



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA



Propagação de Transitórios de Alta Frequência e o Efeito de Múltiplas Reflexões em Redes Coletoras de Parques Eólicos Marítimos

Fernanda Spada Villar

Orientador: Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva

Banca Examinadora: Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva – FEEC/UNICAMP

Dr. Mauricio Barbosa de Camargo Salles – POLI/USP

Dra. Maria Cristina Dias tavares – FEEC/UNICAMP

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração em Energia Elétrica.

Campinas, 18 de Março de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V71p	<p>Villar, Fernanda Spada</p> <p>Propagação de transitórios de alta frequência e o efeito de múltiplas reflexões em redes coletoras de parques eólicos marítimos / Fernanda Spada Villar. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientador: Luiz Carlos Pereira da Silva.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Ondas eletromagnéticas - Propagação. 2. Sobretensão. 3. Refração. 4. Cabos elétricos. 5. Interferência (Eletricidade). I. Silva, Luiz Carlos Pereira da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
------	---

Título em Inglês: High frequency transients propagation and multiple reflections effect in collection grids for offshore wind parks

Palavras-chave em Inglês: Electromagnetic waves - Propagation, Surge, Refraction, Electric cables, Interference (Electricity)

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Mauricio Barbosa de Camargo Salles, Maria Cristina Dias Tavares

Data da defesa: 18/03/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Fernanda Spada Villar

Data da Defesa: 18 de março de 2011

Título da Tese: "Propagação de Transitórios de Alta Frequência e o Efeito de Múltiplas Reflexões em Redes Coletoras de Parques Eólicos Marítimos"

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva (Presidente):

Luiz C. P. da Silva

Prof. Dr. Mauricio Barbosa de Camargo Salles:

Maurício Salles

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares:

Maria Cristina

Resumo

VILLAR, Fernanda Spada, Propagação de Transitórios de Alta Frequência e o Efeito de Múltiplas Reflexões em Redes Coletoras de Parques Eólicos Marítimos, Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2011, 112p., Dissertação de mestrado.

Neste trabalho a propagação de transitórios de tensão dentro de uma rede coletora de parques eólicos marítimos foi estudada. Foram analisados especificamente os transitórios de tensão originados durante a energização do parque eólico, e foi modelado o efeito dos múltiplos pontos de reflexão na composição da forma de onda da sobretensão transitória. O momento de energização desperta interesse pois todos os transformadores localizados nos topos das torres, por estarem descarregados, se comportam como um ponto de circuito aberto, refletindo de volta para a rede 100% de qualquer onda de tensão viajante que incide sobre ele.

As configurações de rede coletora escolhidas foram as comumente utilizadas em Parques Eólicos Marítimos atualmente pela Europa. Ainda, uma topologia alternativa que emprega a rede de cabos em estrela foi estudada. Para validação dos estudos analíticos e da modelagem desenvolvida foi utilizado o software PSCAD.

A análise numérica dos coeficientes de reflexão e refração nos nós da rede coletora e de seu efeito na propagação dos transientes em questão mostrou que o efeito atenuador resultante de refrações consecutivas dentro da rede, no caso do coeficiente de refração menor que 1, tem grande importância, chegando a anular o efeito amplificador da interferência construtiva, decorrente da existência de múltiplos pontos de reflexão.

Palavras-chave: transitórios de alta frequência; onda viajante; reflexão; refração; interferência construtiva; sobretensão;

Abstract

VILLAR, Fernanda Spada, High Frequency Transients Propagation and Multiple Reflections Effect in Collection Grids for Offshore Wind Parks, Campinas, Electrical and Computer Engineering Faculty, State University of Campinas, 2011, 112p., Master's Dissertation.

In this dissertation, the propagation of voltage transients inside a collection grid of Offshore Wind Parks (composed by cables) is studied. Mainly the transients generated during the WP energizing are analyzed, and the effect of the multiple reflection points in the composition of the overvoltage is modeled. The energizing moment is a special case to study because all the transformers at the towers top, being unloaded, behave like an open circuit and reflect 100% of the incident voltage travelling waves back to the grid.

The grid configurations chosen are the commonly used in modern Offshore Wind Parks in Europe. Also an alternative layout, that uses the cables in a star grid, is studied. In order to validate the theory developed, simulations were made using the software PSCAD.

The numerical analysis of the reflection and refraction coefficients in every node of the collection grid and its effect in the voltage transient's propagation showed that the attenuation effect, as a result of the consecutive refractions inside the grid in the cases where the refraction coefficient is smaller than 1, is important enough to cancel the amplification effect of the constructive interference, that happens due to the multiple reflection points.

Keywords: high frequency transients; traveling wave; reflection; refraction; constructive interference; overvoltage;

Agradecimentos

Ao meu orientador na Unicamp, Luiz Carlos Pereira da Silva, tanto pelo suporte técnico e pelas oportunidades oferecidas quanto pela paciência e amizade durante os anos em que trabalhamos juntos.

Ao meu orientador e co-orientador na ABB Corporate Research na Suécia, Muhamed Reza e Kailash Srivastava, pelo aprendizado teórico e prático.

A Ener Salinas, da ABB Corporate Research, pela ajuda na revisão do meu trabalho e pela amizade desenvolvida (sem esquecer dos ensinamentos sobre bonsais e dicas culinárias).

A Walmir de Freitas e Maria Cristina Tavares, da Unicamp, pelas novas idéias e discussões sobre meus resultados.

Ao meu noivo, André Mansur, pela energia empregada e por todo o suporte pessoal prestado durante os 5 meses que ficamos separados. À Carolina Spada Villar, pelas muitas conversas que me fizeram sentir mais próxima de casa. A Sonia Helena Spada Villar e Luiz Villar, por terem me dado tudo de que pudesse precisar para que chegasse aonde cheguei.

Aos amigos e colegas feitos na ABB e a todos os meus queridos amigos no Brasil.

À ABB Corporate Research pela oportunidade e infra-estrutura oferecidas e à Universidade Estadual de Campinas por todo o suporte à minha educação desde 2002.

Por último, mas não menos importante, obrigada a todos que me ajudaram de alguma forma a fazer este trabalho se tornar realidade.

Sumário

RESUMO	V
AGRADECIMENTOS	VII
SUMÁRIO	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Escopo	1
1.3 Definições	1
1.4 Estrutura	3
2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	5
2.1 A Importância da Energia Eólica	5
2.2 A energia Eólica no Brasil	6
2.3 Fazendas Eólicas Marítimas na Europa	8
2.4 Sistema de Cabos e Rede Coletora	9
2.5 A Importância dos Transitórios em Redes Coletoras	12
2.6 Reflexão e Refração de Ondas Viajantes e suas Consequências	13
3 TEORIA ENVOLVIDA	15
3.1 O Fenômeno Transitório	15
3.1.1 Formulação Matemática e Sua Interpretação Física	16
3.1.2 Constantes de Tempo e a Frequência Natural	17
3.2 O Princípio da Onda Viajante	19
3.3 Impedância Característica	20
3.4 Coeficientes de Reflexão e Refração	20
3.4.1 Reflexões e Refrações em Terminações de Linha	22
3.5 Diagramas de Lattice	24
3.6 Tensão de Restabelecimento Transitória	26
3.7 Impacto em Componentes	27
3.7.1 Reignição e Reacendimento em Disjuntores	27
3.7.2 Risco de Falha no Isolamento de Transformadores	28

4	ABORDAGEM TEÓRICA	29
4.1	Introdução	29
4.2	Topologias de Parques Eólicos Marítimos Estudadas	31
4.2.1	Configuração da Torre	32
4.2.2	Alimentador Simples com até 9 Torres	32
4.2.3	Configuração com Múltiplos Alimentadores (n x n)	33
4.2.4	Simetrias em Estrela	33
4.3	Formulação Matemática	34
4.3.1	Considerações Numéricas Sobre os Coeficientes de Reflexão e Refração	34
4.3.2	Construção da Forma de Onda	40
4.3.3	Resultados Gráficos	44
4.4	Propagação de Transitórios na Rede Coletora	48
4.4.1	Premissas	49
4.4.2	F1_W4: 1 alimentador, 4 geradores	50
4.4.3	F4_W4: 4 alimentadores, 4 geradores por alimentador	51
4.4.4	F1_W6: 1 alimentador, 6 geradores	54
4.4.5	F6_W6: 6 alimentadores, 6 geradores por alimentador	55
4.4.6	F1_W9: 1 alimentador, 9 geradores	58
4.4.7	W9_F9: 9 alimentadores, 9 geradores por alimentador	60
4.4.8	STAR_7: 7 geradores, conexão em estrela	64
4.4.9	STAR_9: 9 geradores, conexão em estrela	66
4.5	Conclusões	67
5	SIMULAÇÕES	69
5.1	Modelagem dos Cabos	70
5.1.1	Seleção dos Parâmetros dos Cabos no PSCAD/EMTDC	71
5.1.2	Parâmetros do Núcleo	72
5.1.3	Isolação e Camada semicondutora	73
5.1.4	Condutor de Blindagem	73
5.1.5	Exemplo Numérico	73
5.2	Verificação da Velocidade da Onda Viajante	77
5.3	Medição da Impedância Característica	79
5.4	Verificação de Configurações Seleccionadas	80
5.4.1	F1_W4: 1 alimentador, 4 geradores	80
5.4.2	F9_W9: 9 alimentadores, 9 geradores por alimentador	85
5.4.3	STAR_7: 7 Geradores, Cabos Conectados em Estrela	89
5.5	Observações Conclusivas	91
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	93
6.1	Conclusões	93
6.2	Trabalhos Futuros	94

Lista de Figuras

figura 2.1: Segunda turbina eólica de Fernando de Noronha (225 kW).	7
figura 2.2: Parque Eólico Praias de Parajuru, Ceará – 19 aerogeradores totalizando 28,8 MW.	8
figura 2.3: Instalação de Cabos em uma Fazenda Eólica Marítima.	10
figura 2.4: Diferentes tempos de subida para a mesma carga capacitiva, devido a diferentes impedâncias características (a) $Z_0=30 \Omega$; $C=10 \mu\text{F}$ (b) $Z_0=300 \Omega$; $C=10 \mu\text{F}$.	11
figura 2.5: Frequência dos fenômenos que ocorrem durante chaveamento de disjuntores de média tensão. Adaptado de [15].	13
figura 3.1: Comportamento transitório.	15
figura 3.2: Comportamento transitório (capacitor sendo carregado).	17
figura 3.3: Exponenciais características.	18
figura 3.4: Princípio da superposição.	18
figura 3.5: (a) linha de transmissão monofásica ideal; (b) representação em parâmetros concentrados da linha de transmissão representada em (a).	19
figura 3.6: Reflexão e refração em um ponto de descontinuidade.	21
figura 3.7: Reflexão e refração em um curto-circuito.	23
figura 3.8: Reflexão e refração em um circuito aberto.	24
figura 3.9: Diagrama de Lattice para uma onda viajante sendo refletida em um cabo de 800m.	25
figura 3.10: Diagrama de Lattice mostrando reflexões primárias e secundárias de uma onda viajante em um cabo de 880 m, com ponto de descontinuidade em 800 m.	26
figura 3.11: Formas de onda de Tensões de Restabelecimento Transitórias diferentes [16].	27
figura 3.12: Escalation devido a interrupção de corrente de curto-circuito [16].	28
figura 4.1: Diagrama unifilar de um Parque Eólico Marítimo.	30
figura 4.2: Configuração de torre considerada.	32
figura 4.3: Diagrama unifilar da configuração de alimentador simples.	32
figura 4.4: Diagrama unifilar da configuração de múltiplos alimentadores (n x n).	33
figura 4.5: Diagrama unifilar da simetria em estrela (caso com 7 torres).	34
figura 4.6: Coeficiente de reflexão para tensão (α) em função da razão entre as impedâncias características.	35
figura 4.7: Coeficiente de refração (β) x Z_B/Z_A .	39
figura 4.8: Ramo genérico.	40
figura 4.9: Circuito aberto.	42
figura 4.10: Controle de tensão em uma das extremidades.	43

figura 4.11: Circuito analisado.	45
figura 4.12: Onda viajante de 1 p.u. de tensão sendo refletida no Ramo 1.	45
figura 4.13: Onda viajante sendo refletida no Ramo 2.	46
figura 4.14: Onda viajante sendo refletida no Ramo 3.	47
figura 4.15: Soma das reflexões nos ramos 1 e 2.	47
figura 4.16: Soma das reflexões nos ramos 1, 2 e 3.	48
figura 4.17: Distribuição dos geradores – caso F1_W4.	50
figura 4.18: Distribuição dos geradores – caso F4_W4.	52
figura 4.19: Distribuição dos geradores – caso F1_W6.	54
figura 4.20: Distribuição dos geradores – caso F6_W6.	56
figura 4.21: Distribuição dos geradores – caso F1_W9.	58
figura 4.22: Distribuição dos geradores – caso F9_W9.	60
figura 4.23: Distribuição dos geradores – caso STAR_7.	64
figura 4.24: Distribuição dos geradores – caso STAR_9.	66
figura 5.1: Seção transversal do modelo do cabo de 50 mm ² no PSCAD.	70
figura 5.2: Seção transversal dos cabos reais [13].	72
figura 5.3: Seção transversal real do cabo de 95 mm ² .	74
figura 5.4: Seção transversal do cabo conforme modelo PSCAD.	75
figura 5.5: Tempo de trânsito para onda viajante de tensão, cabo de 500 mm ² , 500 m de comprimento.	78
figura 5.6: Tempo de trânsito para onda viajante de tensão, cabo de 50 mm ² , 800 m de comprimento.	78
figura 5.7: Onda de tensão durante a energização do modelo do cabo de 50 mm ² .	79
figura 5.8: Onda de corrente durante a energização do modelo do cabo de 50 mm ² .	79
figura 5.9: Configuração da simulação – caso F1_W4.	80
figura 5.10: Onda incidente no nó 1.	81
figura 5.11: Transitório no topo da torre 1.	81
figura 5.12: Primeiro ciclo de reflexões.	83
figura 5.13: Primeira incidência no gerador 1.	84
figura 5.14: Primeira incidência no gerador 2.	84
figura 5.15: Primeira incidência no gerador 3.	84
figura 5.16: Primeira incidência no gerador 4.	85
figura 5.17: Degrau de tensão de amplitude V1. Medições após o cabo da plataforma.	85
figura 5.18: Tensão nos terminais do transformador do gerador 1. Verificação do Coeficiente de Refração.	86
figura 5.19: Tensão nos terminais do transformador da torre 2.	86
figura 5.20: Tensão nos terminais do transformador da torre 3.	86
figura 5.21: Transitório de tensão visto nos terminais do transformador do gerador 1.	87

figura 5.22: Transitório de tensão visto nos terminais do transformador do gerador 3.	88
figura 5.23: Transitório na torre 6.	88
figura 5.24: Transitório na torre 8.	88
figura 5.25: Transitório de tensão na plataforma.	90
figura 5.26: Transitório de tensão nos terminais dos transformadores das torres 1 a 6.	90
figura 5.27: Construção da forma de onda dos transitórios.	90

Lista de Tabelas

tabela 2.1: Centrais Eólicas em Operação do Brasil – Janeiro de 2002.	6
tabela 2.2: Leilão de Energia de Reserva (Eólica) – resultado.	8
tabela 3.1: Reflexões dentro de um ramo.	25
tabela 4.1: Nível Básico de Impulso sugerido pela norma do IEEE [2].	31
tabela 4.2: Configurações dos parques eólicos estudadas.	31
tabela 4.3: Corrente nominal no cabo da torre.	35
tabela 4.4: Limite de condução de corrente para cabos de cobre singelos, em Ampères. Dados Referentes ao ABB XLPE User’s Guide [13], Tabela 3.	36
tabela 4.5: Limite de condução de corrente para cabos de cobre tripolares, em Amperes. Dados referentes ao ABB XLPE User’s Guide [13], Tabela 1.	36
tabela 4.6: Dados construtivos dos cabos XLPE da ABB tensão nominal até 45 kV, referentes ao ABB XLPE User’s Guide [13], Tabela 26.	37
tabela 4.7: Valores práticos para o coeficiente de reflexão.	38
tabela 4.8: Atenuação de um transitório por múltiplas reflexões.	38
tabela 4.9: Construção da tensão.	41
tabela 4.10: Construção da tensão em um circuito aberto.	42
tabela 4.11: Construção da tensão com controle de tensão no nó1.	44
tabela 4.12: Coeficientes de reflexão – caso F1_W4.	50
tabela 4.13: Coeficientes de refração – caso F1_W4.	50
tabela 4.14: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso F1_W4.	51
tabela 4.15: Coeficientes de reflexão – caso F4_W4.	52
tabela 4.16: Coeficientes de refração– caso F4_W4.	52
tabela 4.17: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos do mesmo alimentador (p.u.) – caso F4_W4.	53
tabela 4.18: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos dos outros alimentadores - caso F4_W4.	53
tabela 4.19: Coeficientes de reflexão – caso F1_W6.	54
tabela 4.20: Coeficientes de refração – caso F1_W6.	54
tabela 4.21: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso F1_W6.	55
tabela 4.22: Coeficientes de reflexão – caso F6_W6.	56
tabela 4.23: Coeficientes de refração – caso F6_W6.	56
tabela 4.24: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos do mesmo alimentador (p.u.) – caso F6_W6.	57
tabela 4.25: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos dos outros alimentadores – caso F6_W6.	57

tabela 4.26: Coeficientes de reflexão – caso F1_W9.	58
tabela 4.27: Coeficientes de refração – caso F1_W9.	58
tabela 4.28: propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso F1_W9.	59
tabela 4.29: Coeficientes de reflexão – caso F9_W9.	61
tabela 4.30: Coeficientes de refração – caso F9_W9.	61
tabela 4.31: Propagação de transitórios nos ramos do mesmo alimentador (p.u.) – caso F9_W9.	62
tabela 4.32: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos dos outros alimentadores (p.u.) – caso F9_W9.	63
tabela 4.33: Coeficientes de reflexão – caso STAR_7.	64
tabela 4.34: Coeficientes de refração – caso STAR_7.	65
tabela 4.35: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso STAR_7.	65
tabela 4.36: Coeficientes de reflexão – caso STAR_9.	66
tabela 4.37: Coeficientes de refração – caso STAR_9.	66
tabela 4.38: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso STAR_9.	67
tabela 5.1: Casos simulados no PSCAD.	69
tabela 5.2: Resistividade do cobre e alumínio.	73
tabela 5.3: Dados de modelagem dos cabos utilizados.	77
tabela 5.4: Verificação da velocidade da onda viajante.	78
tabela 5.5: Medição via simulação da impedância característica do cabo de 50mm ² .	80
tabela 5.6: Primeiras refrações na rede – caso F1_W4.	83
tabela 5.7: Primeiras incidências nos nós da rede – caso F9_W9.	87

INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é investigar a propagação de transitórios de alta frequência em redes coletoras de Parques Eólicos Marítimos, especialmente os originados pelo chaveamento de disjuntores durante a energização, para determinar se a sobretensão resultante pode causar algum dano aos equipamentos em operação.

1.2 Escopo

Este trabalho descreve o comportamento de ondas viajantes se propagando por uma rede de cabos pela modelagem dos múltiplos pontos de reflexão, e as consequências da ocorrência de múltiplas reflexões e interferência construtiva.

A análise é feita baseada na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas e nos limites de sobretensão suportável por equipamentos durante transitórios (Nível Básico de Impulso) recomendados por normas do IEEE [1], [2].

Não está no escopo deste trabalho analisar o efeito da propagação de transitórios originados pela abertura de disjuntores sob carga (rejeição de carga).

A análise parte também do pressuposto que no momento imediatamente anterior ao início do transitório, todos os transformadores estão em vazio.

1.3 Definições

PE	Parque Eólico
PEM	Parque Eólico Marítimo

1. Introdução

LT	Linha de Transmissão Aérea, composta por cabos nus
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo, 3×10^8 m/s
v	Velocidade da onda viajante
μ	Permeabilidade magnética do meio, medida em H/m
μ_r	Permeabilidade magnética relativa do meio ($\mu_r = \mu / \mu_0$)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo (valor = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
ϵ	Permissividade do meio, medida em F/m
ϵ_0	Permissividade do vácuo (valor = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)
C	Capacitância shunt (agrupada ou distribuída)
L	Indutância série (agrupada ou distribuída)
tov	Sobretensão transitória (transient overvoltage)
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
$V_{\#}$	Tensão sobre um determinado ramo ou componente, em Volts
R	Resistência do ramo ou componente, em ohms
I	Corrente elétrica através de um ramo ou componente, em Ampères
$\frac{dV_{\#}}{dt}$	Derivada da tensão em relação ao tempo
S1	Chave 1
Z_0	Impedância característica de um cabo ou LT
$Z_{\#}$	Impedância característica de um determinado ramo
α	Coeficiente de reflexão em um determinado nó
β	Coeficiente de refração em um determinado nó
τ	Tempo de trânsito: tempo necessário para uma onda viajante eletromagnética percorrer uma determinada distância
NBI	Nível Básico de Impulso
IEC	International Electrotechnical Commission
ANSI	American National Standards Institute
DJ	Disjuntor
f_{01}	Frequência de ressonância da carga
UE	União Européia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica

1.4 Estrutura

A tese está dividida da seguinte maneira:

Capítulo 1, Introdução (esta seção), descreve os objetivos e escopo do trabalho assim como termos e abreviações utilizados.

