturalmente nem todos os lotes demandarão todas as análises. Algumas delas são restritas a empreendimentos com características específicas.

Os principais aspectos que devem ser observados no que tange a especificação dos equipamentos são:

- Arranjo de barramento.

- Definição das correntes nominais dos barramentos e equipamentos.
- Análise das correntes de curto-circuito.
- Definição de Tipo, Potência e Tensões Nominais e Derivações das unidades transformadoras.
- Análise de adequações das instalações existentes.

Ao final do relatório R1 é selecionada a alternativa vencedora, dentro dos aspectos avaliados, e que será a base para elaboração dos demais relatórios e eventual licitação.

A 1.2 Relatório R2

O relatório R2, ou relatório de “Detalhamento da Alternativa de Referência”, já toma como base a alternativa selecionada no relatório R1. Sua realização é, geralmente, incumbência da Transmissora detentora de ativos (a pedido do MME) na área do empreendimento. Exceções ocorrem em algumas obras, nas quais o relatório R2 também é elaborado pela própria EPE.

Este estudo visa fornecer subsídios complementares à ANEEL para preparação dos editais de licitação correspondentes. Ressalta-se que o detalhamento visa assegurar a exequibilidade do empreendimento do ponto de vista técnico, sem constituir um Projeto Básico.

Essas análises contemplam simulações de transitórios eletromagnéticos e específicas referentes à definição das características elétricas básicas de equipamentos, tais como: LTs, subestações, unidades transformadoras, compensação de potência reativa série e em derivação. Nesta etapa são definidos, por exemplo, a estrutura típica e a capacidade de potência das linhas de transmissão e avaliação de extinção de arco secundário.

A 1.3 Relatório R3

O relatório R3, ou relatório de “Caracterização e Análise Sócio-ambiental”, também realizado por transmissoras a pedido do MME, visa prover mais detalhes do aspecto sócio-ambiental da região prevista para o empreendimento. A idéia é prever possíveis problemas que impeçam a execução da obra.

Em casos de expansão de subestações existentes esta etapa é considerada simplificada ou mesmo desnecessária. Além disso, é neste documento que são apontados o traçado das linhas de transmissão e a região geográfica para instalação de uma nova subestação.

Ressalta-se que o relatório R3 não visa substituir os estudos para obtenção da licença prévia, mas sim subsidiar o leilão de transmissão (BARROSO, 2016).

A 1.4 Relatório R4

O relatório R4, ou relatório de “Caracterização da Rede Existente”, também realizado por transmissoras a pedido do MME, visa, por meio da apresentação das características dos equipamentos existentes na instalação permitir uma instalação e operação harmoniosa entre os elementos existentes com os novos que irão compartilhar a instalação. Em casos de subestações novas, o relatório tem por finalidade apresentar para os futuros proponentes dos leilões de concessão uma caracterização básica das instalações que atenda aos requisitos indicados nos estudos de concepção e detalhamento (R1, R2 e R3).

Para subestações CA são tipicamente fornecidos:

- Localização geográfica e área prevista para implantação.
- Características dos equipamentos principais, tais como disjuntores, seccionadores, para-raios, transformadores de potência e de instrumentos, bobinas de bloqueio, etc.
- Serviços auxiliares.
- Requisitos para os sistemas de proteção, controle e supervisão.
- Requisitos para o sistema de telecomunicações.

A 1.5 Relatório R5

O relatório R5, ou relatório de “Custos Fundiários”, é emitido apenas em casos muito específicos. Sua necessidade justifica-se apenas para empreendimentos cujos relatórios R1 e R3 apontaram necessidade de maior detalhamento de custos fundiários, o que geralmente ocorre em áreas urbanas e periurbanas (BARROSO, 2016).

A 2 RESUMO E CRONOGRAMA GERAL

É a partir do conjunto de informações desses relatórios que a ANEEL constrói o arcabouço do anexo 6 dos leilões de transmissão. A versão final desses dos anexos de cada um dos lotes são encaminhados ao ONS para contribuições e seguem para audiência pública.

Os documentos dos relatórios R são considerados anexos aos editais dos leilões.

Finalmente, é possível elaborar os pontos principais de cada um desses estudos, como apresenta a Tabela A.2.

Tabela A.2:Resumo das principais características dos relatórios R

Relatório	Finalidade	Características
R1	Definir a melhor alternativa de desempenho técnico satisfatório com menor custo associado considerando avaliação de MCG.	Basicamente apenas estudos de regime permanente.
R2	Detalha a alternativa selecionada no R1 no ponto de vista de especificação de equipamentos e características de LT.	Estudos de transitórios eletromagnéticos e definição de estrutura e condutores de LT.
R3	Avaliar condições socioeconômicas da região prevista para receber o empreendimento.	Apontar o traçado de referência das LT e a região permitida para construção de novas SE.
R4	Apresentar detalhes da SE existente no que tange os equipamentos, layout, sistemas de proteção, supervisão, controle e telecomunicações.	Fornecer diagramas, plantas e cortes das instalações, bem como as características dos equipamentos existentes.
R5	Prever custos atípicos na aquisição de terrenos para construção dos empreendimentos.	Emitido apenas em alguns casos. Geralmente em obras previstas para áreas urbanas de custo elevado.

Todo esse processo, desde o início da elaboração do relatório R1, até a realização de um leilão de transmissão, leva, segundo (BARROSO, 2016), cerca de 12 a 18 meses, conforme exibe a Figura A-2. Nela apresenta-se todo o ciclo, desde o início do R1 até a entrada prevista da operação. Pela experiência é possível afirmar que o tempo entre a emissão do relatório R1 até um possível leilão é muito variado a depender de diversas questões, muitas vezes não técnicas.

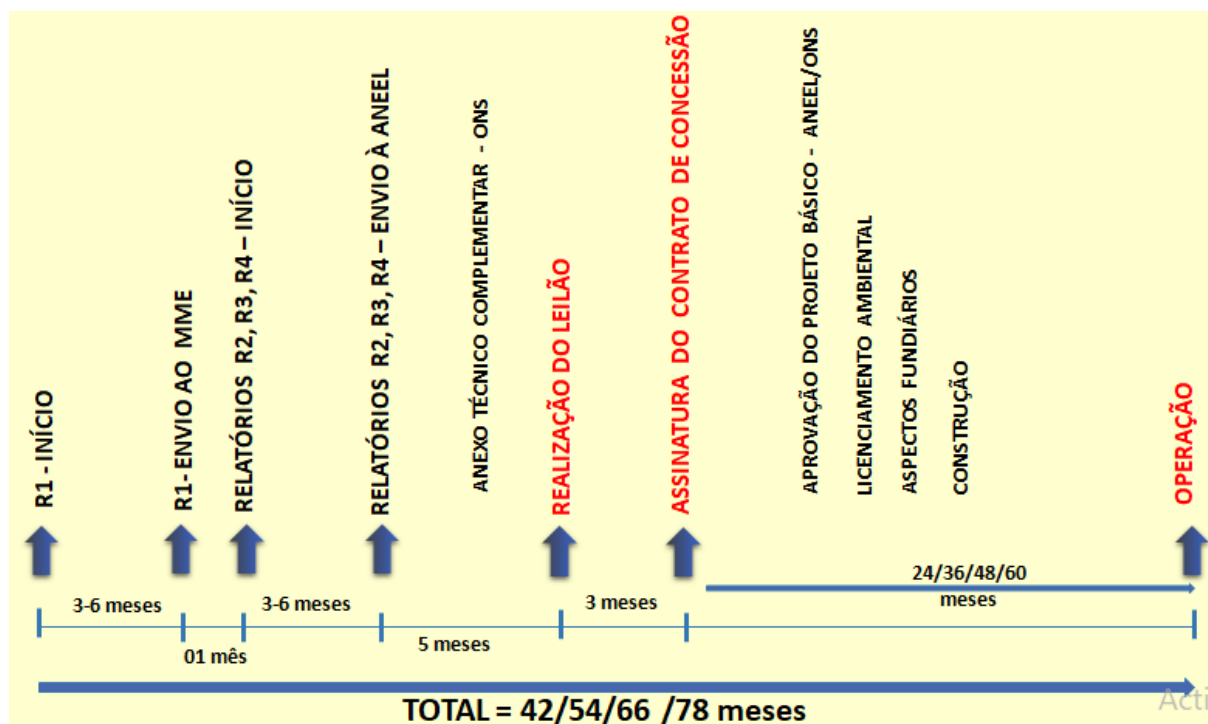


Figura A-2: Cronograma geral de implantação de instalações de transmissão (BARROSO, 2016).