Capítulo 2, Descrição do Problema, descreve a importância dos estudos sobre propagação de transitórios em redes coletoras (formadas por cabos) baseando-se na falta de informação (tanto estudos aprofundados quanto medições reais) sobre este tipo de sistema. Enumera também as causas e situações em que estes transitórios de alta frequência podem ocorrer.

Capítulo 3, Teoria Envolvida, descreve a teoria usada nas análises, ressaltando os aspectos mais importantes: principais equações, diagramas lattice, diferenças entre Linhas de Transmissão Aéreas e Redes de Cabos no que diz respeito a transitórios.

Capítulo 4, Abordagem Teórica, aplica a teoria descrita no Capítulo 3 às configurações específicas do problema e coloca alguns limites numéricos para os coeficientes de reflexão e refração de acordo com as particularidades das topologias mais comuns de Parques Eólicos Marítimos, levando em consideração os cabos comumente empregados e as conexões. Por fim, constrói-se o modelo usado para determinação da forma de onda da sobretensão e coloca algumas expectativas a respeito dos resultados das simulações.

Capítulo 5, Simulações, mostra os resultados das simulações de algumas configurações estudadas no Capítulo 4, valida os cálculos de coeficientes feitos anteriormente e mostra o efeito da ocorrência de múltiplas reflexões e interferência construtiva por toda a rede coletora.

Capítulo 6, Conclusões e Trabalhos Futuros, conclui este estudo e sugere os próximos trabalhos a serem desenvolvidos para continuar a investigação.

1. Introdução

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

2.1 A Importância da Energia Eólica

O impacto da poluição no meio ambiente e como isso pode afetar o clima mundial tem sido um assunto de recorrente discussão na comunidade internacional nos últimos anos. Uma das primeiras discussões sobre meio ambiente e aquecimento global começou com o protocolo de Kyoto, que entrou em vigor em 2005, de acordo com o qual os países industrializados se comprometem a reduzir a emissão de gases do efeito estufa em 5,2% em comparação aos níveis de 1990 até 2012. Esta porcentagem representa uma redução de 29% das emissões esperadas em 2012 sem o acordo.

Por outro lado, o crescimento da população mundial, da economia e da indústria resulta em um aumento da demanda energética, reafirmando a necessidade de substituir as poluidoras e não renováveis fontes de energia (como carvão mineral e petróleo) por alternativas mais limpas, como usinas hidrelétricas, solares e eólicas.

Seguindo esta tendência, em março de 2007 os líderes da União Européia desenvolveram um programa para aumentar a segurança energética da UE e ao mesmo tempo comprometer a Europa a transformar-se em uma economia de alta eficiência energética e baixa emissão de carbono até o ano 2020. Os objetivos deste programa, chamado de 20-20-20, seriam [3]:

- Reduzir as emissões de gases do efeito estufa em pelo menos 20% abaixo dos níveis de 1990;
- Fazer com que 20% da energia elétrica consumida na UE seja proveniente de fontes renováveis (o que seria um total de 230 GW);
- Reduzir em 20% o consumo primário de energia comparado aos níveis projetados através de melhoria na eficiência energética dos equipamentos.

Como o potencial hídrico europeu inaproveitado é pequeno, uma das maneiras de atingir estes objetivos é aumentar em número e tamanho os Parques Eólicos pela Europa, uma vez que este tipo de energia está disponível, é limpa, e a tecnologia

2. Descrição do Problema

necessária, apesar de estar ainda em desenvolvimento, já é suficiente para atender às necessidades.

Por sua vez, a indústria eólica europeia, juntamente com a Comissão Europeia e Líderes de Estado, desenvolveu um programa de pesquisa e desenvolvimento de 10 anos, com um orçamento de 6 bilhões de euros. A então chamada Iniciativa Eólica Europeia tem entre seus objetivos [4]:

- Tornar a energia eólica terrestre a mais competitiva até o ano de 2020, com a marítima vindo logo em seguida, até 2030;
- Permitir que a energia eólica supra 20% da demanda energética europeia até 2020, 33% em 2030 e 50% em 2050.

2.2 A energia Eólica no Brasil

A participação da energia eólica na matriz energética brasileira ainda não é significativa. Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [5], em janeiro de 2002 havia somente 6 centrais eólicas em operação no país, totalizando 18,8 MW instalados. No entanto, os esforços do governo federal para amenizar os impactos das crises no abastecimento de energia elétrica vivenciadas pelo país na última década incluem incentivos interessantes para este tipo de geração de energia.

tabela 2.1: Centrais Eólicas em Operação do Brasil – Janeiro de 2002.

Central Eólica	Proprietário	Localidade	UF	Potência (MW)
Fernando de Noronha I	Companhia Energética de Pernambuco	Fernando de Noronha	PE	0,075
Fernando de Noronha II	Centro Brasileiro de Energia Eólica	Fernando de Noronha	PE	0,225
Morro do Camelinho	Companhia Energética de Minas Gerais	Gouveia	MG	1,0
Palmas	Centrais Eólicas do Paraná Ltda.	Palmas	PR	2,5
Taíba	Wobben Wind Power Ind. E Com. Ltda.	São Gonçalo do Amarante	CE	5,0
Prainha	Wobben Wind Power Ind. E Com. Ltda.	Aquiraz	CE	10,0



figura 2.1: Segunda turbina eólica de Fernando de Noronha (225 kW).

Na corrida pela diversificação das fontes de energia utilizadas no Brasil, as termelétricas movidas a gás natural saíram na frente por necessitarem de um prazo pequeno de instalação, e pela possibilidade de localização perto dos grandes centros de consumo. Entretanto, a dependência de combustível de origem internacional faz que o custo de operação fique susceptível a oscilações cambiais, e a possibilidade de interrupção de fornecimento também contribui para aumentar o risco associado a elas.

Neste momento, os aerogeradores se mostram mais vantajosos por serem de rápida instalação comparados às Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), e o custo de geração cair drasticamente após a amortização do investimento inicial, uma vez que o seu combustível, o vento, não tem custo.

Seguindo esta tendência de crescimento, em 14 de dezembro de 2009 foi realizado o primeiro leilão exclusivo de energia eólica no Brasil, resultando na contratação de 1805,7 MW de potência (aproximadamente 100 vezes a potência instalada no início da década) divididos em 71 empreendimentos com contrato de venda de energia a partir de 1º de julho de 2012 [6].

2. Descrição do Problema

tabela 2.2: Leilão de Energia de Reserva (Eólica) – resultado.

ESTADO	PROJETOS		POTÊNCIA (MW)	
	QUANTIDADE	%	QUANTIDADE	%
Bahia	18	25,4	390	21,6
Ceará	21	29,5	542,7	30
Rio Grande do Norte	23	32,4	657	36,4
Rio Grande do Sul	8	11,3	186	10,3
Sergipe	1	1,4	30	1,7
Total Brasil	71	100	1.805,7	100

Após o sucesso deste primeiro leilão, em agosto de 2010 a energia eólica teve destaque em mais dois leilões de energia renovável [7] [8], nos quais foram habilitados 316 e 320 projetos eólicos, somando uma potência de 8.202 e 8.304 MW para serem vendidos a partir de janeiro e setembro de 2013, respectivamente.

Atualmente o país conta com 45 parques eólicos em operação, que somam 794 MW de potência, mais de 40 vezes a potência instalada 8 anos atrás. Apesar deste número representar apenas 0,7 da matriz energética nacional, esta realidade pode mudar de forma significativa nas próximas décadas.



figura 2.2: Parque Eólico Praias de Parajuru, Ceará – 19 aerogeradores totalizando 28,8 MW.

2.3 Fazendas Eólicas Marítimas na Europa

O potencial eólico marítimo é definido a partir das condições de vento combinadas com outros fatores, como limites tecnológicos, economia, ecologia e conflitos de

interesses com outros utilizadores da área marítima. Limites tecnológicos incluem profundidade do mar, distância da costa, fatores de manutenção, disponibilidade de tamanhos de turbinas e outras especificações técnicas destas, resistência dos equipamentos a atmosfera marítima, entre outros.

Mesmo com todas estas limitações, em 2008 já existiam 1,5 GW de potência instalada proveniente de fazendas eólicas marítimas pela Europa. De acordo com estatísticas da *The European Wind Association* [10], na primeira metade de 2010, 118 turbinas eólicas marítimas foram conectadas à rede, num total de 333 MW, e 151 estavam somente aguardando conexão (totalizando 440 MW somente neste ano). Existem também cerca de 16 fazendas eólicas marítimas em construção, representando 3972 MW. Todo o trabalho desenvolvido até 30 de Junho de 2010 faz a capacidade instalada total de fazendas eólicas marítimas na Europa chegue a 2396 MW, um aumento significativo em comparação a 2008.

O Plano Estratégico de Tecnologia Energética [4] para atingir os objetivos da Iniciativa Eólica Européia espera que, até o ano 2020, 40 GW da energia elétrica da EU será proveniente de PEMs, e entre 2020 e 2030 as instalações de fazendas eólicas irá atingir 20 GW por ano, dos quais 50% serão marítimas. Também está previsto um grande investimento tecnológico em turbinas eólicas e na confiabilidade nestas novas fazendas.

As novas gerações de Fazendas Eólicas são da ordem de 100 MW. Apesar da potência nominal das turbinas estar crescendo, estas fazendas ainda requerem uma grande área de instalação (os valores comerciais de turbinas estão entre 1,5 e 5 MW, mas esforços estão sendo feitos para criar turbinas na faixa de 10-20 MW [4]). A baixa disponibilidade de áreas desta ordem de grandeza pela Europa associada ao fato de que o potencial energético eólico no oceano é maior, e também ao desenvolvimento tecnológico dos equipamentos está transformando a idéia de Parques Eólicos Marítimos em realidade [11], [12].

2.4 Sistema de Cabos e Rede Coletora

Uma das particularidades de um Parque Eólico Marítimo que merece atenção especial é a rede coletora. Antes da potência elétrica convertida ser integrada à rede de transmissão principal todos os geradores são interconectados por cabos marítimos, que por sua vez se conectam a uma plataforma próxima da costa. Nesta plataforma ocorre a interconexão do PEM com o sistema interligado por meio de um único transformador de grande porte, de potência compatível com a fazenda. A configuração dos cabos (bitola, comprimento e conexão) difere de acordo com a topologia do PEM (disposição e número de torres e potência nominal dos geradores), mas a quantidade total requerida é sempre imensa.

A maioria dos equipamentos utilizados nesta rede coletora (principalmente transformadores e disjuntores) são os mesmos utilizados para uso no tradicional sistema de transmissão e distribuição. Entretanto, quando o ponto de observação é o comportamento durante transitórios (por exemplo, energização do alimentador,

2. Descrição do Problema

operação de disjuntor ou eliminação de falta) os fenômenos podem diferir bastante dos já conhecidos.

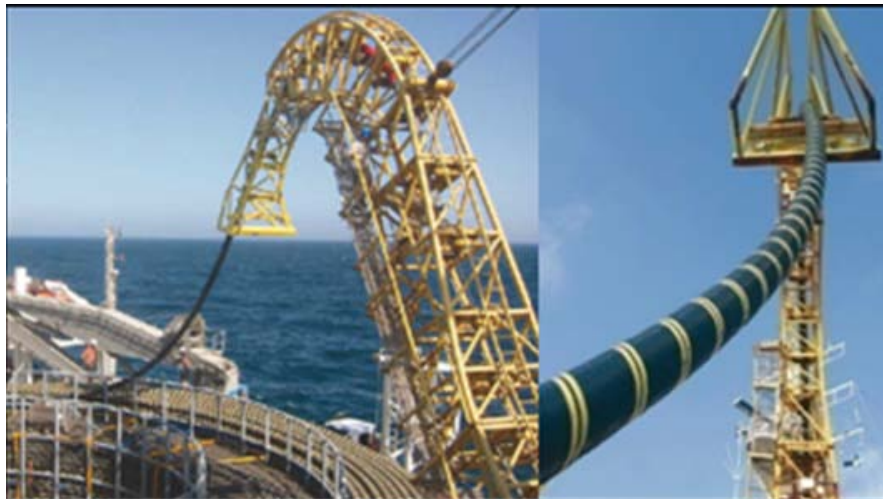


figura 2.3: Instalação de Cabos em uma Fazenda Eólica Marítima.

A primeira diferença é na velocidade da onda viajante. Em uma LT formada por cabos nus, desprezando-se as perdas, como o meio isolante é o ar, pode-se dizer que a velocidade de propagação das ondas viajantes é igual à velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8$ m/s). Porém, no caso de cabos submarinos, a isolação utilizada possui permeabilidade (μ) e permissividade (ϵ) maiores. A equação 1 mostra o cálculo da velocidade de propagação para os casos de condutores ideais. Logo, pode ser dito que a propagação de transitórios em um cabo isolado é mais lenta do que em uma LT composta por cabos nus.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

Entretanto, as distâncias envolvidas numa rede de cabos são muito menores que o comprimento médio de uma LT, resultando em tempos de propagação geralmente menores.

Outras diferenças importantes são o tempo de subida para degraus de tensão e impedância característica. Enquanto para uma LT convencional a impedância característica varia entre 300-500 Ω , em um cabo trifásico este valor é geralmente menor que 50 Ω [13].

O efeito desta diferença fica claro quando, por exemplo, um degrau de tensão atinge uma carga capacitiva. Neste caso, mesmo que a onda incidente equivalha a uma variação instantânea de tensão, a tensão nos terminais do capacitor leva um tempo para atingir seu valor de regime. Este tempo, chamado aqui de tempo de subida, é proporcional ao produto da impedância característica do condutor pelo valor da capacitância ($Z_0 \cdot C$). Como o valor de Z_0 para o cabo marítimo é muito

2. Descrição do Problema

menor, o degrau de tensão ao qual o capacitor é submetido quando atingido para a mesma onda incidente será muito mais íngreme quando ela vier conduzida por um cabo marítimo do que se viesse através de uma LT composta por cabos nus (figura 2.3).

Uma exemplo prático desta situação seria quando uma variação abrupta de tensão atinge os terminais de um transformador desenergizado. Apesar do enrolamento do transformador se assemelhar a um indutor, quando ele está desenergizado, para efeitos de comportamento transitório prevalecem as capacitâncias entre os terminais de fase e de neutro (e eventualmente entre fases, no caso de transformadores isolados a óleo).

As consequências destas diferenças entre LT formadas por cabos nus e cabos marítimos (isolados) serão exploradas adiante, mas neste ponto já fica clara a importância de estudar os fenômenos transitórios em redes de cabos para certificar-se de que eles não representam nenhum risco aos equipamentos em uso. Infelizmente, como este tipo de comportamento não acontece com frequência nem pode ser programado, a comunidade de energia eólica ainda tem pouca informação sobre a sua ocorrência e consequências.

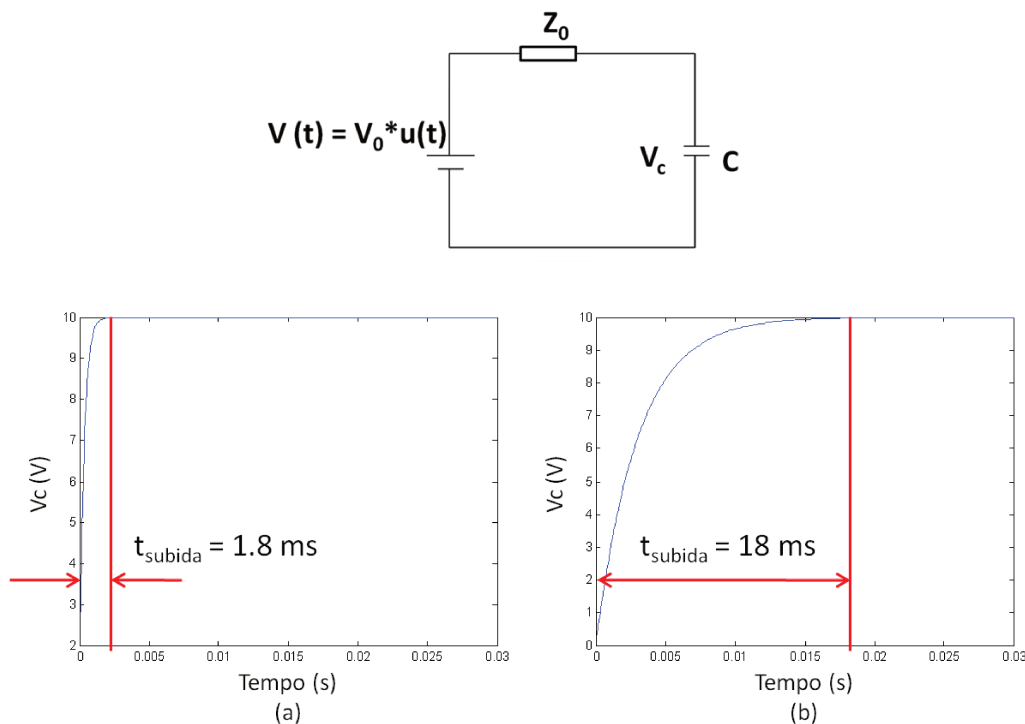


figura 2.4: Diferentes tempos de subida para a mesma carga capacitiva, devido a diferentes impedâncias características (a) $Z_0=30 \Omega$; $C=10 \mu F$ (b) $Z_0=300 \Omega$; $C=10 \mu F$.

2. Descrição do Problema

2.5 A Importância dos Transitórios em Redes Coletoras

Apesar da ocorrência de transitórios em redes coletoras não ser frequente, como ainda existem aspectos não dominados sobre eles, uma simples ocorrência pode representar risco ao Parque Eólico.

Uma prova disso é a falha que ocorreu no *Denmark's Horns Rev* [14], o maior PEM construído até 2004. Uma falha inesperada em aproximadamente 20% dos transformadores localizados no topo das torres fez com que fosse necessário mover todas as 81 turbinas e os 81 transformadores de 2 MVA para a terra para reparos. Este incidente afetou a confiança da comunidade de energia eólica nos parques marítimos já em funcionamento, e também nos novos a serem construídos.

Existem suspeitas de que transitórios rápidos tenham sido a causa da falha, devido às características destes em sistemas de cabos. Em comparação com uma Linha de Transmissão Aérea formada por cabos nus (LT), existem algumas diferenças importantes a respeito das características dos transitórios neste tipo de sistema. A primeira diz respeito a origem: em uma LT convencional, composta por cabos nus, as sobretensões transitórias (tov) são geralmente relacionadas a descargas atmosféricas, enquanto em um sistema de cabos elas são relacionadas a operação de disjuntores: abertura e fechamento durante a energização, desligamento programado ou eliminação de falta.

Ainda, a impedância característica em uma LT convencional fica geralmente na faixa de 300-500 Ω , enquanto este valor fica entre 15 e 50 Ω para cabos isolados. Como a sobretensão transitória nos terminais de uma carga predominantemente capacitiva (por exemplo os terminais de um transformador inicialmente desenergizado) quando atingida por um degrau de tensão é tão abrupta quanto menor a impedância característica do cabo que alimenta a carga, seja ele nu ou isolado, pode ser dito que o mesmo transformador, quando conectado a uma rede coletora, pode estar sujeito a um tov até 10 vezes mais rápido do que se ele estivesse conectado a uma LT formada por cabos nus, se atingido pela mesma frente de onda.

Algumas outras características da rede coletora fazem com que neste tipo de sistema as tovs possuam natureza repetitiva, além de tensões com altas derivadas em relação ao tempo. O grande número de geradores conectados em um PEM exige que a rede coletora seja altamente ramificada, gerando então múltiplos pontos de reflexão. Ainda, a distância geralmente fixa entre duas torres faz que ela seja simétrica em relação a vários pontos, possibilitando a ocorrência de interferência construtiva nestes centros de simetria. Por fim, as curtas distâncias envolvidas fazem com que os períodos de reflexão sejam menores, resultando em oscilações de maior frequência. A figura 2.4 mostra fenômenos comuns relacionados a transitórios de tensão, e a faixa de frequência que eles costumam ocupar.

Os testes atualmente especificados pelas normas do IEEE [1], [2], entretanto, não consideram estas características dos cabos isolados ou a repetitividade das TRTs.