A 3 ESTUDOS DE PROJETO BÁSICO

Após a emissão do edital do leilão de transmissão, realização do mesmo e arremate de empreendimentos por uma Transmissora, há o período de assinatura de contrato que é de até 3 meses (vide Figura A-2). A partir da assinatura do contrato de concessão a Transmissora tem, conforme consta no próprio contrato, 180 dias para enviar ao ONS a revisão inicial do Projeto Básico.

No ano de 2013 o ONS lançou o livro “Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão” (ONS, 2013), com intuito de uniformizar os documentos de Projeto Básicos recebidos pelo Operador, orientando também a respeito das formas de realização desses estudos. Isso foi motivado pelo elevado número de revisões de projeto sendo emitidas desde o ano 2000, quando o Projeto Básico passou a existir.

O Projeto Básico subdivide-se em quatro principais grupos de documentos:

- a) Estudos Elétricos
 - a. Regime Permanente
 - b. Transitórios Eletromagnéticos
- b) Especificação de Subestações e Equipamentos
 - a. Arranjos
 - b. Desenhos
 - c. Barramentos
 - d. Equipamentos Principais
- c) Estudos de Dimensionamento Básico de Linhas de Transmissão
- d) Aspectos Operacionais
 - a. Supervisão
 - b. Controle
 - c. Telecomunicações
 - d. Proteção

Todavia, o Parecer Técnico de Análise de Conformidade do Projeto Básico é dividido em apenas 3, pois agrega os itens a) e b) em apenas um documento, tendo em vista a estreita relação entre os mesmos.

O projeto é considerado aprovado quando não há pendências em nenhum dos 3 tipos de Pareceres Técnicos de Análise de Conformidade do Projeto Básico. Sob esta condição a Transmissora recebe o chamado Certificado de Conformidade do Projeto Básico (CCPB). Atualmente a liberação de um empreendimento para entrada em operação para testes (que antecede a entrada em operação comercial definitiva ou parcial), é impedida caso a Transmissora ainda não possua o CCPB.

Os estudos elétricos, parte do enfoque deste trabalho, têm por finalidade orientar a especificação dos equipamentos, que na etapa de PB já estão em processo de negociação para compra junto aos fabricantes. Há também o interesse de verificar o comportamento sistêmico com a conexão do novo empreendimento em sua região elétrica. Destaca-se que diferente dos estudos de planejamento, espera-se um maior detalhamento nas análises de projeto, uma vez que a Transmissora geralmente já dispõe do fornecedor dos equipamentos que pode oferecer dados mais sólidos a respeito do seu padrão de fabricação. Não se espera, por outro lado, que os dados adotados no PB sejam rigorosamente aqueles do equipamento efetivamente construído, pois há naturais desvios entre os valores de projetos de equipamentos com relação ao que se constrói. Entretanto, não é permitido que no processo que sucede o Projeto Básico, o Como Construído, se apresentem dados totalmente diferentes de seu antecessor.

Além do documento de Diretrizes (ONS, 2013), os documentos mais importantes e fundamentais para realização do projeto são os Anexos Técnicos Geral (um único por leilão) e Específicos (um por lote licitado) referentes ao empreendimento. Eles são documentos intimamente ligados ao contrato firmado entre a Transmissora e o Regulador e, portanto devem ser respeitados sempre.

Os estudos elétricos são divididos em dois grupos: Regime Permanente e Transitórios Eletromagnéticos, os quais serão explorados a seguir.

A 3.1 Estudos de Regime Permanente

Os estudos que compõem este grupo são:

- a) Estudo de Fluxo de carga.
- b) Estudos de curto-circuito.
- c) Estudos dinâmicos.
- d) Estudo de energização de linhas de transmissão na frequência fundamental.
- e) Estudo de rejeição de carga em linhas de transmissão na frequência fundamental.

- f) Estudo de fluxo nos barramentos.

Naturalmente nem todos os estudos se aplicam a todos os empreendimentos. Estudos dinâmicos, por exemplo, são recomendados quando há, dentre os equipamentos que compõem o anexo técnico um gerador, compensador Síncrono (CS), Compensador Estático de Reativos (CER), banco de capacitor série (BCS), autotransformador defasador ou quando da necessidade de verificar a adequação de tempos mortos elevados em religamento monopolar ou ângulo máximo de abertura em oposição de fases.

Desse conjunto de estudos obtêm-se, dentre outras, as seguintes características:

- Capacidade de corrente nominal em regime normal e de emergência.
- Capacidade de suportar corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica.
- Adequabilidade de compensação reativa indicada.
- Funcionamento básico de malhas de controle.
- Impacto do empreendimento em diferentes condições de operação.
- Definição da faixa de taps de transformadores.

Os critérios e metodologias para realização desses estudos, segundo recomendados pelo ONS, são apresentados no Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2018) e complementados com mais detalhes no próprio livro de diretrizes (ONS, 2013). Não é escopo deste trabalho avaliar metodologias desse tipo de estudos.

A 3.2 Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

A 3.2.1 Requerimentos de Projeto

Os estudos que compõem este grupo são:

- a) Estudo de Energização de Linhas de Transmissão.
- b) Estudo de Religamento Tripolar de Linhas de Transmissão.
- c) Estudo de Rejeição de Cargas de Linhas de Transmissão.
- d) Estudo de Religamento Monopolar de Linhas de Transmissão e Análise de Extinção de Arco Secundário.
- e) Estudo de Energização de Transformadores.
- f) Estudo de Energização e Abertura de Banco de Capacitores.
- g) Estudo de Tensão de Restabelecimento Transitória de Disjuntores.
- h) Estudo de Tensões e Correntes Induzidas em Lâminas de Terra.
- i) Estudo de Assimetria das Correntes de Curto-Circuito.

- j) Estudo de Coordenação de Isolamento de Subestações.
- k) Estudos associados à compensação estática *shunt*.
- l) Estudos associados à compensação série.

Naturalmente nem todos os estudos se aplicam a todos os empreendimentos.

Desse conjunto de estudos obtêm-se, dentre outras, as seguintes características:

- Tensões suportáveis nominal a impulso de manobra e atmosférico dos equipamentos.
- Verificação da coordenação de isolamento de linhas de transmissão.
- Necessidade da aplicação de métodos de controle de sobretensões, adotando, por exemplo, resistores de pré-inserção ou dispositivos sincronizadores em disjuntores, adição de para-raios, etc.
- Alteração do posicionamento de para-raios na subestação.
- Tensão nominal dos para-raios.
- Necessidade de aquisição de reatores de neutro para conexão em reatores de linha de transmissão.
- Compatibilidade entre as solicitações de TRT sobre os disjuntores e suas características especificadas ou ensaiadas.
- Necessidade de aquisição de reator limitador de corrente.
- Definição dos *ratings* de filtros de harmônicas.

As mesmas referências mencionadas para obtenção dos critérios e metodologias para execução dos estudos de regime permanente são válidas para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Apêndice B. LISTA DE CASOS SIMULADOS

A Tabela B.1 a seguir lista todos os casos simulados, bem como todas as variações contempladas e discutidas no item 4 deste documento. São definidos os casos de Rede Completa e Rede Equivalente. Os casos de rede com barras infinitas e carga fictícia não foram incluídos por repetir os mesmos casos.

Ao variar algumas características da LT, naturalmente alterou-se a potência de curto-circuito dos terminais, contudo, entende-se que o valor resultante é pequeno e não descaracterizaria a análise sendo realizada.