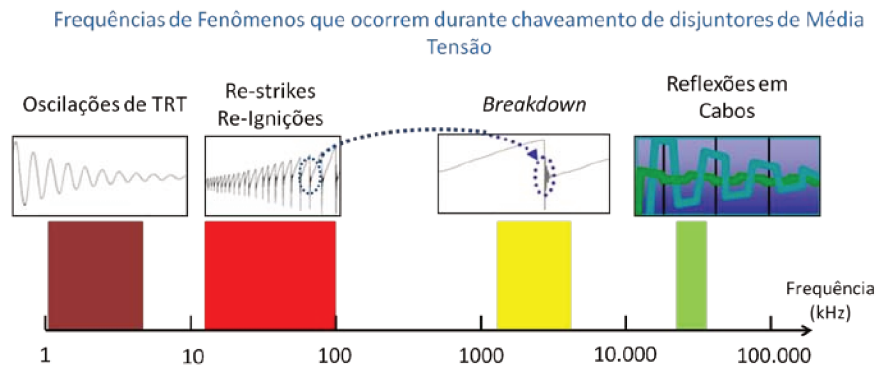


figura 2.5: Frequência dos fenômenos que ocorrem durante chaveamento de disjuntores de média tensão. Adaptado de [15].

2.6 Reflexão e Refração de Ondas Viajantes e suas Consequências

Em uma configuração típica, com múltiplos geradores, a interconexão de cada gerador resulta em um ponto de reflexão na rede. Assim, cada vez que uma manobra ou defeito gera uma resposta transitória do sistema, existem ondas viajantes sendo refletidas e refratadas em todos estes pontos, e propagando-se para frente e para trás por todos os condutores. A usual simetria dos PEMs, causada pela distância fixa entre duas torres, e os números de pontos de reflexão, podem criar algumas regiões onde mais de uma onda viajante se somam, pois atingem o mesmo ponto ao mesmo tempo.

Devido a este fato e à tendência de aumento do número de torres nos PEMs, a possibilidade de ocorrência de interferência construtiva tem sido um ponto de preocupação para a comunidade de energia eólica. Dependendo do número de ondas viajantes que se somam em um certo nó, teme-se que a sobretensão resultante possa ser muito maior que os níveis que os equipamentos possam suportar.

O principal objetivo deste trabalho é investigar se, para as configurações usuais de PEMs, as reflexões e refrações de uma onda viajante são capazes de criar uma situação na qual a interferência construtiva resulte em uma sobretensão alta o suficiente para danificar os equipamentos instalados, colocando toda a instalação em risco.

2. Descrição do Problema

TEORIA ENVOLVIDA

3.1 O Fenômeno Transitório

Um transitório elétrico é a resposta do sistema a uma mudança repentina nas condições do circuito, como por exemplo quando uma chave abre ou fecha. Também é conhecido como o comportamento do sistema quando vai de um estado estacionário para outro. A duração deste fenômeno é muito curta, comparada com a duração dos estados estacionários, mas o estudo deles é de extrema importância, pois é durante os transitórios que os componentes ficam sujeitos às condições mais extremas (tensões e/ou correntes excessivas), podendo ocorrer algum dano.

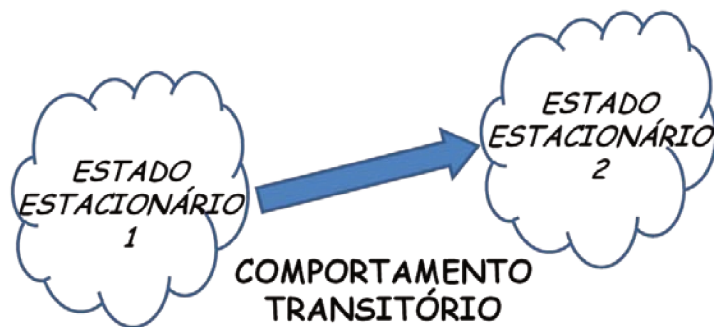


figura 3.1: Comportamento transitório.

Apesar deste tipo de situação não poder ser prevista nem programada, é importante identificar suas principais causas e conhecer o que acontece com os parâmetros do circuito (corrente e tensão) durante esta situação, para então selecionar equipamentos adequados, construídos para suportar o estresse ao qual serão submetidos. Caso contrário, máquinas podem ser desligadas inesperadamente, transformadores podem ser severamente danificados, e as consequências, dependendo da importância do circuito, podem ser desastrosas.

3. Teoria Envolvida

3.1.1 Formulação Matemática e Sua Interpretação Física

Para começar a análise dos fenômenos transitórios em um circuito, o primeiro passo sempre é definir as equações diferenciais que representam a resposta do circuito a certos estímulos. Por exemplo, a aplicação da Lei de Kirchhoff para definir a equação de um capacitor sendo carregado após o fechamento de um disjuntor nos leva a:

$$V = R.I + V_1 \quad (2)$$

Como a corrente através do capacitor é dada por:

$$I = C \cdot \frac{dV_1}{dt} \quad (3)$$

A equação final é:

$$V = R.C \cdot \frac{dV_1}{dt} + V_1 \quad (4)$$

Resolvendo a equação para a tensão sobre o capacitor:

$$V_1 = V - A.e^{\frac{-t}{RC}} \quad (5)$$

Onde A é a constante a ser definida a partir das condições iniciais do circuito.

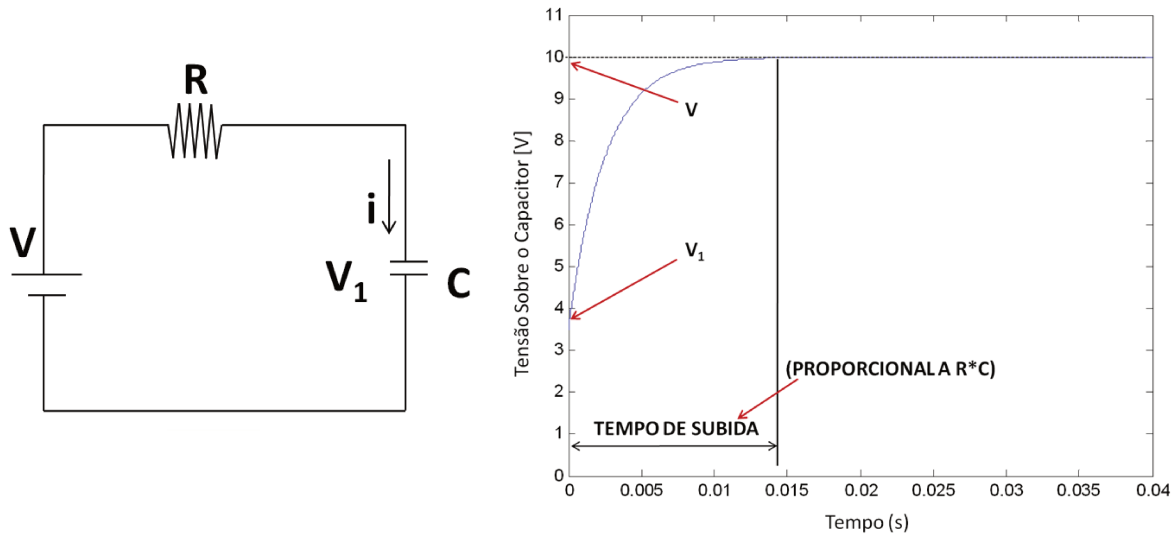


figura 3.2: Comportamento transitório (capacitor sendo carregado).

3.1.2 Constantes de Tempo e a Frequência Natural

Todo circuito elétrico simples (como um RC série, RL série ou LC série) é caracterizado por uma forma de onda típica como resposta a um estímulo externo. A solução da equação diferencial que descreve o comportamento do circuito em específico é uma combinação da equação desta forma de onda com constantes definidas pelo estado inicial (ver figura 3.3).

Por exemplo, como mostrado na seção anterior, a carga de um capacitor através de um resistor (RC série) é caracterizada pela exponencial $e^{\frac{-t}{RC}}$. Como $\frac{-t}{RC}$ é adimensional, RC tem a dimensão de tempo, e é conhecida como a *constante de tempo* do circuito. A constante de tempo é uma medida de quão rápido o circuito vai de um estado estacionário inicial para um novo, após ser submetido a uma mudança nas condições de contorno. Em outras palavras, é uma medida da duração do transitório.

As respostas características para os circuitos citados acima são:

3. Teoria Envolvida

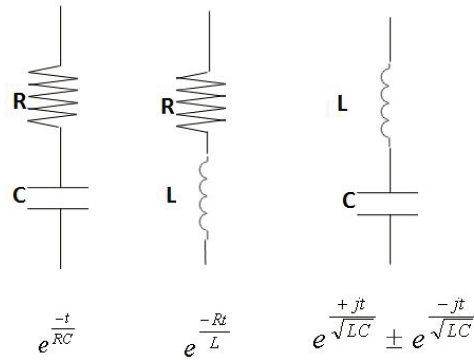


figura 3.3: Exponenciais características.

Pode ser visto que, no caso do circuito LC série, a exponencial complexa indica uma resposta na forma da combinação de senos e cossenos. A frequência destas ondas periódicas é chamada *frequência natural* do circuito e significa que, toda vez que o circuito é excitado, ele responde nesta frequência, independente do tipo de excitação. É importante dizer também que o circuito LC série não possui uma constante de tempo, isto é, uma vez excitado, nunca atinge um estado estacionário final.

Outro importante princípio matemático a ser utilizado nas análises de transitórios é o *princípio da superposição* (ver figura 3.4). Este diz que, se um circuito elétrico é submetido a uma excitação que pode ser descrita como a soma de duas excitações independentes, a resposta pode ser escrita como a soma das respostas do circuito a cada uma destas parcelas. Em outras palavras, pode-se dizer que circuitos elétricos se comportam como sistemas lineares durante transitórios de tensão.

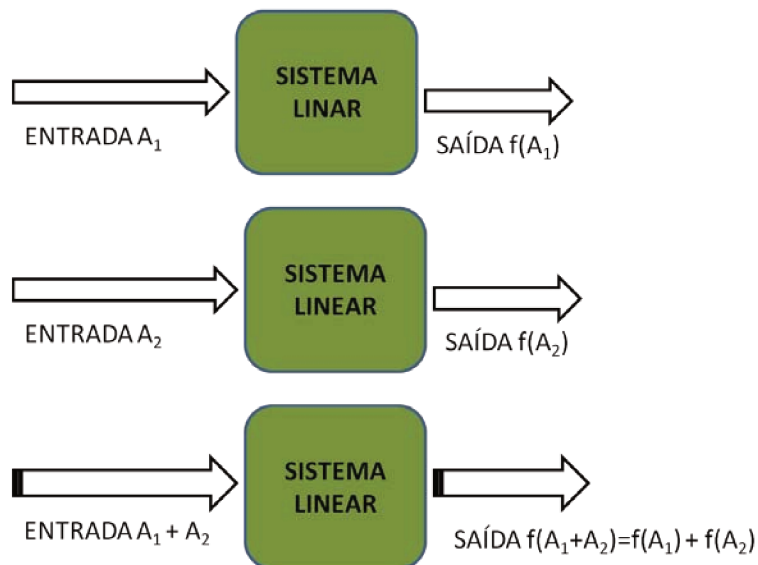


figura 3.4: Princípio da superposição.

3.2 O Princípio da Onda Viajante

Como a duração de um transitório de tensão em uma rede coletora geralmente é muito menor que o tempo que o mesmo leva para percorrer o condutor (tempo de trânsito), a modelagem dos parâmetros da linha de transmissão como concentrados, seja ela composta por cabos nus ou isolados, não é mais suficiente. Para levar em consideração o tempo gasto pela tensão e corrente para ir de uma extremidade a outra do condutor, por exemplo, é necessária uma modelagem dos parâmetros como distribuídos, como descrito a seguir:

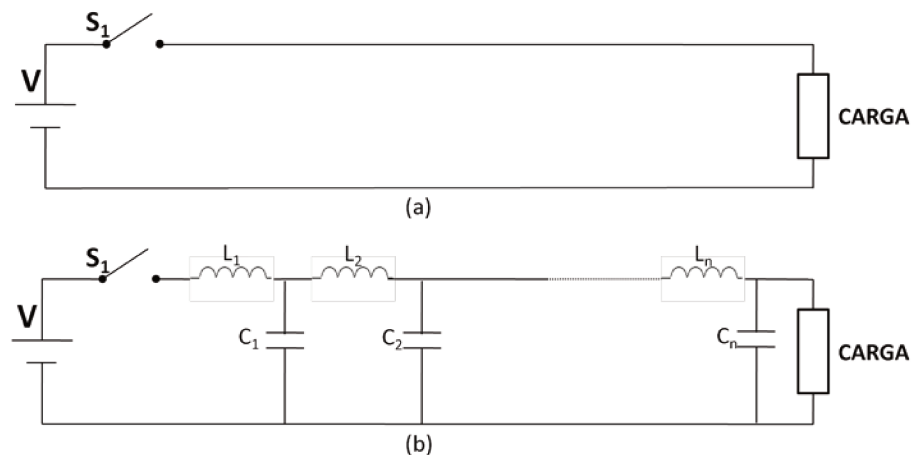


figura 3.5: (a) linha de transmissão monofásica ideal; (b) representação em parâmetros concentrados da linha de transmissão representada em (a).

Referindo-se à figura 3.5 acima, para o circuito modelado como em (a), no momento em que S_1 é fechada, a tensão V da fonte é imediatamente transferida para a carga. Esta é a situação mais idealizada. Porém, para entender o conceito de ondas viajantes, analisemos o mesmo circuito, mas como modelado em (b). No momento em que S_1 é fechada, corrente flui através de L_1 e C_1 , que começa a se carregar. Conseqüentemente, uma tensão aparece entre os terminais de C_1 , que é também a tensão entre os terminais do ramo constituído por L_2 e C_2 . A corrente neste ramo resultante do aparecimento da tensão entre os terminais de C_1 faz que surja tensão também entre os terminais de C_2 , e assim por diante. Desta maneira, carregando ramo após ramo, em um certo período de tempo a tensão da fonte finalmente chega aos terminais da carga.

Se considerarmos ramos tão pequenos quanto possível, os parâmetros série e shunt se transformam em *parâmetros distribuídos*, e são expressos em função do comprimento do condutor. Assim, as impedância e indutância série serão a partir de agora expressas em Ω/m e Henry/m, e a capacitância shunt em Faraday/m.

A velocidade da onda viajante em um condutor ideal (sem perdas) pode ser calculada a partir da equação 6 abaixo:

3. Teoria Envolvida

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \quad [m/s] \quad (6)$$

Onde μ e ε são, respectivamente, a permeabilidade e permissividade eletromagnéticas do meio em que o condutor está. Desta forma, para uma LT aérea ideal, a velocidade das ondas viajantes é igual à velocidade da luz no vácuo. No caso de cabos isolados, a velocidade será determinada pelas características eletromagnéticas do isolamento utilizado.

3.3 Impedância Característica

Da mesma maneira que parâmetros distribuídos são necessários para proporcionar a precisão adequada para a modelagem do comportamento do condutor durante transitórios, também a relação entre tensão e corrente em uma linha de transmissão durante este período não é mais dada pelas impedâncias série e shunt totais, mas pela *Impedância Característica* do condutor. Ela é representada pelo símbolo Z_0 , e seu valor para condutores ideais pode ser calculado conforme a equação 7 abaixo.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad (7)$$

Onde L e C são os parâmetros distribuídos da linha de transmissão: a indutância série L, expressada em H/m, e a capacitância shunt C, expressada em F/m.

3.4 Coeficientes de Reflexão e Refração

Conforme descrito anteriormente, durante um transitório, a proporção entre tensão e corrente na linha de transmissão (ou no sistema de cabos) é dada pela Impedância Característica. Assim, toda vez que uma onda viajante encontra um ponto de descontinuidade desta grandeza (isto é, uma mudança na impedância característica, podendo ser uma mudança no tipo do condutor ou um ponto de derivação), alguns ajustes devem ser feitos para manter esta proporcionalidade para os diferentes trechos, assim como a continuidade das grandezas tensão e corrente no ponto de transição.

Desta maneira, toda vez que uma onda viajante encontra um ponto de descontinuidade, duas outras ondas são originadas. A primeira, chamada de *onda refletida*, começa a viajar no sentido oposto à onda incidente, e a segunda,

chamada de *onda refratada*, continua viajando no mesmo sentido, agora percorrendo o trecho do condutor caracterizado pelo novo Z_0 .

Para calcular a amplitude destas duas novas ondas, aplica-se o princípio da superposição ao ponto de descontinuidade. As grandezas tensão e corrente também devem se manter contínuas na junção. Para um melhor entendimento, a figura abaixo representa uma onda incidindo sobre a junção entre dois condutores diferentes.

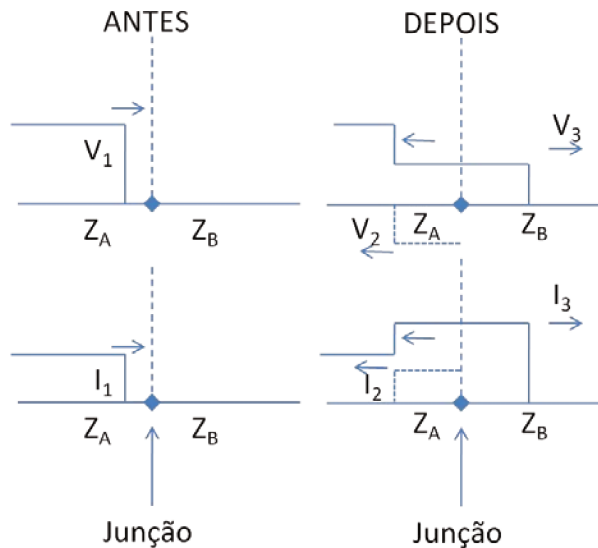


figura 3.6: Reflexão e refração em um ponto de descontinuidade.

No ponto de junção, as seguintes equações devem ser obedecidas:

$$V_1 + V_2 = V_3 \quad (8)$$

$$I_1 - I_2 = I_3 \quad (9)$$

Lembrando que:

$$V_1 = Z_A * I_1 \quad (10)$$

$$V_2 = Z_A * I_2 \quad (11)$$

$$V_3 = Z_B * I_3 \quad (12)$$

A amplitude das ondas refletida e refratada pode ser expressa em função da onda incidente através dos seus coeficientes de reflexão e refração. Alguma manipulação algébrica nas equações anteriores nos leva a:

3. Teoria Envolvida

$$V_2 = \alpha * V_1 = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} * V_1 \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A}, \quad -1 \leq \alpha \leq 1 \quad (14)$$

$$V_3 = \beta * V_1 = \frac{2 * Z_B}{Z_B + Z_A} * V_1 \quad (15)$$

$$\beta = \frac{2 * Z_B}{Z_B + Z_A}, \quad 0 \leq \beta \leq 2 \quad (16)$$

Estas equações se aplicam somente a situações de junção entre dois condutores. Para um caso de derivação (no qual a onda incidente encontra um ponto a partir do qual se conectam mais de um condutor), os mesmos passos devem ser seguidos para calcular os coeficientes de reflexão (α) e refração (β).

3.4.1 Reflexões e Refrações em Terminações de Linha

Outro tipo comum de descontinuidade é a terminação de linha. De acordo com a impedância característica naquele ponto, pode-se obter situações desde um curto-circuito até um circuito aberto. A seguir estão descritas as principais características destes dois extremos.

Curto-Circuito: neste caso, a tensão no ponto de descontinuidade é sempre zero (ponto de curto-circuito). Logo, quando uma onda de tensão incidente atinge este tipo de terminação, a onda refletida tem a mesma magnitude, mas sinal oposto ($\alpha = -1$). Para manter o balanço de energia, a corrente no ponto imediatamente após a reflexão é o dobro da corrente incidente (para a corrente, $\alpha = 1$).

Por fim, como não há condutor além da terminação, o coeficiente de refração é zero ($\beta = 0$).

$$V_1 + V_2 = 0 \quad (17)$$

$$I_1 - I_2 = I_3 = \frac{V_3}{Z_B} = 0 \quad (18)$$

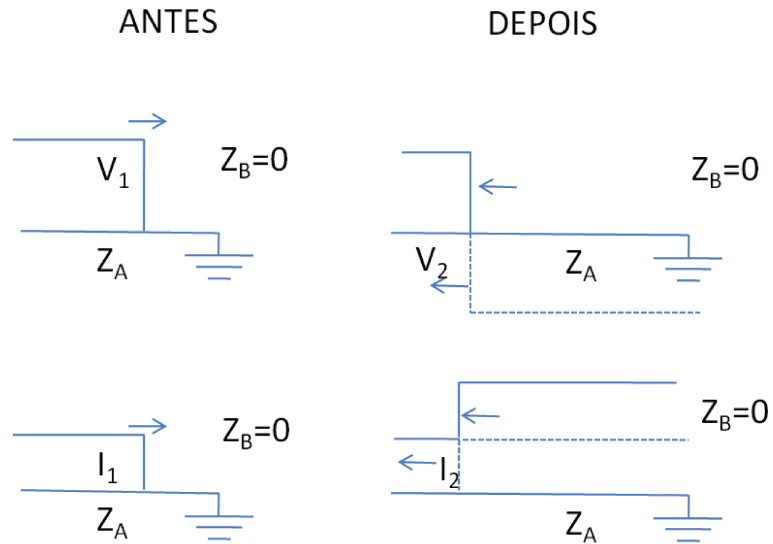


figura 3.7: Reflexão e refração em um curto-circuito.