Tabela B.1:Tabela de Casos Simulados

CASO	CONFIGURAÇÃO	TERMINAL	VARIAÇÕES	FLUXO		COMPRIMENTO		Transp.	Reat. N.	COMP. SHUNT		NÍVEL CC MIRACEMA (kA)			NÍVEL CC GILBUÉS (kA)		
				MW	% SIL	Km	%	(S/N)	(ohm/N)	Mvar	%	MONO	TRI	%	MONO	TRI	%
1	SISTEMA COMPLETO	SA	Base	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.97	31.65	100%	8.85	15.95	100%
2			↓ Pcc	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	17.21	26.94	78/85%	8.5	14.62	96/92%
3			↑ Pcc	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	25.34	38.08	115/120%	9.08	17.04	103/107%
4			↑ Comprimento	415	24.7% SIL	543	130%	S	N	780	66.33%	21.81	31.27	99%	8.65	15.64	98%
5			↓ Comprimento	415	24.7% SIL	293	70%	S	N	420	66.33%	22.28	32.25	102%	9.271	16.99	107%
6			↓ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	452	50.00%	21.81	31.47	99%	8.724	15.85	99%
7			↑ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	814	90.00%	22.1	31.75	101%	9.04	16.01	100%
8			↑ Carregamento	949	56.49% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.94	31.6	100%	8.86	15.95	100%
9			↑↑ Carregamento	1680	100% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.97	8.84	100%	31.64	15.95	100%
10			Ressonância a 60 Hz	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	740	78.67%	22.06	31.72	100%	8.98	16.04	100%
11			LT não Transposta	415	24.7% SIL	418	100%	N	N	600	66.33%	22.01	31.6	100%	8.85	15.81	100%
12			Xneutro = 800 Ω	415	24.7% SIL	418	100%	S	800	600	66.33%	21.69	31.6	100%	8.51	15.95	100%
13		SB	Base	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.97	31.65	100%	8.85	15.95	100%
14			↓ Pcc	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	17.21	26.94	78/85%	8.5	14.62	96/92%
15			↑ Pcc	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	25.34	38.08	115/120%	9.08	17.04	103/107%
16			↑ Comprimento	415	24.7% SIL	543	130%	S	N	780	66.33%	21.81	31.27	99%	8.65	15.64	98%
17			↓ Comprimento	415	24.7% SIL	293	70%	S	N	420	66.33%	22.28	32.25	102%	9.271	16.99	107%
18			↓ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	452	50.00%	21.81	31.47	99%	8.724	15.85	99%
19			↑ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	814	90.00%	22.1	31.75	101%	9.04	16.01	100%
20			↑ Carregamento	949	56.5% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.94	31.60	100%	8.86	15.95	100%
21			↑↑ Carregamento	1680	100% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.97	8.84	100%	31.64	15.95	100%
22			Ressonância a 60 Hz	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	740	78.67%	22.07	31.73	100%	8.98	16.06	100%
23			LT não Transposta	415	24.7% SIL	418	100%	N	N	600	66.33%	22.05	31.65	100%	8.86	15.82	100%
24			Xneutro = 800 Ω	415	24.7% SIL	418	100%	S	800	600	66.33%	21.97	31.65	100%	8.85	15.95	100%
25	SISTEMA EQUIVALENTE	SA	Base	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.58	31.77	100%	8.65	15.68	100%
26			↓ Pcc	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	17.33	26.89	80/85%	8.29	14.63	96/93%
27			↑ Pcc	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	25.48	38.19	118/120%	9.09	17.17	105/110%
28			↑ Comprimento	415	24.7% SIL	543	130%	S	N	780	66.33%	21.35	31.2	100%	8.4	14.9	100%
29			↓ Comprimento	415	24.7% SIL	293	70%	S	N	420	66.33%	21.97	32.67	100%	9.07	16.88	100%
30			↓ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	452	50.00%	21.47	31.67	100%	8.49	15.54	100%
31			↑ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	814	90.00%	21.75	31.92	100%	8.81	15.76	100%
32			↑ Carregamento	949	56.5% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.58	31.77	100%	8.62	15.62	100%
33			↑↑ Carregamento	1680	100% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.58	31.77	100%	8.62	15.62	100%
34			Ressonância a 60 Hz	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	740	78.67%	21.69	31.87	100%	8.75	15.72	100%
35			LT não Transposta	415	24.7% SIL	418	100%	N	N	600	66.33%	21.66	31.73	100%	8.62	15.46	100%
36			Xneutro = 800 Ω	415	24.7% SIL	418	100%	S	800	600	66.33%	21.33	31.77	100%	8.3	15.68	100%
37		SB	Base	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.58	31.77	100%	8.65	15.68	100%
38	↓ Pcc		415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	17.33	26.89	80/85%	8.29	14.63	96/93%	

CASO	CONFIGURÇÃO	TERMINAL	VARIAÇÕES	FLUXO		COMPRIMENTO		Transp. (S/N)	Reat. N. (ohm/N)	COMP. SHUNT		NÍVEL CC MIRACEMA (kA)			NÍVEL CC GILBUÉS (kA)		
				MW	% SIL	Km	%			Mvar	%	MONO	TRI	%	MONO	TRI	%
39	SISTEMA EQUIVALENTE	SB	↑ Pcc	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	25.48	38.19	118/120%	9.09	17.17	105/110%
40			↑ Comprimento	415	24.7% SIL	543	130%	S	N	780	66.33%	21.35	31.20	100%	8.4	14.9	100%
41			↓ Comprimento	415	24.7% SIL	293	70%	S	N	420	66.33%	21.97	32.67	100%	9.07	16.88	100%
42			↓ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	452	50.00%	21.47	31.67	100%	8.49	15.54	100%
43			↑ Compensação	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	814	90.00%	21.75	31.92	100%	8.81	15.76	100%
44			↑ Carregamento	949	56.5% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.58	31.77	100%	8.62	15.62	100%
45			↑↑ Carregamento	1680	100% SIL	418	100%	S	N	600	66.33%	21.58	31.77	100%	8.62	15.62	100%
46			Ressonância a 60 Hz	415	24.7% SIL	418	100%	S	N	740	78.67%	21.69	31.87	100%	8.75	15.72	100%
47			LT não Transposta	415	24.7% SIL	418	100%	N	N	600	66.33%	21.97	31.65	100%	8.62	15.46	100%
48			Xneuro = 800 Ω	415	24.7% SIL	418	100%	S	800	600	66.33%	21.97	31.65	100%	8.3	15.68	100%

Apêndice C. DADOS PARA MODELAGEM DA LT 500 kV BASE

A seguir são apresentadas as características da linha de transmissão 500 kV tomada como base para utilização neste trabalho.

C.1 COMPRIMENTO E COMPENSAÇÃO

- 418 km
- 300 Mvar em cada terminal

C.2 CONDUTORES

- 6x CAL 823 kcmil, 37 fios de alumínio liga 1120.

Cujas características são:

- $R_{in} = 0,00 \text{ (cm)}$
- $R_{out} = 1,3265 \text{ (cm)}$
- $R_{dc} = 0,0791 \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$

C.3 PARA-RAIOS PREDOMINANTE

- 1x EAR 3/8''
- 1x OPGW 13,4mm

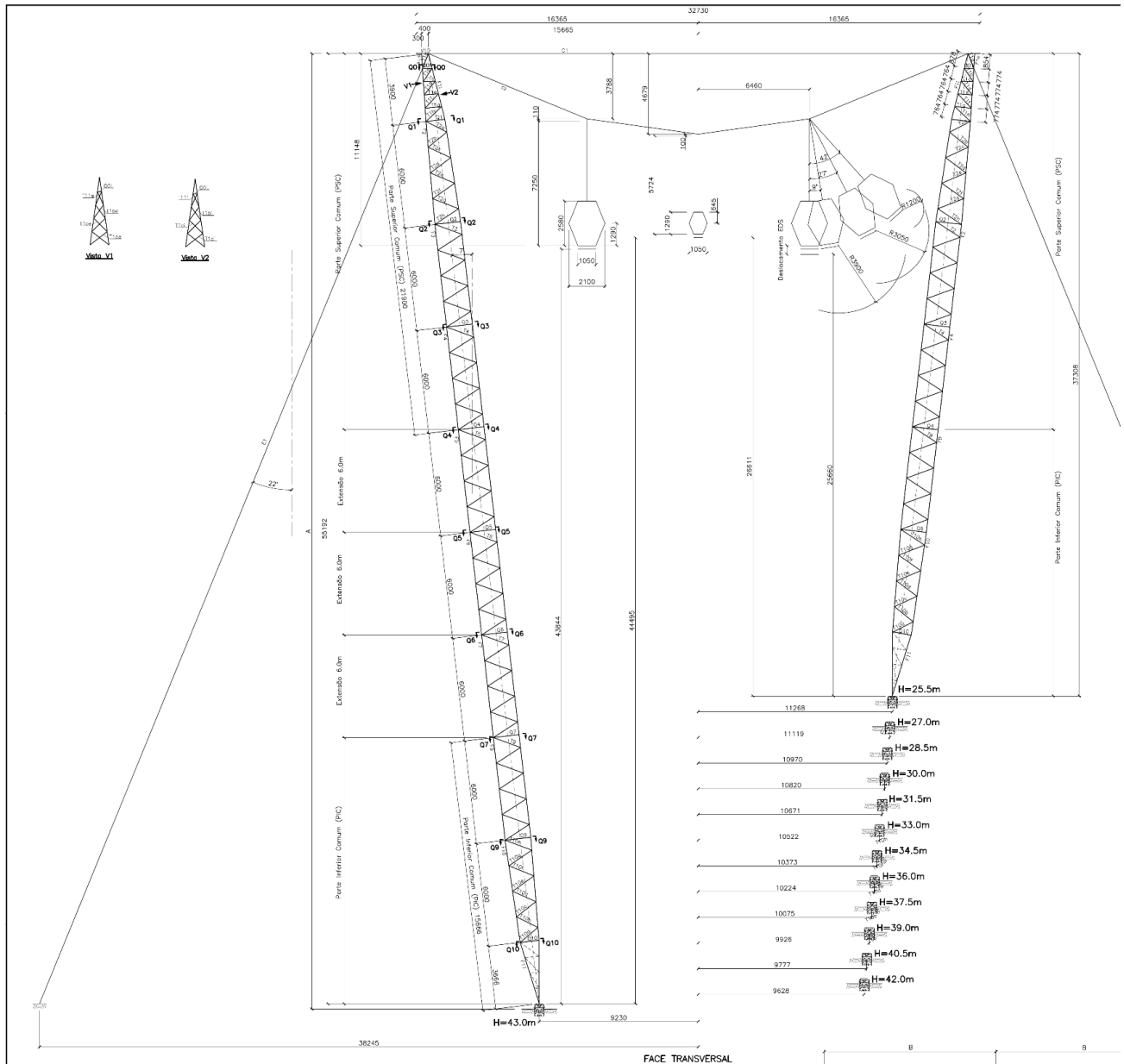
Cujas características são:

- | PR1 | PR2 |
|--|--|
| • $R_{in} = 0,00 \text{ (cm)}$ | • $R_{in} = 0,36 \text{ (cm)}$ |
| • $R_{out} = 0,4572 \text{ (cm)}$ | • $R_{out} = 0,67 \text{ (cm)}$ |
| • $R_{dc} = 4,230 \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$ | • $R_{dc} = 0,806 \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$ |

C.4 POSIÇÃO GEOMÉTRICA DOS CONDUTORES E PARA-RAIOS

Tabela C.1: Coordenadas das Posições Geométricas dos Condutores e Para-Raios

	Torre			Meio do Vão	
	Subcondutor	Horizontal (m)	Vertical (m)	Altura (m)	Flecha (m)
A	1	-6,99	37,25	16,08	21,17
	2	-5,94	37,25	16,08	21,17
	3	-5,41	35,96	14,79	21,17
	4	-5,94	34,67	13,50	21,17
	5	-6,99	34,67	13,50	21,17
	6	-7,51	35,96	14,79	21,17
B	1	-0,26	36,61	15,44	21,17
	2	0,26	36,61	15,44	21,17
	3	0,53	35,96	14,79	21,17
	4	0,26	35,32	14,15	21,17
	5	-0,26	35,32	14,15	21,17
	6	-0,53	35,96	14,79	21,17
C	1	6,99	37,25	16,08	21,17
	2	5,94	37,25	16,08	21,17
	3	5,41	35,96	14,79	21,17
	4	5,94	34,67	13,50	21,17
	5	6,99	34,67	13,50	21,17
	6	7,51	35,96	14,79	21,17
PR 1	-	-16,37	45,81	27,92	17,89
PR 2	-	16,37	45,81	27,92	17,89



C.5 PARÂMETROS ELÉTRICOS

Tabela C.2: Parâmetros Elétricos da LT 500 kV Base

Sequência	Resistência (ohm/km)	Reatância (ohm/km)	Susceptância (µS/km)
Positiva	0,01380	0,19192	8,65585
Zero	0,35491	1,16432	3,10728

C.6 CÁLCULO DO SIL

A potência natural da linha de transmissão é dada por:

$$SIL = \frac{V_{LL}^2}{Z_{carac}} [MW]$$

Sendo

$$Z_{carac} = \sqrt{\frac{L_+}{C_+}} [\Omega]$$

Portanto, tem-se:

$$SIL = \frac{500^2}{\sqrt{\frac{0,19192}{8,65585}}}$$
$$SIL = 1679 [MW]$$

Apêndice D. DADOS PARA MODELAGEM DA LT 500 KV DE COMPARAÇÃO

A seguir são apresentadas as características da linha de transmissão 500 kV tida como referência para comparação da modelagem da rede com SIL de 1465 MW.

D.1 COMPRIMENTO E COMPENSAÇÃO

- 221 km.
- 150 Mvar em cada terminal.

D.2 CONDUTORES

- 6 x ACAR 850 kcmil.