É importante dizer que este comportamento se aplica a qualquer ponto do circuito no qual haja um controle de tensão (por exemplo, uma fonte de tensão).

Circuito Aberto: como situação oposta ao curto-circuito, neste tipo de terminação a corrente no final da linha é sempre zero. Sendo assim, quando uma onda de corrente incidente atinge o ponto de discontinuidade, a onda refletida tem mesma magnitude e sinal oposto. Consequentemente, o coeficiente de reflexão para a tensão é 1 ($\alpha = 1$).

$$V_1 + V_2 = V \quad (19)$$

$$I_1 - I_2 = 0 \quad (20)$$

3. Teoria Envolvida

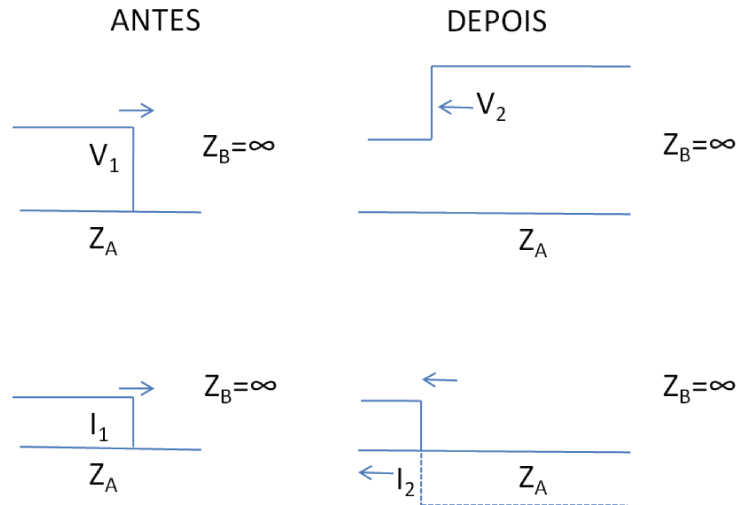


figura 3.8: Reflexão e refração em um circuito aberto.

3.5 Diagramas de Lattice

Antes da utilização da computação digital para estudar o comportamento de um sistema elétrico com múltiplos pontos de reflexão, um diagrama de espaço/tempo foi proposto, chamado de *Diagrama de Lattice*. Estes diagramas foram de grande auxílio no entendimento, por exemplo, da construção da tensão em um certo ponto devido à incidência de múltiplas ondas.

Para explicar o funcionamento deste diagrama de uma maneira prática, considere uma linha única de impedância Z_1 terminando em uma impedância Z . Na outra extremidade da linha existe uma fonte de tensão ideal conectada por meio de um disjuntor. Se o intervalo de tempo sob interesse é somente o de duração do transitório – alguns microsegundos –, mesmo quando a fonte de tensão é senoidal de 50 ou 60 Hz (período da ordem de milisegundos), ela pode ser modelada como uma bateria.

Para estudar o comportamento do sistema após o fechamento do disjuntor é utilizada uma escala de tempo vertical e uma de espaço horizontal. Assim, imediatamente após o disjuntor se fechar, a onda de tensão começa a viajar em direção à terminação da linha. Após o tempo de viagem τ , ela atinge o ponto final e a onda refletida começa a viajar em direção à fonte de tensão, e o ciclo recomeça. Com o diagrama de Lattice é possível ver exatamente o momento no qual a onda viajante atinge um certo ponto (e também onde ela está e o seu sentido em um determinado momento). Pode-se também utilizar uma tabela para controlar a magnitude da onda viajante, conforme abaixo (α_1 refere-se ao coeficiente de reflexão no final da linha e α_2 ao mesmo coeficiente no lado da fonte de tensão).

tabela 3.1: Reflexões dentro de um ramo.

Instante de Tempo	Magnitude da Onda Viajante
$0 \leq t < \tau$	V
$\tau \leq t < 2\tau$	$\alpha_1 V$
$2\tau \leq t < 3\tau$	$\alpha_1 \alpha_2 V$
$3\tau \leq t < 4\tau$	$\alpha_1^2 \alpha_2 V$
$4\tau \leq t < 5\tau$	$\alpha_1^2 \alpha_2^2 V$

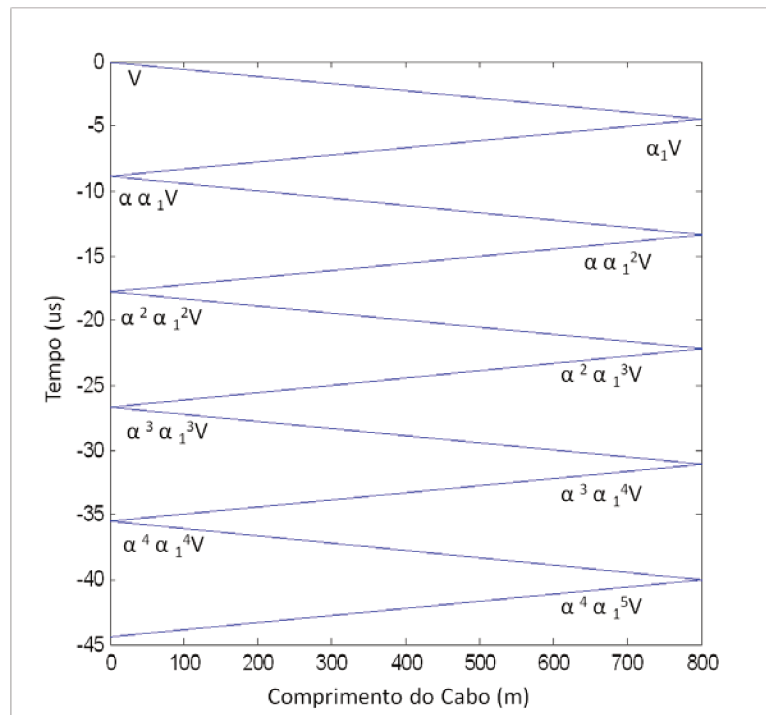


figura 3.9: Diagrama de Lattice para uma onda viajante sendo refletida em um cabo de 800m.

Agora, a tensão em qualquer ponto da linha de transmissão pode ser obtida pela soma de todas as magnitudes das ondas que incidem sobre o ponto em ambas as direções até o instante de interesse.

3. Teoria Envolvida

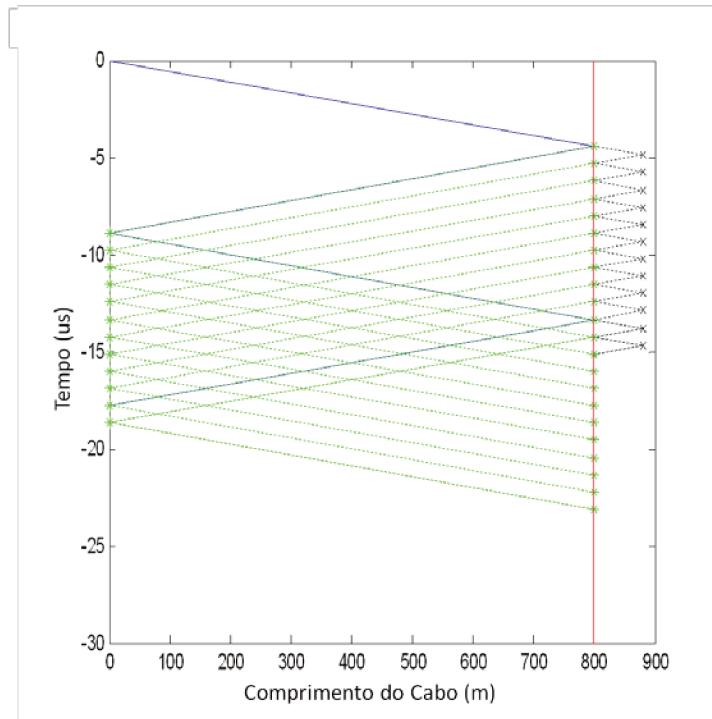


figura 3.10: Diagrama de Lattice mostrando reflexões primárias e secundárias de uma onda viajante em um cabo de 880 m, com ponto de descontinuidade em 800 m.

3.6 Tensão de Restabelecimento Transitória

Imediatamente após a interrupção de uma corrente de curto-circuito, ainda existe energia eletromagnética armazenada nos componentes do circuito (indutâncias série e capacitâncias shunt de linhas e cabos, enrolamentos de transformadores, capacitâncias de escovas, etc), e a tensão nos terminais da carga não vai imediatamente a zero. A *Tensão de Restabelecimento Transitória* (TRT) é a tensão que surge então entre os contatos do disjuntor após uma interrupção de corrente.

A forma e valor de pico da TRT dependem das características dos circuitos conectados em ambos os lados do disjuntor (tipo de aterramento, de carga, configurações dos condutores, etc), e do tipo de falta que foi interrompida. A solução da equação diferencial que determina a TRT, de forma geral, apresenta uma componente em regime e uma componente transitória.

Saber a forma da TRT é muito importante para a especificação do disjuntor, pois a interrupção só será efetiva se o disjuntor puder suportar o seu valor. A TRT é usualmente classificada em 3 tipos principais: oscilatória, exponencial ou triangular. A figura 3.11 mostra três configurações típicas de circuito, e as respectivas TRTs. É possível que exista alguma configuração, não abordada neste texto, que resulte em uma TRT formada pela combinação de mais de uma forma de onda dentre as apresentadas.

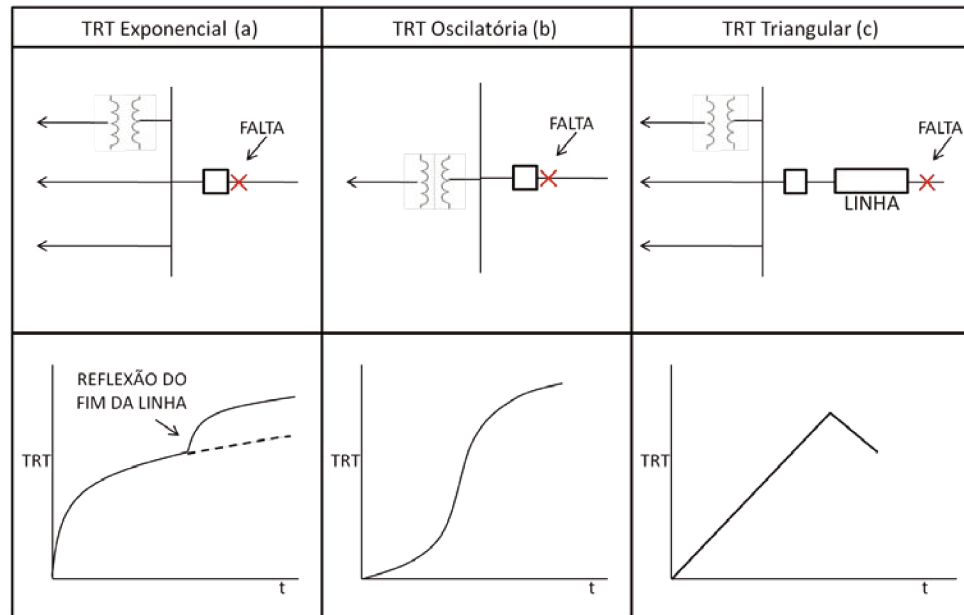


figura 3.11: Formas de onda de Tensões de Restabelecimento Transitórias diferentes [16].

3.7 Impacto em Componentes

Esta seção irá apontar rapidamente o impacto das características dos transitórios descritos no comportamento de alguns componentes.

3.7.1 Reignição e Reacendimento em Disjuntores

Na operação de um disjuntor em um circuito de corrente alternada, existe uma diferença entre os momentos de início de separação dos contatos físicos dos pólos e o real momento de extinção de corrente.

Após o início da abertura do disjuntor (separação dos contatos), a condução de corrente ainda permanece na forma de arco elétrico, que só é extinto no momento da passagem da corrente pelo zero. Considerando que o circuito em questão tenha uma característica bastante indutiva ou capacitiva, e a tensão esteja então defasada da corrente por um ângulo próximo de 90° , existe no momento da extinção do arco uma solicitação de tensão nos terminais do disjuntor que tenta restabelecer a corrente. Se o disjuntor não for capaz de restabelecer as propriedades dielétricas do meio de forma a suportar esta solicitação, o arco elétrico é restabelecido e o disjuntor volta a conduzir. Se este fenômeno ocorre nos primeiros instantes após a extinção de corrente, ele é chamado de *reignição*. Se ele ocorrer após $\frac{1}{4}$ de ciclo, é chamado de *reacendimento*.

Nos casos de ocorrência de reignição ou reacendimento, a real extinção da corrente passará a ocorrer no próximo instante em que seu valor for zero. Neste intervalo, a TRT originada pela primeira interrupção pode contribuir para aumentar a solicitação de tensão no pólo do disjuntor imediatamente após a segunda interrupção, fazendo-

3. Teoria Envolvida

o conduzir novamente, criando agora uma TRT de valor maior. À ocorrência repetitiva de reignições ou reacendimentos deste tipo dá-se o nome de *escalation*, ilustrado na figura 3.12.

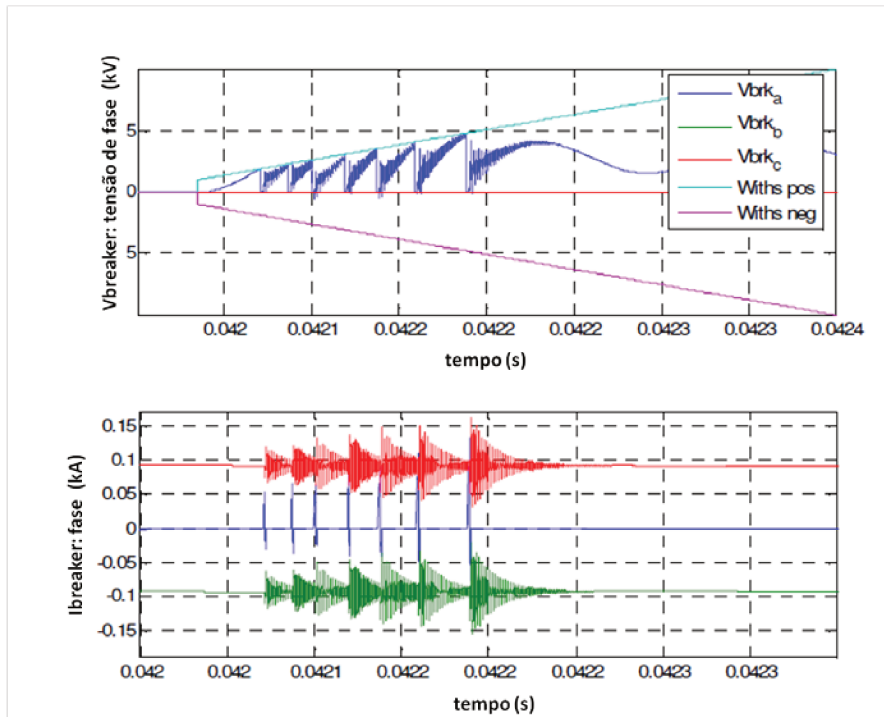


figura 3.12: Escalation devido a interrupção de corrente de curto-circuito [16].

3.7.2 Risco de Falha no Isolamento de Transformadores

A principal diferença entre uma rede coletora (formada por cabos isolados) e uma LT (formada por cabos nus) está no valor da Impedância Característica. Enquanto nas LTs convencionais este valor fica tipicamente entre 300 e 500 Ω , para os cabos isolados ele não passa de 50 Ω . Quanto menor este valor, maior é a derivada em função do tempo (e, portanto, menor é o tempo de subida) das TRTs.

Os transformadores fabricados atualmente são projetados para suportar transitórios de tensão dentro de determinados limites. As normas do IEEE para fabricação de transformadores secos e isolados a óleo [1] e [2] sugerem que os enrolamentos devam suportar variações de tensão com tempo de subida de 1,2 μ s. Entretanto, as TRTs que ocorrem em redes coletoras podem ter tempos de subida mais rápidos do que isso.

Transitórios elétricos têm sido apontados como potenciais causadores de falhas no isolamento de transformadores. Se a frente de onda é muito íngreme, a tensão aplicada entre as espiras quando o transitório percorre o enrolamento do transformador também é bastante elevada. Se isso não for suficiente para romper o isolamento do enrolamento imediatamente, pode aumentar a ocorrência de descargas parciais e diminuir sua vida útil.

4

ABORDAGEM TEÓRICA

4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é investigar, matematicamente e com auxílio computacional, se a ocorrência de múltiplas reflexões dentro da rede coletora (devido aos múltiplos pontos de derivação proporcionados pelas topologias tradicionais de PE Marítimos) somada com a possibilidade de interferência construtiva em certos pontos é suficiente para criar sobretensões maiores que os equipamentos utilizados podem suportar (principalmente isolamento de transformadores). Para isso, a teoria brevemente descrita anteriormente será aplicada às topologias comuns de PEMs estudadas.

A seguinte premissa é válida durante toda a análise: o processo de energização de um PEM é feito sempre a partir da plataforma. Desta forma, de acordo com o diagrama unifilar mostrado na figura 4.1, antes de conectar os geradores, a rede de cabos é energizada a partir da plataforma pelo fechamento dos disjuntores um de cada vez, e só então os geradores são conectados à rede.

O tipo de gerador pode variar de acordo com o fabricante, podendo ser máquinas de indução ou síncronas. No primeiro caso, não há tensão nos terminais do gerador antes da conexão com a rede, tornando impossível um processo de energização diferente do descrito nas premissas. Se o gerador for do tipo síncrono, sua conexão com a rede será feita com o auxílio de equipamentos de cheque de sincronismo, minimizando os efeitos do transitório originado. Mesmo neste caso nenhuma alteração no processo de energização é considerada. Entretanto, durante uma abertura de disjuntor (por exemplo para eliminação de falta), a *tov* se propagará como uma onda viajante originada no topo da torre. Por isso, durante os estudos de coeficientes de reflexão e refração, algumas considerações serão feitas a respeito deste tipo de transitório.

Não está no escopo deste estudo a modelagem do momento de conexão dos geradores com a rede, uma vez que para isso seriam necessários detalhes do protocolo de operação dos PEMs, assim como detalhes técnicos dos geradores (impedâncias, método de mitigação de corrente de partida, velocidade de conexão

4. Abordagem Teórica

no caso de geradores de indução, entre outros), não acessíveis durante a elaboração deste trabalho.

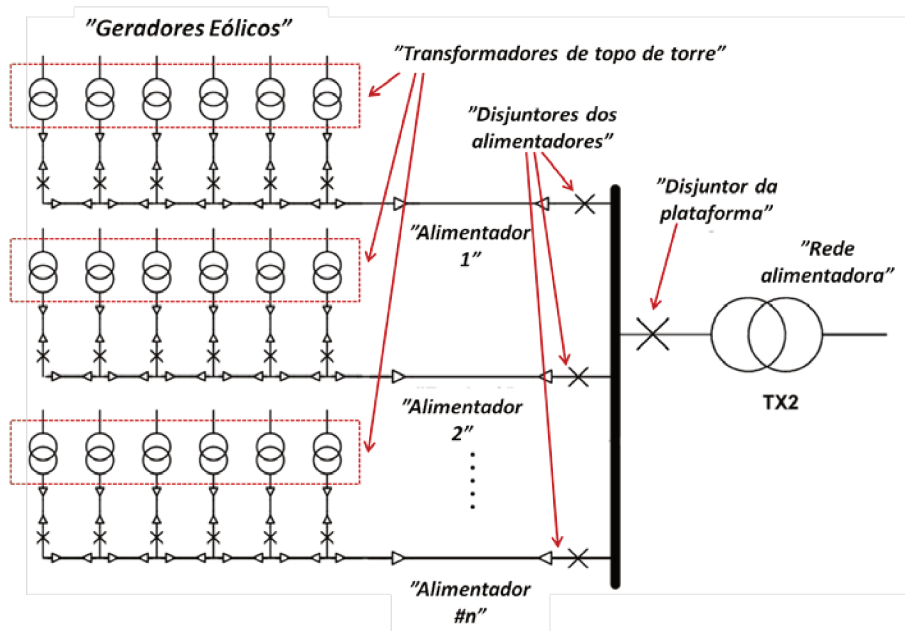


figura 4.1: Diagrama unifilar de um Parque Eólico Marítimo.