Cujas características são:

- $R_{in} = 0,5778 \text{ (cm)}$
- $R_{out} = 1,3480 \text{ (cm)}$
- $R_{dc} = 0,07913 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$

D.3 PARA-RAIOS PREDOMINANTE

- PR 1: 1 x EAR 3/8''
- PR 2: 1 x OPGW 13,4mm

Cujas características são:

- | PR1 | PR2 |
|---|---|
| • $R_{in} = 0,00 \text{ (cm)}$ | • $R_{in} = 0,36 \text{ (cm)}$ |
| • $R_{out} = 0,4572 \text{ (cm)}$ | • $R_{out} = 0,67 \text{ (cm)}$ |
| • $R_{dc} = 4,230 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$ | • $R_{dc} = 0,806 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$ |

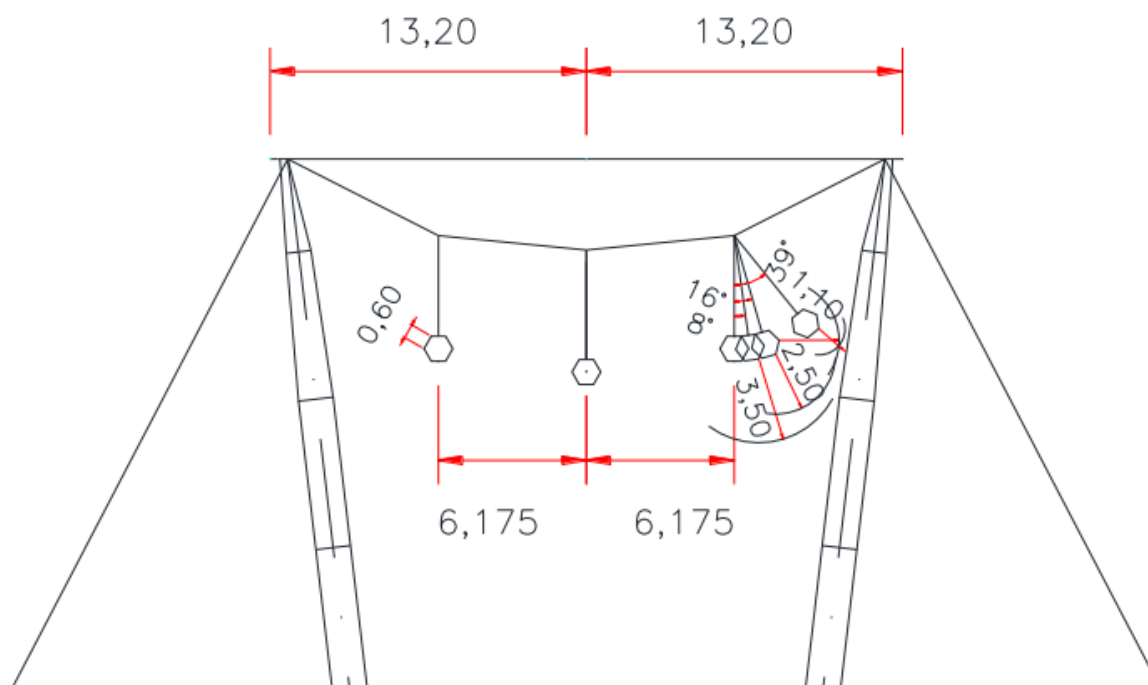
D.4 POSIÇÃO GEOMÉTRICA DOS CONDUTORES E PARA-RAIOS

Tabela D.1:Coordenadas das Posições Geométricas dos Condutores e Para-Raios da LT

	Torre		Meio do Vão	
	Horizontal (m)	Vertical (m)	Altura (m)	Flecha (m)
A	-6,175	34,09	12,50	21,59
B	0,00	33,59	12,00	21,59
C	6,175	34,09	12,50	21,59
PR 1	13,2	42,59	21,00	21,59
PR 2	-13,2	42,89 (*)	21,00	21,89

(*) Valor conforme definido no Projeto Básico da Linha

Figura D-1: Estrutura típica da LT 500 kV DO Projeto para Comparação.



D.5 PARÂMETROS ELÉTRICOS

Tabela D.2:Parâmetros Elétricos da LT 500 kV de comparação

Sequência	Resistência (ohm/km)	Reatância (ohm/km)	Susceptância (μS/km)
Positiva	0,0139	0,2199	7,5512
Zero	0,2636	1,1714	3,0277

D.6 CÁLCULO DO SIL

A potência natural da linha de transmissão é dada por:

$$SIL = \frac{V_{LL}^2}{Z_{carac}} [MW]$$

Sendo

$$Z_{carac} = \sqrt{\frac{L_+}{C_+}} [\Omega]$$

Portanto, tem-se:

$$SIL = \frac{500^2}{\sqrt{\frac{0,2199}{7,5512}}}$$
$$SIL = 1465 [MW]$$