Foi considerado um sistema de controle de tensão no secundário do transformador TX2 (do lado da rede coletora). Deste modo, também não está no escopo deste estudo analisar o efeito de transitórios originados na rede de transmissão externa à rede coletora.

O efeito da penetração dos transitórios no enrolamento dos transformadores também não será estudado, uma vez que esta modelagem requer detalhes de fabricação dos transformadores não disponíveis a usuários. Para definir se a sobretensão resultante é perigosa, será utilizado o Nível Básico de Impulso (NBI) sugerido nas normas de fabricação de transformadores [2].

De acordo com a tabela 4.1 abaixo, o limite de 150 kV será considerado para definir se a sobretensão representa ou não algum dano ao isolamento do transformador. Estudos da taxa de subida de sobretensões transitórias em comparação com as normas de fabricação vigentes também não fazem parte do escopo.

tabela 4.1: *Nível Básico de Impulso sugerido pela norma do IEEE [2].*

Tensão de Linha Nominal do Sistema (kV)	Nível Básico da Impulso (NBI) conforme tabela 5 de [2] (kV)
5	30
8,7	45
15	60
18	95
25	110
34,5	150

4.2 Topologias de Parques Eólicos Marítimos Estudadas

A localização física relativa dos geradores em uma Fazenda Eólica depende do estudo de potencial eólico (potência nominal), tecnologia dos geradores (número de geradores para totalizar a potência nominal) e os limites construtivos estabelecidos. Ainda existe pouca tecnologia disponível mundialmente para alocar um grande número de turbinas que podem ter mais de 100m de diâmetro em torres no oceano. As configurações mais comuns foram descritas e analisadas nesta seção. A configuração que usa a rede de cabos em estrela também foi estudada, pois apesar de não ser muito comum, é bastante interessante por representar um aumento de confiabilidade na segurança da rede, e pode se tornar uma tendência para instalações futuras. Todas as configurações estudadas estão listadas na tabela 4.2.

Alturas comuns de torres são 60, 80 e 120 m. Para os casos estudados, a altura da torre também é o diâmetro da turbina instalada no topo (a pá gira sobre metade da altura da torre, e atinge mais uma metade na altura total). A configuração escolhida para os estudos foi de torres de 80 m de altura, com 800 m de distância entre elas.

tabela 4.2: *Configurações dos parques eólicos estudadas.*

CASO_ID	DESCRIÇÃO	FIGURA
F1_W4	1 ALIMENTADOR COM 4 TORRES	4.2
F4_W4	4 ALIMENTADORES COM 4 TORRES CADA	4.3
F1_W6	1 ALIMENTADOR COM 6 TORRES	4.2
F6_W6	6 ALIMENTADORES COM 6 TORRES CADA	4.3
F1_W9	1 ALIMENTADOR COM 9 TORRES	4.2
F9_W9	9 ALIMENTADORES COM 9 TORRES CADA	4.3
STAR_7	7 TORRES, CABOS CONECTADOS EM REDE ESTRELA	4.4
STAR_9	9 TORRES, CABOS CONECTADOS EM REDE ESTRELA	-

4. Abordagem Teórica

4.2.1 Configuração da Torre

Para todas as simetrias estudadas, a configuração da torre consiste em:

- Um gerador de indução de 2 MVA, 0,69 kV no topo;
- Um transformador do tipo seco, 0,69/36 kV Y-Delta, também no topo;
- Um disjuntor na base da torre, conectando todo o circuito ao alimentador correspondente;
- Três cabos monofásicos de 80 metros de comprimento, dispostos em trifólio, conectando os terminais do transformador ao disjuntor da base;

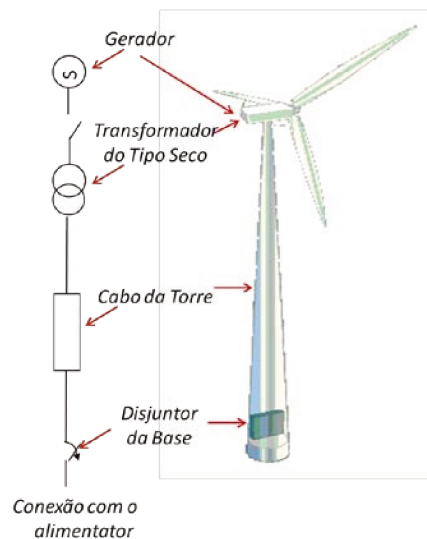


figura 4.2: Configuração de torre considerada.

4.2.2 Alimentador Simples com até 9 Torres

A configuração mais simples consiste em um único alimentador com até 9 torres. O alimentador conecta todas as torres à plataforma e tem secção constante (cabo sem emendas). As distâncias entre 2 torres vizinhas é de 800 m, 10 vezes a altura das mesmas. A distância entre a primeira torre e a plataforma foi assumida arbitrariamente como sendo 100 m.

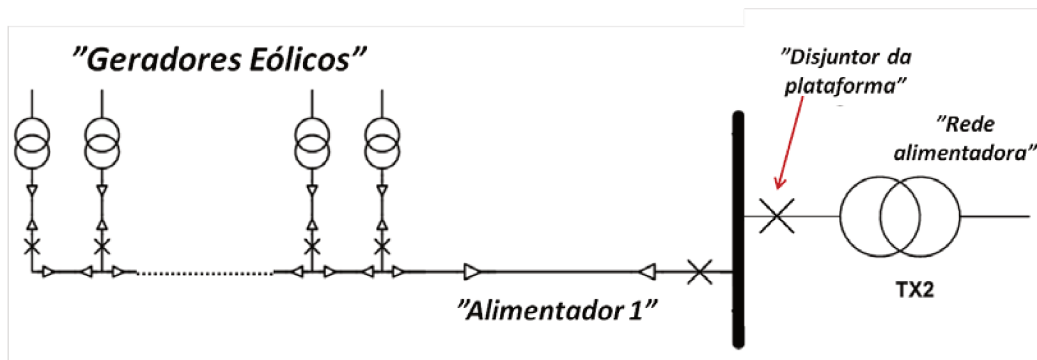


figura 4.3: Diagrama unifilar da configuração de alimentador simples.

4.2.3 Configuração com Múltiplos Alimentadores ($n \times n$)

Esta configuração é formada por vários alimentadores idênticos (como os descritos na configuração anterior) conectados em paralelo. O número de torres por alimentador é igual ao número de alimentadores. Foi estabelecido um limite de estudo de 9 alimentadores (com 9 torres cada um).

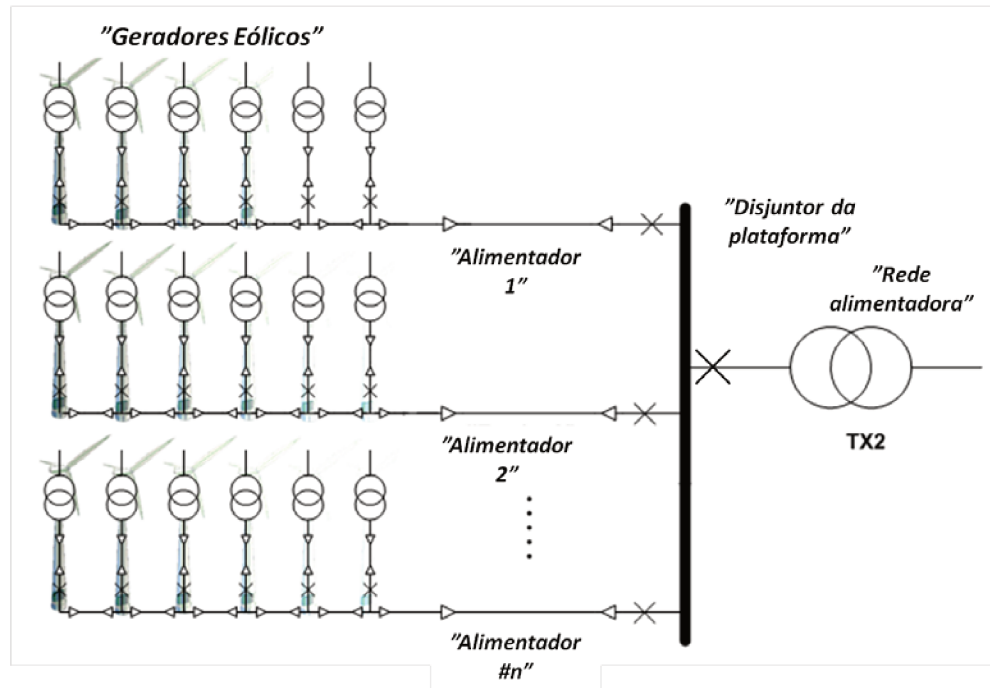


figura 4.4: Diagrama unifilar da configuração de múltiplos alimentadores ($n \times n$).

4.2.4 Simetrias em Estrela

A idéia consiste em alocar as torres como se estivessem cada uma sobre um dos vértices de um hexágono, podendo existir uma torre no centro do polígono ou não. Cada gerador é ligado pelo seu alimentador exclusivo até o ponto central (rede de cabos em estrela), de onde um cabo de maior bitola conecta o sistema à rede de distribuição através de um transformador na plataforma próxima à costa.

Esta configuração representa um aumento de confiabilidade em relação às configurações anteriores. Neste caso, se por alguma eventualidade um dos alimentadores for perdido, é necessário desconectar somente um gerador, enquanto que na configuração anterior, quando se perde um alimentador, é necessário desconectar todos os geradores a partir do ponto de falha até o final da linha. Por outro lado, o nó central é um claro candidato a sobretensões devido a interferência construtiva, uma vez que é o ponto de conexão de todos os ramos da rede (sujeito a incidências de todos os alimentadores), e também o ponto central da simetria do circuito.

4. Abordagem Teórica

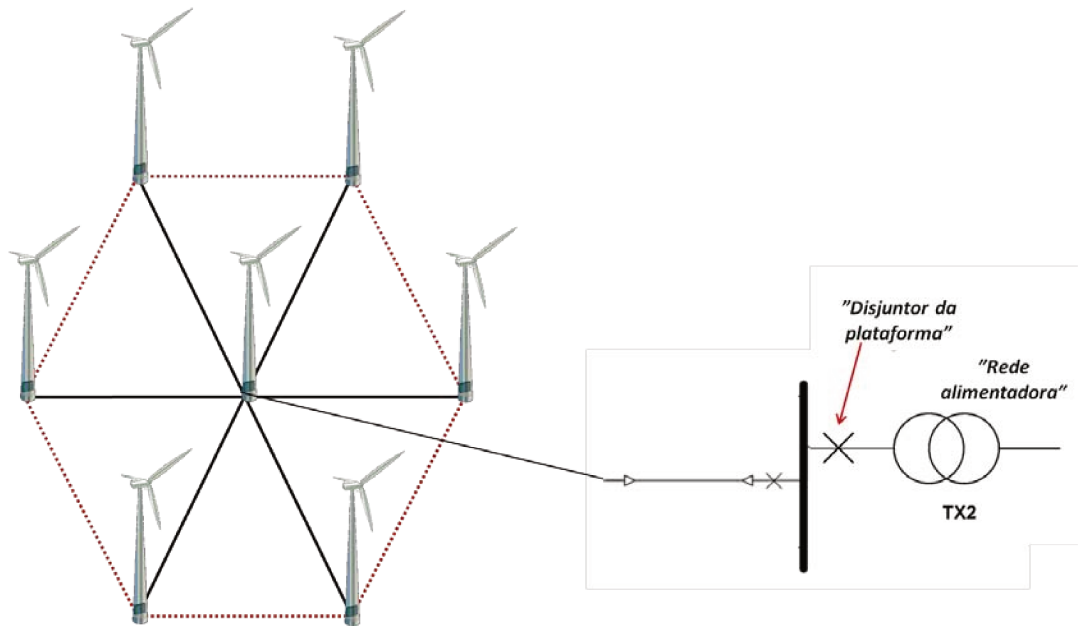


figura 4.5: Diagrama unifilar da simetria em estrela (caso com 7 torres).

Uma possível variação desta configuração agruparia 9 torres. Neste caso, elas estariam dispostas como nos vértices de um quadrado, no ponto central dos seus lados e no centro do polígono.

4.3 Formulação Matemática

Nas próximas subseções, a teoria já descrita será aplicada às configurações específicas para obtenção do modelo do problema.

4.3.1 Considerações Numéricas Sobre os Coeficientes de Reflexão e Refração

De acordo com as figuras 4.3 a 4.5, em cada nó da rede coletora (isto é, em toda base de torre) 3 cabos são conectados: o cabo da torre e o cabo do alimentador para duas direções. Logo, para cada torre existem 3 pares de coeficientes de reflexão e refração, cada um referente a uma das possíveis direções de incidência de onda (transitório).

Como já demonstrado anteriormente, os coeficientes de reflexão e refração dependem exclusivamente da relação entre as impedâncias características dos condutores que fazem parte da derivação. Se existem somente 2 cabos envolvidos, eles são função da razão entre as duas impedâncias, e se existem 3 ou mais cabos, a relação é entre a impedância característica do primeiro cabo (aquele que conduz a onda incidente) e a associação em paralelo de todos os outros cabos envolvidos.

A figura 4.6 mostra o comportamento do coeficiente de reflexão para tensão (α) em função da razão entre as impedâncias características.

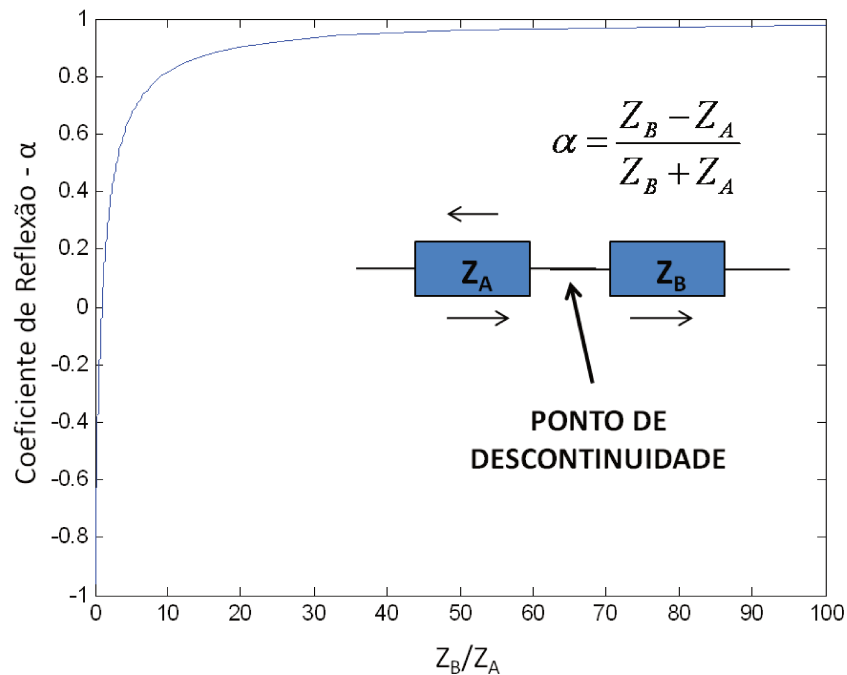


figura 4.6: Coeficiente de reflexão para tensão (α) em função da razão entre as impedâncias características.

Como o valor absoluto de α é sempre menor ou igual a 1, para uma onda de tensão viajante, cada reflexão implica em uma atenuação no seu valor de pico. Logo, apesar da consideração das múltiplas reflexões ser importante no estudo da composição da forma de onda de uma sobretensão de origem transitória, também é importante considerar que após um número finito de reflexões, o transitório desaparecerá.

Tomando como referência os dados do guia do usuário dos cabos XLPE da ABB [13], alguns valores típicos de secção de cabos (e suas características técnicas) podem ser estabelecidos de acordo com os seguinte dados de entrada:

tabela 4.3: Corrente nominal no cabo da torre.

POTÊNCIA NOMINAL DO GERADOR	TENSÃO NOMINAL	CORRENTE NOMINAL
1 MVA	36 kV	16.03 A
2 MVA	36 kV	32.07 A
5 MVA	36 kV	80.18 A

4. Abordagem Teórica

tabela 4.4: Limite de condução de corrente para cabos de cobre singelos, em Ampères.
Dados Referentes ao ABB XLPE User's Guide [13], Tabela 3.

Tensão Nominal de 10-70 kV, condutores de cobre				
Secção do Condutor	Cabos Enterrados			
	Formação em Trifólio			
	Transpostos		Não transpostos	
mm²	65°C	90°C	65°C	90°C
95	270	320	270	325
120	305	365	305	365
150	340	410	340	410
185	385	465	385	460
240	445	535	440	535
300	505	605	495	600
400	570	690	555	675
500	645	780	625	755
630	725	875	690	845
800	800	975	760	930
1000	870	1065	815	1005

tabela 4.5: Limite de condução de corrente para cabos de cobre tripolares, em Ampères.
Dados referentes ao ABB XLPE User's Guide [13], Tabela 1.

Tensão Nominal até 220 kV, condutores de cobre		
Secção do Condutor	Cabos Enterrados	
	65°C	90°C
mm²		
35	145	175
50	175	210
70	210	250

tabela 4.6: Dados construtivos dos cabos XLPE da ABB tensão nominal até 45 kV, referentes ao ABB XLPE User's Guide [13], Tabela 26.

Secção do Condutor	Diâmetro do condutor	Espessura da Isolação	Diâmetro Sobre a Isolação	Secção da Blindagem	Diâmetro Externo do Cabo	Impedância Característica
mm ²	mm	mm	mm	mm ²	mm	Ω
95	11,2	8	28,8	25	37	33,3
120	12,6	8	30,2	25	39	30,3
150	14,2	8	31,8	35	41	27,5
185	15,8	8	33,4	35	42	25,8
240	18,1	8	35,7	35	45	23,1
300	20,4	8	38	35	48	21,2
400	23,2	8	40,8	35	51	18,8
500	29,8	8	44,4	35	54	16,9
630	33,7	8	48	35	58	15,3

O cabo de 50 mm² monofásico só existe para níveis de tensão abaixo de 30 kV. Para estabelecer a impedância característica do cabo desta bitola em uma configuração de tensão mais elevada, seu modelo foi construído de acordo com as informações construtivas disponíveis em [13], a isolação foi ajustada conforme os cabos de 45 kV e sua impedância característica calculada por meio de simulação computacional, conforme mostrado no Capítulo 5. Maiores detalhes sobre a modelagem dos cabos no software PSCAD serão fornecidos mais à frente, mas a partir de agora o valor de 40 Ω será assumido.

Uma vez fixada a secção de 50 mm² para o cabo da torre, e um valor entre 50 e 185 mm² para o cabo do alimentador (dependendo do número de torres), foram calculados os coeficientes de reflexão (α) na base da torre nos casos limite, para determinar a sua faixa de valor. Os resultados estão mostrados na tabela abaixo.

4. Abordagem Teórica

tabela 4.7: Valores práticos para o coeficiente de reflexão.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	GERADOR		ALIMENTADOR	
ESQUEMÁTICO	<p>GERADOR</p> <p>ONDA INCIDENTE (V_1)</p> <p>ONDA REFLETIDA ($\alpha \cdot V_1$)</p> <p>CABO DA TORRE</p> <p>CABO DO ALIMENTADOR</p> <p>NÓ DE INTERESSE (α)</p> <p>$Z_A = Z_{0_CABO DA TORRE}$</p> <p>$Z_B = 0,5 \cdot Z_{0_CABO DO ALIMENTADOR}$</p>		<p>GERADOR</p> <p>ONDA INCIDENTE (V_1)</p> <p>ONDA REFLETIDA ($\alpha \cdot V_1$)</p> <p>CABO DA TORRE</p> <p>CABO DO ALIMENTADOR</p> <p>NÓ DE INTERESSE (α)</p> <p>$Z_A = Z_{0_CABO DO ALIMENTADOR}$</p> <p>$Z_B = (Z_{0_CABO DO ALIMENTADOR} \cdot Z_{0_CABO DA TORRE}) / (Z_{0_CABO DO ALIMENTADOR} + Z_{0_CABO DA TORRE})$</p>	
BITOLA DO CABO DO ALIMENTADOR	50 mm ²	185 mm ²	50 mm ²	185 mm ²
BITOLA DO CABO DA TORRE	50 mm ²	50 mm ²	50 mm ²	50 mm ²
ZA	40 Ω	40 Ω	40 Ω	25,8 Ω
ZB	20 Ω	12,9 Ω	20 Ω	15,72 Ω
α	-0,333	-0,512	-0,333	-0,244

Se, por exemplo, for estabelecido arbitrariamente que ao atingir 25% da sua amplitude inicial o transitório de tensão não é mais significativo, a partir do coeficiente de reflexão envolvido é possível determinar o número de reflexões após a qual o transitório em questão não deve mais ser considerado na composição da sobretensão. Assim, pode ser visto pela tabela 4.8 que após no máximo 4 reflexões a maioria dos transitórios originados dentro da rede coletora não serão mais motivo de preocupação.

tabela 4.8: Atenuação de um transitório por múltiplas reflexões.

COEFICIENTE DE REFLEXÃO	1ª REFLEXÃO	2ª REFLEXÃO	3ª REFLEXÃO	4ª REFLEXÃO	5ª REFLEXÃO
0.75	0.75 p.u.	0.56 p.u.	0.42 p.u.	0.31 p.u.	0.24 p.u.
0.65	0.65 p.u.	0.42 p.u.	0.27 p.u.	0.18 p.u.	DESPREZÍVEL
0.50	0.50 p.u.	0.25 p.u.	DESPREZÍVEL	DESPREZÍVEL	DESPREZÍVEL
0.35	0.35 p.u.	0.12 p.u.	DESPREZÍVEL	DESPREZÍVEL	DESPREZÍVEL

Sobre o coeficiente de refração, uma simples análise algébrica nos mostra que (ver limites para valores numéricos de β na figura 4.7):

$$\beta = \frac{2 \cdot Z_B}{Z_B + Z_A} \quad 0 \leq \beta \leq 2 \quad (21)$$

$$\beta > 1 \Rightarrow Z_B > Z_A \quad (22)$$

Isso significa que, se a onda de tensão viajante encontrar uma impedância característica maior que a inicial ($Z_B > Z_A$), a magnitude do transitório de tensão aumenta ($\beta > 1$). Nestes casos, o fenômeno da refração age como um amplificador para as ondas de tensão viajantes. A figura 4.7 mostra o comportamento do coeficiente de refração (β) em função de Z_B/Z_A .

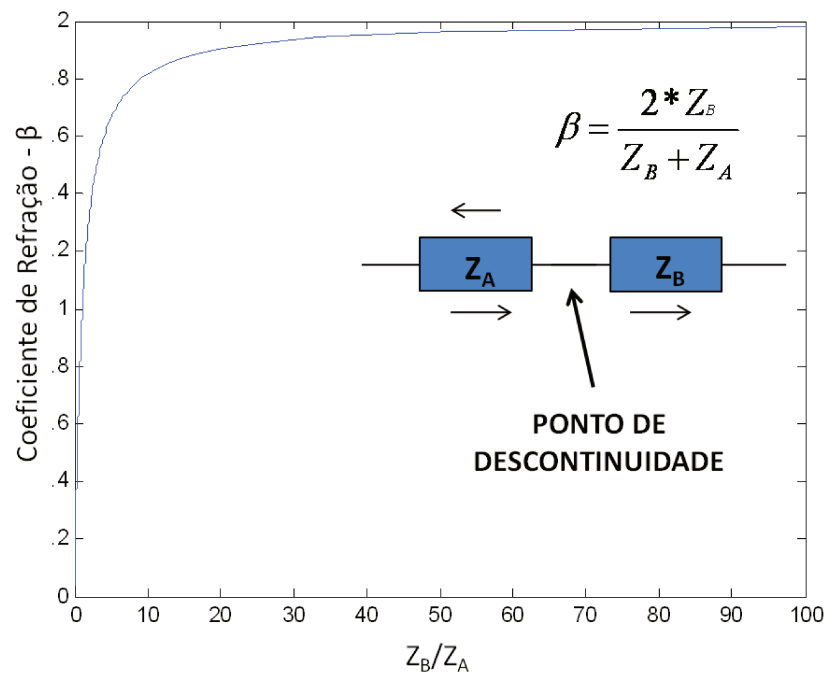


figura 4.7: Coeficiente de refração (β) x Z_B/Z_A .

Logo, fica claro que, para a amplificação decorrente da refração ocorrer, o transitório deve ser originado em um condutor e então ser refratado para um segundo condutor (ou associação de condutores) cuja impedância característica tenha um valor maior ($Z_B > Z_A$). Porém, nos casos de derivação (ponto a partir do qual são conectados mais de um condutor), a associação em paralelo das impedâncias características resulta em um valor de Z_B sempre menor que a menor

4. Abordagem Teórica

impedância envolvida, tornando esta amplificação muito improvável. Por exemplo, um transitório vindo do topo de uma torre sempre irá encontrar uma impedância menor quando atingir a base, pois além do cabo do alimentador ser de uma secção maior ou igual à secção do cabo da torre, a associação em paralelo das suas impedâncias características faz seu valor equivalente cair pela metade.

Ainda, o Nível Básico da Impulso (NBI) considerado em testes de suportabilidade a surtos de tensão nos transformadores, conforme sugerido pelo IEEE em [2] (ver tabela 4.1), é pelo menos 4 vezes a tensão nominal de linha do sistema. Sendo assim, como o coeficiente de refração β nunca ultrapassa o valor de 2 (ver figura 4.7), fica claro que uma única refração sozinha não é suficiente para criar uma sobretensão perigosa para os transformadores durante o processo de energização.

4.3.2 Construção da Forma de Onda

Partindo do princípio da superposição juntamente com a idéia de múltiplas reflexões é possível derivar uma equação para representar a forma de onda resultante de um transitório de tensão sendo refletido repetidamente dentro de um ramo genérico.

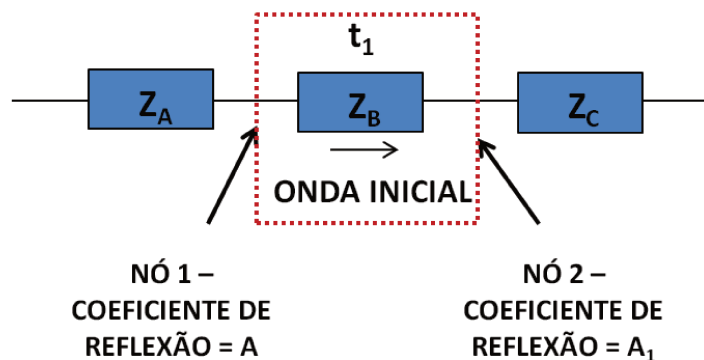


figura 4.8: Ramo genérico.

Começamos de um cabo genérico, de impedância característica Z_B , conectado em ambas as extremidades a dois outros cabos diferentes, de impedância Z_A e Z_C . Para cada nó existe um coeficiente de reflexão, chamados de A e A_1 , conforme ilustrado na figura 4.8. Por fim, define-se t_1 como o tempo necessário para a onda viajante ir do nó1 ao nó2. Uma onda de tensão de amplitude 1 p.u. começa a viajar a partir do nó1 em direção ao nó2 no instante $t=0$. A construção da forma de onda da tensão nas duas extremidades se dá conforme a tabela:

tabela 4.9: Construção da tensão.

TEMPO	TENSÃO NO NÓ 1	TENSÃO NO NÓ 2	ONDA VIAJANTE	
			magnitude	direção
$0 < t < t_1$	1	0	1	→
$t_1 < t < 2t_1$	1	$1+A_1$	A_1	←
$2t_1 < t < 3t_1$	$1+A_1(1+A)$	$1+A_1$	AA_1	→
$3t_1 < t < 4t_1$	$1+A_1(1+A)$	$(1+A_1)(1+A \cdot A_1)$	AA_1^2	←
$4t_1 < t < 5t_1$	$1+A_1(1+A)(1+A \cdot A_1)$	$(1+A_1)(1+A \cdot A_1)$	$A^2A_1^2$	→
$5t_1 < t < 6t_1$	$1+A_1(1+A)(1+A \cdot A_1)$	$(1+A_1)(1+A \cdot A_1 + A^2 \cdot A_1^2)$	$A^2A_1^3$	←
$6t_1 < t < 7t_1$	$1+A_1(1+A)(1+A \cdot A_1 + A^2 \cdot A_1^2)$	$(1+A_1)(1+A \cdot A_1 + A^2 \cdot A_1^2)$	$A^3A_1^3$	→

A tensão no nó1, a qualquer instante, pode ser descrita pela série:

$$V_1(n) = \begin{cases} 1, & \text{se } n = 0 \\ 1 + A_1 \cdot (1 + A), & \text{se } n = 1 \\ 1 + A_1 \cdot (1 + A) \cdot \left[1 + \sum_{K=2}^n (A \cdot A_1)^{K-1} \right], & \text{se } n \geq 2 \end{cases} \quad (23)$$

sendo $2 \cdot n \cdot t_1 < t < (2 \cdot n + 1) \cdot t_1$

$n = \text{número de reflexões ocorridas } (n \in N)$

Seguindo os mesmos passos para a tensão no nó2, temos:

$$V_2(n) = \begin{cases} 0, & \text{se } n = 0 \\ (1 + A_1), & \text{se } n = 1 \\ (1 + A_1) \cdot \left[1 + \sum_{K=2}^n (A \cdot A_1)^{K-1} \right], & \text{se } n \geq 2 \end{cases} \quad (24)$$

sendo $(2 \cdot n - 1) \cdot t_1 < t < (2 \cdot n + 1) \cdot t_1$

$n = \text{número de reflexões ocorridas } (n \in N)$

4. Abordagem Teórica

4.3.2.1 Ramo Terminando em um Circuito Aberto

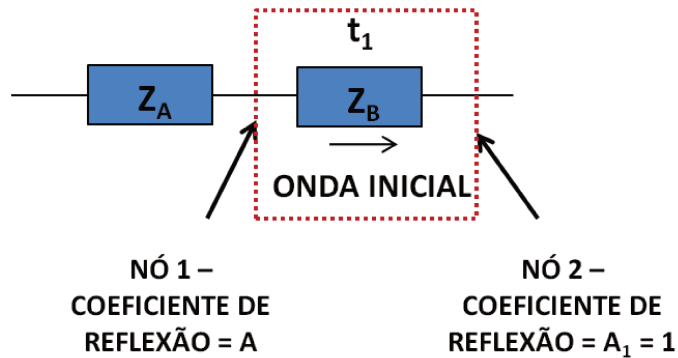


figura 4.9: Circuito aberto.

Nesta situação o coeficiente de reflexão para tensão no nó2 (circuito aberto) é 1. A construção da forma de onda segue a tabela abaixo:

tabela 4.10: Construção da tensão em um circuito aberto.

TEMPO	TENSÃO NO NÓ 1	TENSÃO NO NÓ 2	ONDA VIAJANTE	
			magnitude	direção
$0 < t < t_1$	1	0	1	→
$t_1 < t < 2t_1$	1	2	1	←
$2t_1 < t < 3t_1$	$1 + (1+A)$	2	A	→
$3t_1 < t < 4t_1$	$1 + (1+A)$	$2(1+A)$	A	←
$4t_1 < t < 5t_1$	$1 + (1+A)(1+A)$	$2(1+A)$	A^2	→
$5t_1 < t < 6t_1$	$1 + (1+A)(1+A)$	$2(1+A+A^2)$	A^2	←
$6t_1 < t < 7t_1$	$1 + (1+A)(1+A+A^2)$	$2(1+A+A^2)$	A^3	→

A tensão nos nós 1 e 2 são descritas pelas séries:

$$V_1(n) = \begin{cases} 1, & \text{se } n = 0 \\ 1 + (1 + A), & \text{se } n = 1 \\ 1 + (1 + A) \cdot \left[1 + \sum_{K=2}^n (A)^{K-1} \right], & \text{se } n \geq 2 \end{cases} \quad (25)$$

sendo $2 \cdot n \cdot t_1 < t < (2 \cdot n + 1) \cdot t_1$

$n = \text{número de reflexões ocorridas } (n \in N)$

$$V_2(n) = \begin{cases} 0, & \text{se } n = 0 \\ 2, & \text{se } n = 1 \\ 2 \cdot \left[1 + \sum_{K=2}^n (A)^{K-1} \right], & \text{se } n \geq 2 \end{cases} \quad (26)$$

sendo $(2 \cdot n - 1) \cdot t_1 < t < (2 \cdot n + 1) \cdot t_1$

$n = \text{número de reflexões ocorridas } (n \in N)$

4.3.2.2 Controle de Tensão em um dos Lados do Ramo

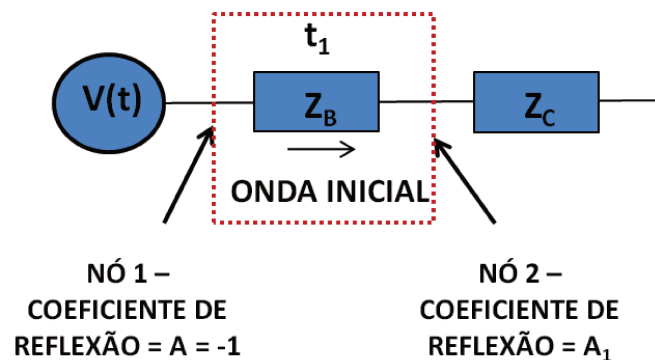


figura 4.10: Controle de tensão em uma das extremidades.

4. Abordagem Teórica

Nesta situação o valor do coeficiente de reflexão no nó1 é -1. A construção da forma de onda segue a tabela abaixo:

tabela 4.11: Construção da tensão com controle de tensão no nó1.

TEMPO	TENSÃO NO NÓ 1	TENSÃO NO NÓ 2	ONDA VIAJANTE	
			magnitude	direção
$0 < t < t_1$	1	0	1	→
$t_1 < t < 2t_1$	1	$1+A_1$	A_1	←
$2t_1 < t < 3t_1$	1	$1+A_1$	$-A_1$	→
$3t_1 < t < 4t_1$	1	$(1+A_1)(1-A_1)$	$-A_1^2$	←
$4t_1 < t < 5t_1$	1	$(1+A_1)(1-A_1)$	A_1^2	→
$5t_1 < t < 6t_1$	1	$(1+A_1)(1-A_1+A_1^2)$	A_1^3	←
$6t_1 < t < 7t_1$	1	$(1+A_1)(1-A_1+A_1^2)$	$-A_1^3$	→

A tensão no nó 1 permanece em 1 p.u. durante todo o tempo devido ao controle de tensão neste ponto, enquanto para o nó2 ela é descrita pela série:

$$V_2(n) = \begin{cases} 0, & \text{se } n = 0 \\ (1 + A_1), & \text{se } n = 1 \\ (1 + A_1) \cdot \left[1 + \sum_{K=2}^n (-A_1)^{K-1} \right], & \text{se } n \geq 2 \end{cases} \quad (27)$$

sendo $(2 \cdot n - 1) \cdot t_1 < t < (2 \cdot n + 1) \cdot t_1$

$n = \text{número de reflexões ocorridas } (n \in N)$

4.3.3 Resultados Gráficos

Com o objetivo de facilitar o entendimento da construção da forma de onda da tensão, foi desenvolvida uma rotina no software Matlab para plotar as primeiras incidências de reflexões em um determinado nó a partir das equações 24 a 28.

O circuito considerado consiste de um alimentador com 2 geradores, e a construção da tensão é observada na base da primeira torre. Todos os cabos são idênticos (50 mm²), fazendo que o coeficiente de reflexão no nó sob observação seja -1/3 para todas as possíveis direções de incidência.

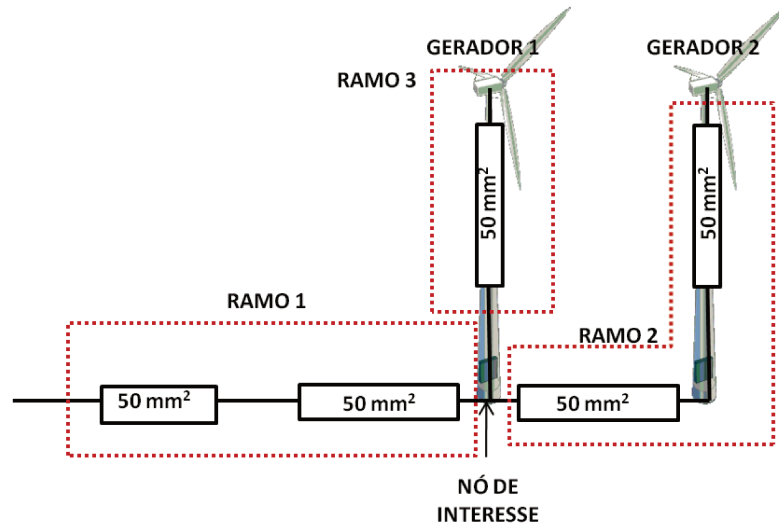


figura 4.11: Circuito analisado.

Os comprimentos de cabos considerados foram: 100m para o cabo da plataforma, 800m para os cabos de interconexão e 80m para os cabos das torres. A velocidade de propagação da onda foi assumida como 180m/ μ s. Os próximos gráficos mostram a construção da forma de onda:

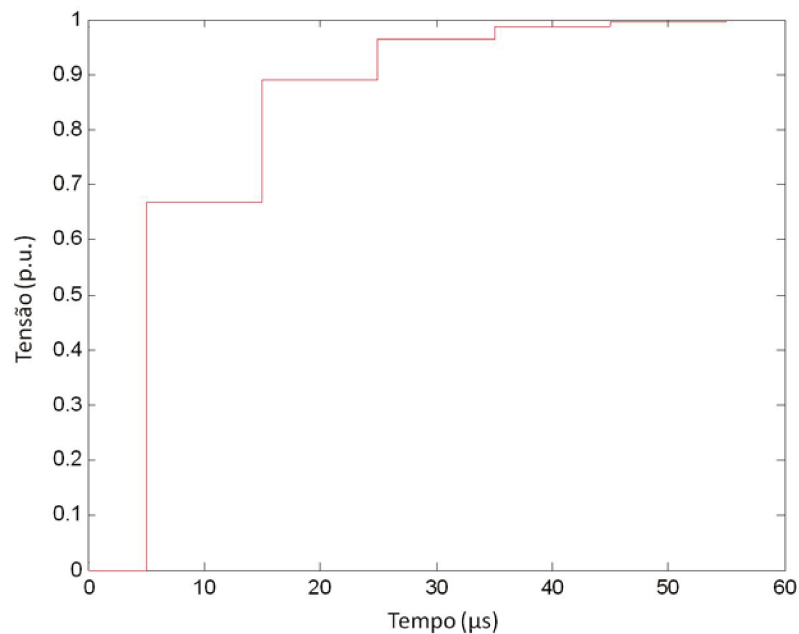


figura 4.12: Onda viajante de 1 p.u. de tensão sendo refletida no Ramo 1.

4. Abordagem Teórica

Após $5 \mu\text{s}$, a onda viajante de 1 p.u. atinge o nó central. A tensão imediatamente após este incidente é igual à onda incidente multiplicada pelo coeficiente de refração ($2/3$ p.u.). Agora, a onda refletida, de amplitude $-1/3$ p.u. viaja de volta e é refletida nos terminais da fonte de tensão, onde troca de sinal (coeficiente de reflexão = -1), e começa novamente a viagem em direção ao nó central. Quando ela o atinge pela segunda vez, a tensão adicionada agora tem o valor da amplitude da onda incidente ($1/3$ p.u.) multiplicada pelo coeficiente de refração ($2/3$). Após 4 ciclos semelhantes a este, o transitório praticamente desapareceu e a tensão assume seu valor estacionário.

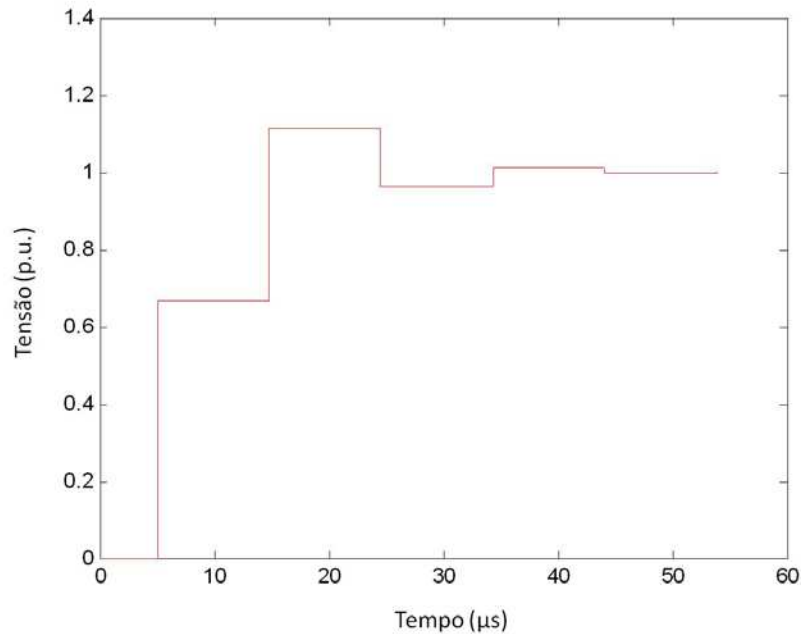


figura 4.13: Onda viajante sendo refletida no Ramo 2.

A figura 4.13 mostra a onda sendo refletida no Ramo 2. A principal diferença em relação à figura anterior deve-se ao fato de que, neste ramo, no topo da torre, os terminais do transformador em vazio comportam-se como um circuito aberto (coeficiente de reflexão = 1). Apesar de ser difícil de perceber nesta escala, o tempo de viagem neste ramo (comprimento 880m) é ligeiramente menor que no Ramo 1 (comprimento 900m).

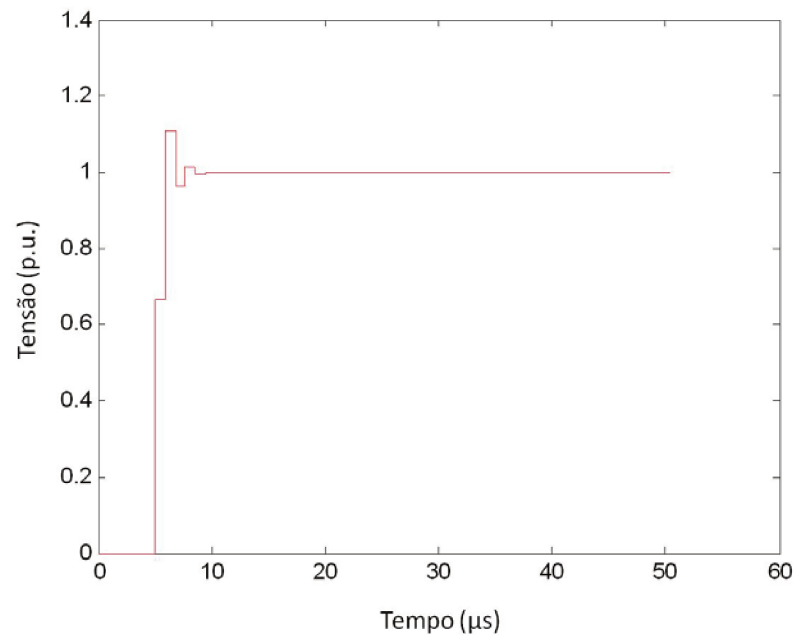


figura 4.14: Onda viajante sendo refletida no Ramo 3.

A figura 4.14 mostra as reflexões no Ramo 3. A dinâmica das reflexões neste ramo é idêntica à do Ramo 2, com a diferença que o tempo de reflexão neste caso é muito menor (comprimento do cabo de 80m).

Finalmente, as contribuições em cada ramo são somadas, e o resultado está mostrado nas figuras 4.15 e 4.16 a seguir:

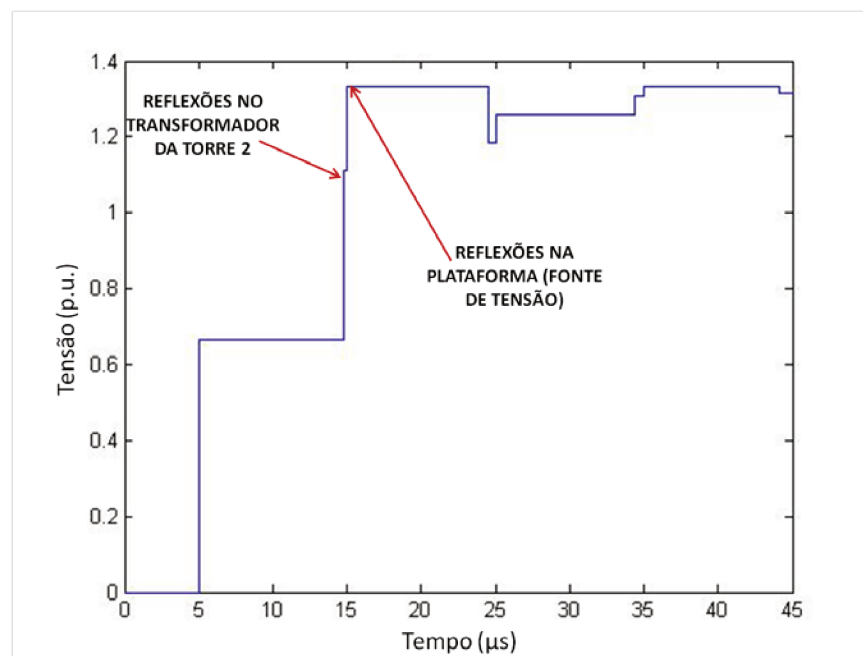


figura 4.15: Soma das reflexões nos ramos 1 e 2.

4. Abordagem Teórica

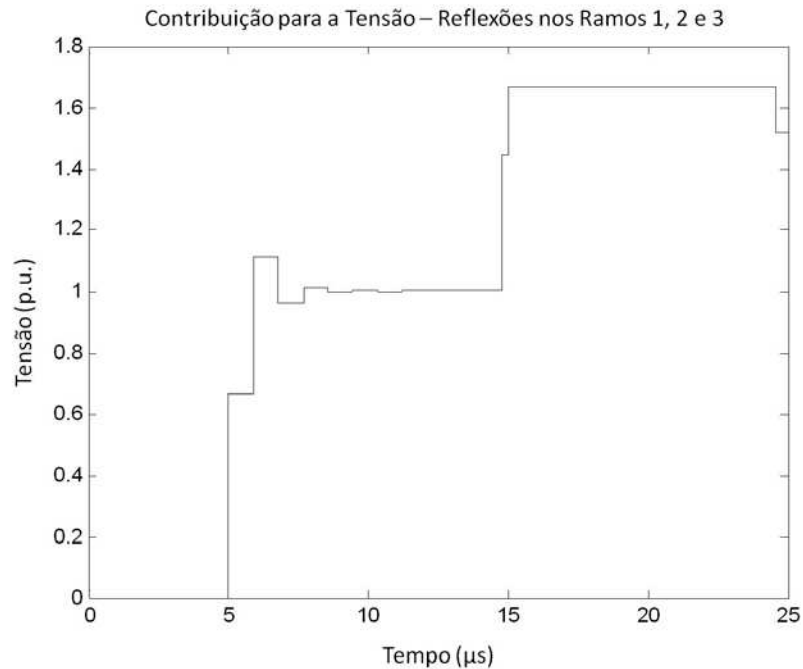


figura 4.16: Soma das reflexões nos ramos 1, 2 e 3.

Neste ponto deve ser citado que estes gráficos mostram apenas as contribuições das primeiras reflexões nos ramos da rede. Em um caso real, cada vez que o transitório de tensão vindo do ramo 1, por exemplo, atinge o nó central, é originada, além da onda refletida, duas outras refratadas para os dois outros ramos, que são refletidas repetidamente até que suas amplitudes se tornem desprezíveis.

4.4 Propagação de Transitórios na Rede Coletora

Esta seção descreve a maneira pela qual um transitório de tensão, originado em um dos diversos pontos da rede coletora (em um dos transformadores de topo de torre ou em um disjuntor na base de uma torre, por exemplo) se propaga através dos cabos devido aos fenômenos de reflexão e refração. O objetivo é descobrir quão longe estas ondas viajantes podem ir, e se o resultado das repetitivas reflexões nos pontos de derivação e terminações de linha podem ser uma sobretensão que represente algum risco aos transformadores instalados.

O efeito resultante das refrações consecutivas equivale a multiplicar os coeficientes de refração envolvidos desde o ponto de origem do transitório até o ponto de interesse (equação 28). Desta forma, se um transitório tem início no 4º gerador de um alimentador, quando ele atinge a plataforma sua amplitude terá sido multiplicada 4 vezes pelo coeficiente de refração da base da torre (desprezando-se as perdas e distorção do cabo). Sendo assim, se estes coeficientes de refração β envolvidos forem todos menores que 1, a atenuação pode ser considerável.

$$B_{equivalente} = \prod_{nó_original}^{nó_interesse} B \quad (28)$$

4.4.1 Premissas

Serão estudados principalmente os transitórios gerados no momento da energização da rede coletora. O modo mais comum de se colocar um Parque Eólico Marítimo em funcionamento é primeiro energizar os alimentadores por meio do disjuntor da plataforma, e em seguida pelos disjuntores dos alimentadores, com os disjuntores das bases das torres fechados, porém os geradores desconectados. Após o período de transitórios (alguns μ s), com terminais dos transformadores estando agora energizados, os geradores são conectados um a um.

Apesar de não serem caracterizados pelo momento de energização, será estudada também a propagação de transitórios iniciados no topo das torres (terminais de média tensão dos transformadores).

Para gerar as situações mais conservativas, no momento de energização os disjuntores das bases das torres serão considerados fechados, isto é, todos os cabos da rede estarão conectados, permitindo o maior número possível de pontos de reflexão. O disjuntor da plataforma será fechado no momento de pico de tensão em uma das fases.

Para efeitos de análise transitórias, os terminais de um transformador em vazio se comportam como um circuito aberto, ou seja, o coeficiente de reflexão para tensão é igual a 1.

A análise proposta tem por objetivo estudar os efeitos das reflexões e refrações na construção da sobretensão, por isso os efeitos de atenuação e distorção não serão modelados neste Capítulo, apesar de aparecerem nos resultados das simulações computacionais do Capítulo 5. Como estes efeitos agem como um amortecimento adicional para as ondas viajantes, a modelagem matemática proposta pode ser classificada como mais conservativa.

O nível de tensão das redes coletoras fica geralmente entre 20 e 36 kV. Para estes estudos, o valor de 36 kV foi escolhido. Como não existem informações sobre o cabo de 50 mm² para este nível de tensão, foi feito um modelo no software PSCAD mesclando as informações construtivas disponíveis na Tabela 24 de [13] com a isolação para os cabos de 36 kV. A impedância característica deste cabo foi medida, conforme será mostrado a seguir no Capítulo 5, e o valor de 40 Ω foi assumido.

4. Abordagem Teórica

4.4.2 F1_W4: 1 alimentador, 4 geradores

Secção do Cabo da Plataforma = 50 mm^2 ($Z_c=40 \Omega$ - 100m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 50 mm^2 ($Z_c=40 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm^2 ($Z_c=40 \Omega$ - 80m de comprimento)

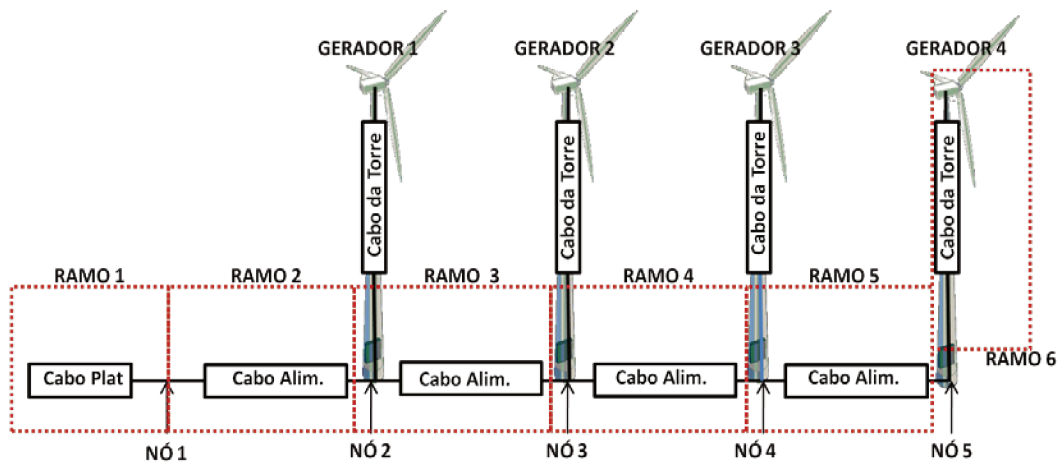


figura 4.17: Distribuição dos geradores – caso F1_W4.

tabela 4.12: Coeficientes de reflexão – caso F1_W4.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5
ALIMENTADOR À ESQUERDA	0,0000	-0,3333	-0,3333	-0,3333	0,0000
GERADOR	--	-0,3333	-0,3333	-0,3333	0,0000
ALIMENTADOR À DIREITA	0,0000	-0,3333	-0,3333	-0,3333	--

tabela 4.13: Coeficientes de refração – caso F1_W4.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5
ALIMENTADOR À ESQUERDA	1,0000	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000
GERADOR	--	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000
ALIMENTADOR À DIREITA	1,0000	0,6667	0,6667	0,6667	--

tabela 4.14: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso F1_W4.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 1	RAMO 2	RAMO 3	RAMO 4	RAMO 5	RAMO 6
PLATAFORMA	1,0000	1,0000	0,6667	0,4444	0,2963	0,2963
GERADOR 1	0,6667	0,6667	0,6667	0,4444	0,2963	0,2963
GERADOR 2	0,4444	0,4444	0,6667	0,6667	0,4444	0,4444
GERADOR 3	0,2963	0,2963	0,4444	0,6667	0,6667	0,6667
GERADOR 4	0,2963	0,2963	0,4444	0,6667	1,0000	1,0000

Este caso tem a particularidade de empregar todos os cabos da rede com a mesma secção. Logo, o coeficiente de reflexão (e o de refração) é o mesmo para todas as direções possíveis de onda incidente em todos os nós. Nota-se que independente do local de origem do transitório, somente 2/3 dele se propaga para os próximos dois cabos, o que é uma redução considerável.

A tabela 4.14 mostra a propagação do transitório quando ele se inicia na plataforma e em cada um dos transformadores de topo de torre. A tensão refratada para os cabos das torres não está representada nesta tabela por ser idêntica à do ramo à sua direita (se o transitório é iniciado na plataforma ou em um transformador à esquerda de acordo com a figura 4.11) ou à sua esquerda (se o transitório é iniciado em um transformador à direita de acordo com a figura 4.11)

Esta análise também considera somente a primeira refração da onda viajante. Para construir a forma de onda da sobretensão transitória, as próximas reflexões e refrações nos ramos da rede coletora devem ser consideradas.

4.4.3 F4_W4: 4 alimentadores, 4 geradores por alimentador

Secção do Cabo da Plataforma = 500 mm^2 ($Z_c=16,9 \Omega$ - 100m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 50 mm^2 ($Z_c=40 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm^2 ($Z_c=40 \Omega$ - 80m de comprimento)

4. Abordagem Teórica

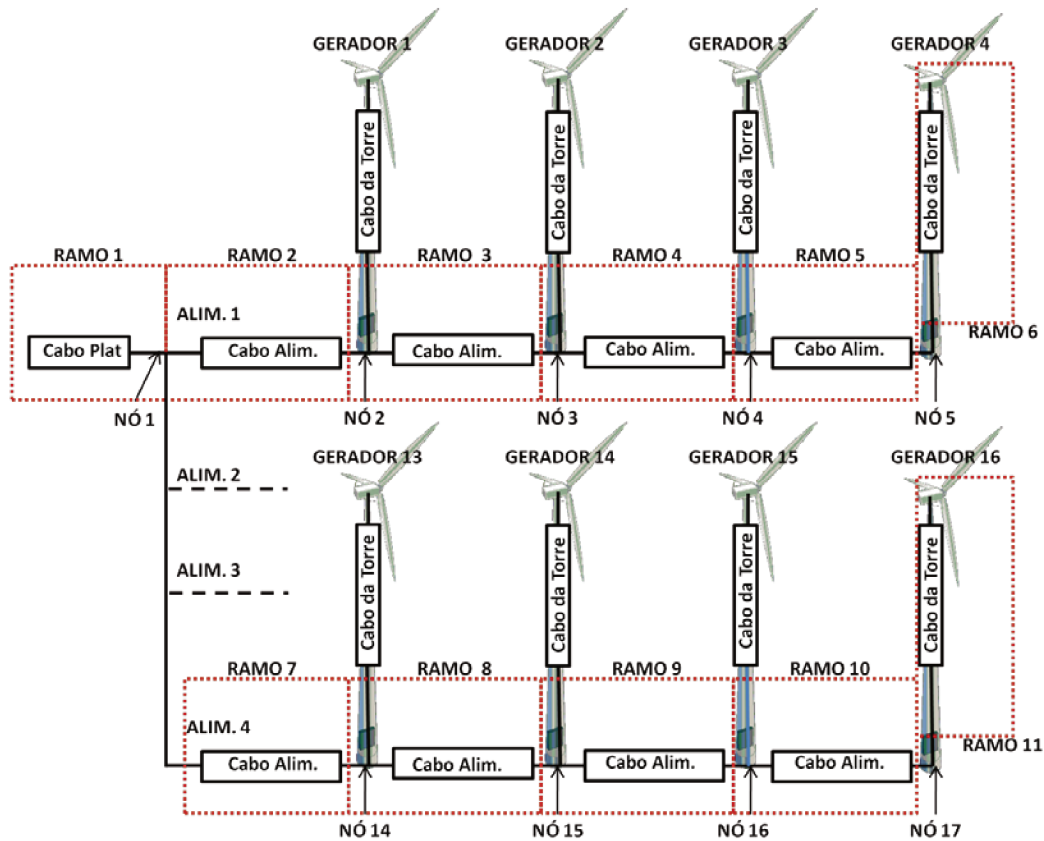


figura 4.18: Distribuição dos geradores – caso F4_W4.

tabela 4.15: Coeficientes de reflexão – caso F4_W4.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5
ALIMENTADOR À ESQUERDA	-0,2565	-0,3333	-0,3333	-0,3333	0,0000
GERADOR	--	-0,3333	-0,3333	-0,3333	0,0000
ALIMENTADOR À DIREITA	-0,5745	-0,3333	-0,3333	-0,3333	--

tabela 4.16: Coeficientes de refração – caso F4_W4.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5
ALIMENTADOR À ESQUERDA	0,7435	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000
GERADOR	--	0,6667	0,6667	0,6667	1,0000
ALIMENTADOR À DIREITA	0,4255	0,6667	0,6667	0,6667	--

tabela 4.17: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos do mesmo alimentador (p.u.)
– caso F4_W4.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 1	RAMO 2	RAMO 3	RAMO 4	RAMO 5	RAMO 6
PLATAFORMA	1,0000	0,7435	0,4957	0,3304	0,2203	0,1469
GERADOR 1	0,2837	0,6667	0,6667	0,4444	0,2963	0,2963
GERADOR 2	0,1891	0,4444	0,6667	0,6667	0,4444	0,4444
GERADOR 3	0,1261	0,2963	0,4444	0,6667	0,6667	0,6667
GERADOR 4	0,1261	0,2963	0,4444	0,6667	1,0000	1,0000

tabela 4.18: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos dos outros alimentadores - caso F4_W4.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 7	RAMO 8	RAMO 9	RAMO 10	RAMO 11
PLATAFORMA	0,7435	0,4957	0,3304	0,2203	0,1469
GERADOR 1	0,2837	0,1891	0,1261	0,0841	0,0560
GERADOR 2	0,1891	0,1261	0,0841	0,0560	0,0374
GERADOR 3	0,1261	0,0841	0,0560	0,0374	0,0249
GERADOR 4	0,1261	0,0841	0,0560	0,0374	0,0249

Esta configuração é muito similar à anterior, exceto pelo fato de que o cabo da plataforma é maior, pois conduz a corrente dos 4 alimentadores.

Os coeficientes de reflexão e refração no nó 1 mostram que cerca de 80% de um transitório de tensão originado fora da rede coletora penetra na rede de cabos. Por outro lado, apenas 30% do transitório que chega na plataforma é propagado para fora da rede coletora (sem esquecer que quanto mais longe da plataforma o transitório se inicia, menor será a parcela dele que chega ao nó1 para ser refratada para a LT aérea).

Por fim, a proporção refratada para a rede principal é a mesma que se propaga para os outros alimentadores. Como todos os alimentadores são idênticos, o transitório experimentado por eles (exceto aquele no qual o transitório se originou) também o é.

4. Abordagem Teórica

4.4.4 F1_W6: 1 alimentador, 6 geradores

Secção do Cabo da Plataforma = 95 mm^2 ($Z_c=33,3 \Omega$ - 100m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 95 mm^2 ($Z_c=33,3 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm^2 ($Z_c=40 \Omega$ - 80m de comprimento)

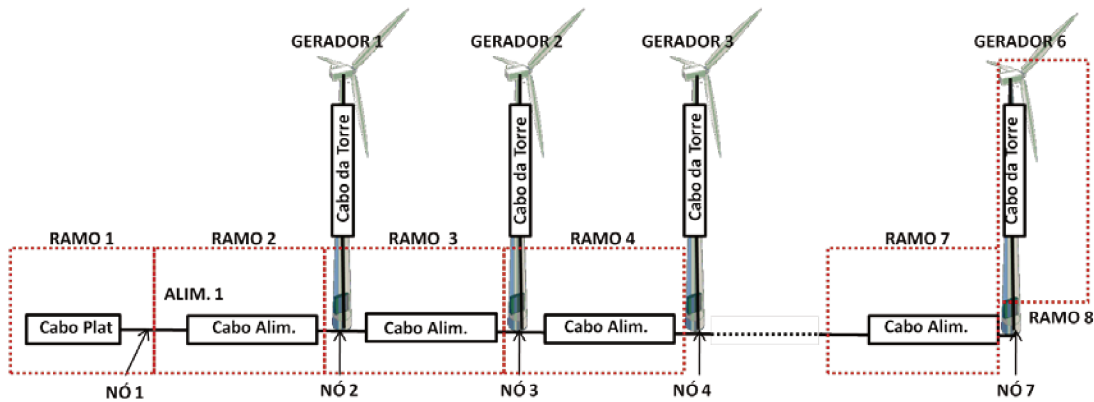


figura 4.19: Distribuição dos geradores – caso F1_W6.

tabela 4.19: Coeficientes de reflexão – caso F1_W6.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5	NÓ 6	NÓ 7
ALIMENTADOR À ESQUERDA	0,0000	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	0,0959
GERADOR	--	-0,4159	-0,4159	-0,4159	-0,4159	-0,4159	-0,0959
ALIMENTADOR À DIREITA	0,0000	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	--

tabela 4.20: Coeficientes de refração – caso F1_W6.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5	NÓ 6	NÓ 7
ALIMENTADOR À ESQUERDA	1,0000	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	1,0959
GERADOR	--	0,5841	0,5841	0,5841	0,5841	0,5841	0,9041
ALIMENTADOR À DIREITA	1,0000	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	--

tabela 4.21: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso F1_W6.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 1	RAMO 2	RAMO 3	RAMO 4	RAMO 5	RAMO 6	RAMO 7	RAMO 8
PLATAFORMA	1,0000	1,0000	0,7080	0,5012	0,3548	0,2512	0,1770	0,1949
GERADOR 1	0,5841	0,5841	0,5841	0,4135	0,2927	0,2073	0,1467	0,1608
GERADOR 2	0,4135	0,4135	0,5841	0,5841	0,4135	0,2927	0,2073	0,2271
GERADOR 3	0,2927	0,2927	0,4135	0,5841	0,5841	0,4135	0,2927	0,3208
GERADOR 4	0,2073	0,2073	0,2927	0,4135	0,5841	0,5841	0,4135	0,4532
GERADOR 5	0,1467	0,1467	0,2073	0,2927	0,4135	0,5841	0,5841	0,6401
GERADOR 6	0,1259	0,1259	0,1779	0,2512	0,3548	0,5012	0,7080	1,0000

Esta configuração mostra o que acontece quando o cabo do alimentador é de uma seção maior que o cabo da torre (e conseqüentemente possui uma impedância característica menor).

Pode ser visto na tabela 4.21 que na base da última torre do alimentador, onde a conexão é feita entre o cabo de 95 mm² e o de 50 mm², sem derivação, o coeficiente de refração é maior que 1. Logo, todo transitório de tensão vindo do alimentador em direção ao gerador é amplificado ao passar por esta conexão, mesmo que em menos de 15%. O efeito das reflexões sucessivas neste nó será analisado por meio de simulação no software PSCAD no próximo capítulo.

4.4.5 F6_W6: 6 alimentadores, 6 geradores por alimentador

Secção do Cabo da Plataforma = 2x630 mm² ($Z_c = 15,3 \Omega$ - Equivalent $Z_c = 7,65 \Omega$ - 100m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 95 mm² ($Z_c = 33,3 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm² ($Z_c = 40 \Omega$ - 80m de comprimento)

4. Abordagem Teórica

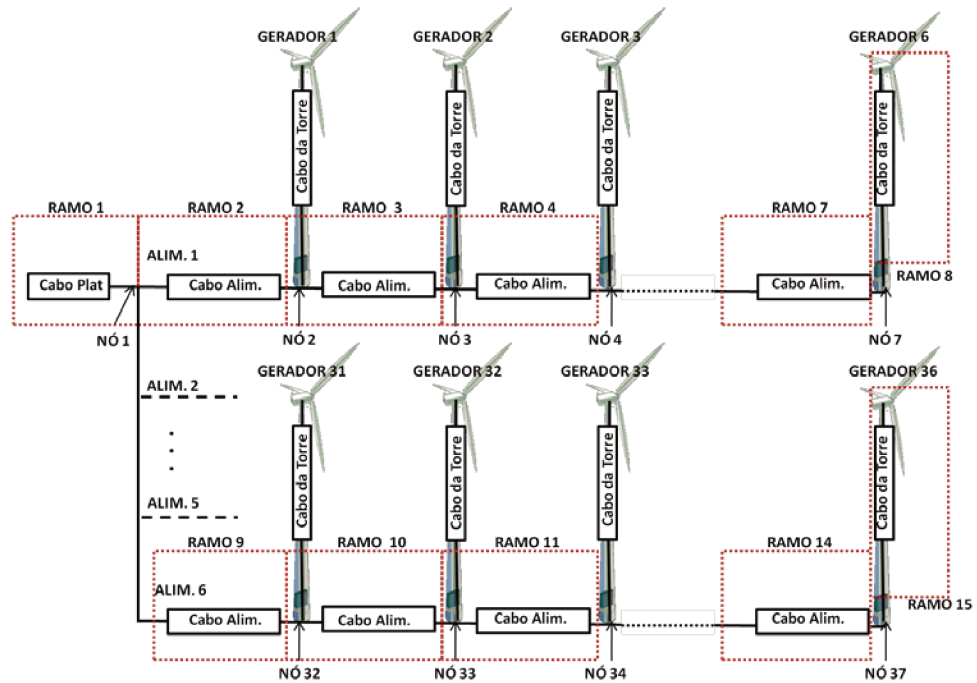


figura 4.20: Distribuição dos geradores – caso F6_W6.

tabela 4.22: Coeficientes de reflexão – caso F6_W6.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5	NÓ 6	NÓ 7
ALIMENTADOR À ESQUERDA	-0,1591	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	0,0959
GERADOR	--	-0,4159	-0,4159	-0,4159	-0,4159	-0,4159	-0,0959
ALIMENTADOR À DIREITA	-0,8068	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	-0,2920	--

tabela 4.23: Coeficientes de refração – caso F6_W6.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓ 2	NÓ 3	NÓ 4	NÓ 5	NÓ 6	NÓ 7
ALIMENTADOR À ESQUERDA	0,8409	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	1,0959
GERADOR	--	0,5841	0,5841	0,5841	0,5841	0,5841	0,9041
ALIMENTADOR À DIREITA	0,1932	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	0,7080	--

tabela 4.24: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos do mesmo alimentador (p.u.)
– caso F6_W6.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 1	RAMO 2	RAMO 3	RAMO 4	RAMO 5	RAMO 6	RAMO 7	RAMO 8
PLATAFORMA	1,0000	0,8409	0,5953	0,4215	0,2984	0,2112	0,1496	0,1639
GERADOR 1	0,1128	0,5841	0,5841	0,4135	0,2927	0,2073	0,1467	0,1608
GERADOR 2	0,0799	0,4135	0,5841	0,5841	0,4135	0,2927	0,2073	0,2271
GERADOR 3	0,0566	0,2927	0,4135	0,5841	0,5841	0,4135	0,2927	0,3208
GERADOR 4	0,0400	0,2073	0,2927	0,4135	0,5841	0,5841	0,4135	0,4532
GERADOR 5	0,0283	0,1467	0,2073	0,2927	0,4135	0,5841	0,5841	0,6401
GERADOR 6	0,0243	0,1259	0,1779	0,2512	0,3548	0,5012	0,7080	1,0000

tabela 4.25: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos dos outros alimentadores – caso F6_W6.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 9	RAMO 10	RAMO 11	RAMO 12	RAMO 13	RAMO 14	RAMO 15
PLATAFORMA	0,8409	0,5953	0,4215	0,2984	0,2112	0,1496	0,1639
GERADOR 1	0,1128	0,0799	0,0566	0,0400	0,0283	0,0201	0,0220
GERADOR 2	0,0799	0,0566	0,0400	0,0283	0,0201	0,0142	0,0156
GERADOR 3	0,0566	0,0400	0,0283	0,0201	0,0142	0,0101	0,0110
GERADOR 4	0,0400	0,0283	0,0201	0,0142	0,0101	0,0071	0,0078
GERADOR 5	0,0283	0,0201	0,0142	0,0101	0,0071	0,0050	0,0055
GERADOR 6	0,0243	0,0172	0,0122	0,0086	0,0061	0,0043	0,0047

Neste caso, como Z_0 do cabo da plataforma é muito menor que o Z_0 dos cabos dos alimentadores, somado ao efeito da associação em paralelo das impedâncias de 5 alimentadores, o coeficiente de refração no nó1 para um transitório de tensão vindo de dentro da rede coletora é muito baixo (menos de 20%), fazendo que os outros alimentadores percebam somente uma parcela muito pequena de qualquer perturbação.

Logo, pode ser dito que o coeficiente de refração neste nó age no sentido de isolar os alimentadores sob o aspecto de propagação de transitório. Por outro lado, mais de 80% da onda viajante é refletida de volta para o alimentador. Como

4. Abordagem Teórica

consequência, um maior número de reflexões secundárias possui magnitude relevante para a construção da forma de onda da sobretensão. Os efeitos práticos deste aspecto serão vistos no próximo capítulo.

4.4.6 F1_W9: 1 alimentador, 9 geradores

Secção do Cabo da Plataforma = 185 mm² ($Z_c= 25,8 \Omega$ - 100m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 185 mm² ($Z_c=25,8 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm² ($Z_c=40 \Omega$ - 80m de comprimento)

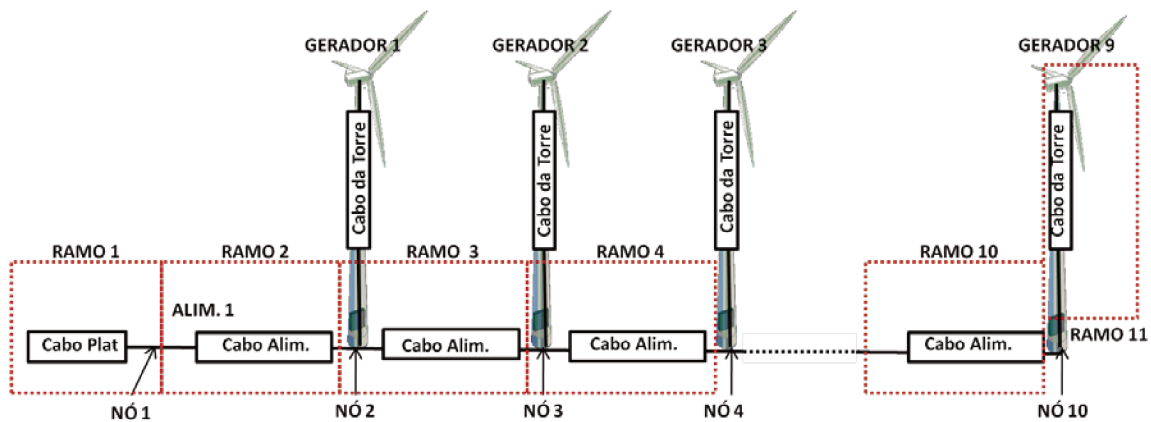


figura 4.21: Distribuição dos geradores – caso F1_W9.

tabela 4.26: Coeficientes de reflexão – caso F1_W9.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓS 2 A 9	NÓ 10
ALIMENTADOR À ESQUERDA	0,0000	-0,2439	0,1628
GERADOR	--	-0,5123	-0,2158
ALIMENTADOR À DIREITA	0,0000	-0,2439	--

tabela 4.27: Coeficientes de refração – caso F1_W9.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓS 2 A 9	NÓ 10
ALIMENTADOR À ESQUERDA	1,0000	0,7561	1,1628
GERADOR	--	0,4877	0,7842
ALIMENTADOR À DIREITA	1,0000	0,7561	--

tabela 4.28: propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso F1_W9.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 1	RAMO 2	RAMO 3	RAMO 4	RAMO 5	RAMO 6	RAMO 7	RAMO 8	RAMO 9	RAMO 10	RAMO 11
PLATAFORMA	1,0000	1,0000	0,7461	0,5718	0,4323	0,3269	0,2472	0,1869	0,1413	0,1069	0,1243
GERADOR 2	0,3688	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1206	0,0912	0,1060
GERADOR 1	0,4877	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1206	0,0912	0,0689	0,0801
GERADOR 3	0,2789	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1206	0,1402
GERADOR 4	0,2109	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1854
GERADOR 5	0,1594	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,2452
GERADOR 6	0,1206	0,1206	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,3242
GERADOR 7	0,0912	0,0912	0,1206	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,4288
GERADOR 8	0,0689	0,0689	0,0912	0,1206	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,5671
GERADOR 9	0,0838	0,0838	0,1108	0,1466	0,1938	0,2564	0,3390	0,4484	0,5930	0,7842	1,0000

4. Abordagem Teórica

Analisando a interação entre os cabos de 185 mm² e de 50 mm², a amplificação resultante da refração no último nó de cada alimentador é maior que a observada entre cabos de 95 mm² e 50 mm².

De acordo com a equação 16 que define β , quão maior for a diferença entre as impedâncias características, maior será o coeficiente de refração. Neste caso, a amplificação é de cerca de 30%, o que pode ser considerado importante. Porém, quando se leva em consideração o fato de que a maioria dos transitórios já foi significativamente atenuada ao passar por outros nós da rede quando atinge este ponto (fim do alimentador), a amplificação pode não ser tão perigosa.

O efeito de múltiplas reflexões associado a este coeficiente de refração pode ser mais bem observada no próximo capítulo.

4.4.7 W9_F9: 9 alimentadores, 9 geradores por alimentador

Secção do Cabo da Plataforma = 4x800 mm² ($Z_c = 13,6 \Omega$ - Z_c Equivalente = 3,4 Ω - 100m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 185 mm² ($Z_c = 25,8 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm² ($Z_c = 40 \Omega$ - 80m de comprimento)

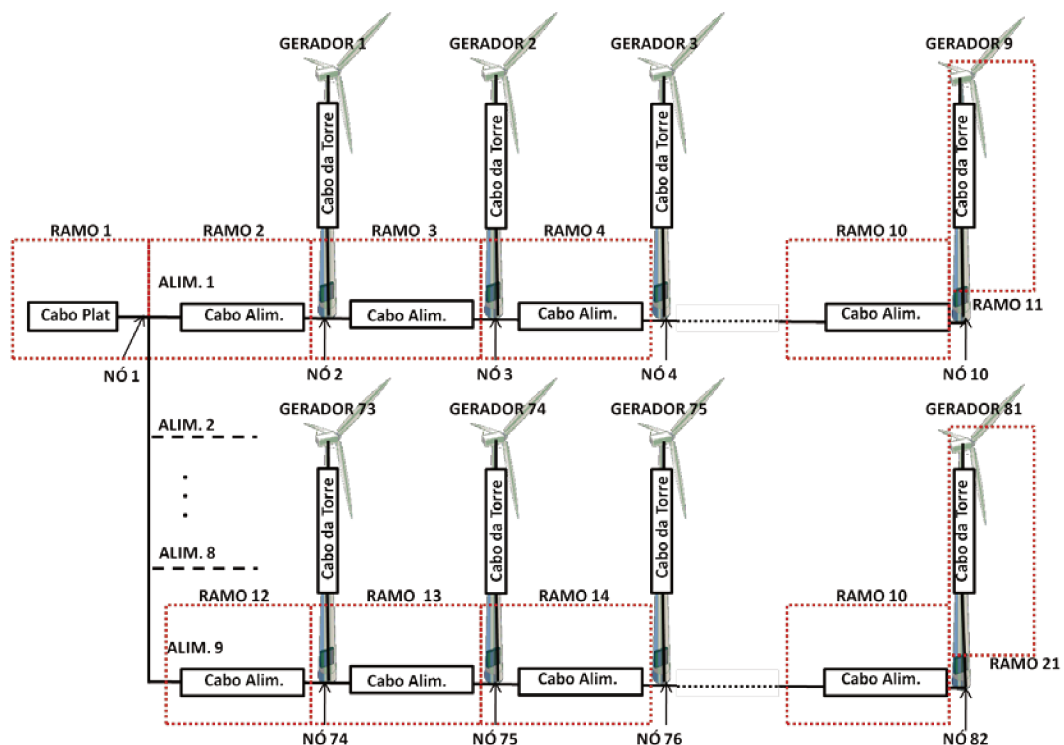


figura 4.22: Distribuição dos geradores – caso F9_W9.

Em comparação com a configuração F6_W6, os coeficientes de refração no nó1 mostram que, neste caso, uma parcela ainda menor do transitório originado em um alimentador pode ser percebida pelos outros alimentadores ou pelo sistema externo à rede coletora. Por outro lado, as reflexões de uma onda viajante no mesmo alimentador em que foi gerada tende a levar mais tempo para desaparecer.

tabela 4.29: Coeficientes de reflexão – caso F9_W9.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓS 2 A 9	NÓ 10
ALIMENTADOR À ESQUERDA	-0,0851	-0,2439	0,1628
GERADOR	--	-0,5123	-0,2158
ALIMENTADOR À DIREITA	-0,8794	-0,2439	--

tabela 4.30: Coeficientes de refração – caso F9_W9.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ 1	NÓS 2, 3, 4, 5, 6, 7 E 8	NÓ 9
ALIMENTADOR À ESQUERDA	0,9149	0,7561	1,1628
GERADOR	--	0,4877	0,7842
ALIMENTADOR À DIREITA	0,1206	0,7561	--

tabela 4.31 : Propagação de transitórios nos ramos do mesmo alimentador (p.u.) – caso F9_W9.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 1	RAMO 2	RAMO 3	RAMO 4	RAMO 5	RAMO 6	RAMO 7	RAMO 8	RAMO 9	RAMO 10	RAMO 11
PLATAFORMA	1,0000	0,9149	0,6918	0,5231	0,3955	0,2991	0,2261	0,1710	0,1293	0,0978	0,1137
GERADOR 1	0,0588	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1206	0,0912	0,0689	0,0801
GERADOR 2	0,0445	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1206	0,0912	0,1060
GERADOR 3	0,0336	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1206	0,1402
GERADOR 4	0,0254	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,1594	0,1854
GERADOR 5	0,0192	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,2109	0,2452
GERADOR 6	0,0145	0,1206	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,2789	0,3242
GERADOR 7	0,0110	0,0912	0,1206	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,3688	0,4288
GERADOR 8	0,0083	0,0689	0,0912	0,1206	0,1594	0,2109	0,2789	0,3688	0,4877	0,4877	0,5671
GERADOR 9	0,0101	0,0838	0,1108	0,1466	0,1938	0,2564	0,3390	0,4484	0,5930	0,7842	1,0000

tabela 4.32: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos dos outros alimentadores
(p.u.) – caso F9_W9.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO 12	RAMO 13	RAMO 14	RAMO 15	RAMO 16	RAMO 17	RAMO 18	RAMO 19	RAMO 20	RAMO 21
PLATAFORMA	0,9149	0,6918	0,5231	0,3955	0,2991	0,2261	0,1710	0,1293	0,0978	0,1137
GERADOR 1	0,0588	0,0445	0,0336	0,0254	0,0192	0,0145	0,0110	0,0083	0,0063	0,0073
GERADOR 2	0,0445	0,0336	0,0254	0,0192	0,0145	0,0110	0,0083	0,0063	0,0048	0,0055
GERADOR 3	0,0336	0,0254	0,0192	0,0145	0,0110	0,0083	0,0063	0,0048	0,0036	0,0042
GERADOR 4	0,0254	0,0192	0,0145	0,0110	0,0083	0,0063	0,0048	0,0036	0,0027	0,0032
GERADOR 5	0,0192	0,0145	0,0110	0,0083	0,0063	0,0048	0,0036	0,0027	0,0021	0,0024
GERADOR 6	0,0145	0,0110	0,0083	0,0063	0,0048	0,0036	0,0027	0,0021	0,0016	0,0018
GERADOR 7	0,0110	0,0083	0,0063	0,0048	0,0036	0,0027	0,0021	0,0016	0,0012	0,0014
GERADOR 8	0,0083	0,0063	0,0048	0,0036	0,0027	0,0021	0,0016	0,0012	0,0009	0,0010
GERADOR 9	0,0101	0,0076	0,0058	0,0044	0,0033	0,0025	0,0019	0,0014	0,0011	0,0013

4. Abordagem Teórica

4.4.8 STAR_7: 7 geradores, conexão em estrela

Secção do Cabo da Plataforma = 120 mm² ($Z_c = 30,3 \Omega$ - 3000m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 50 mm² ($Z_c = 40 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm² ($Z_c = 40 \Omega$ - 80m de comprimento)

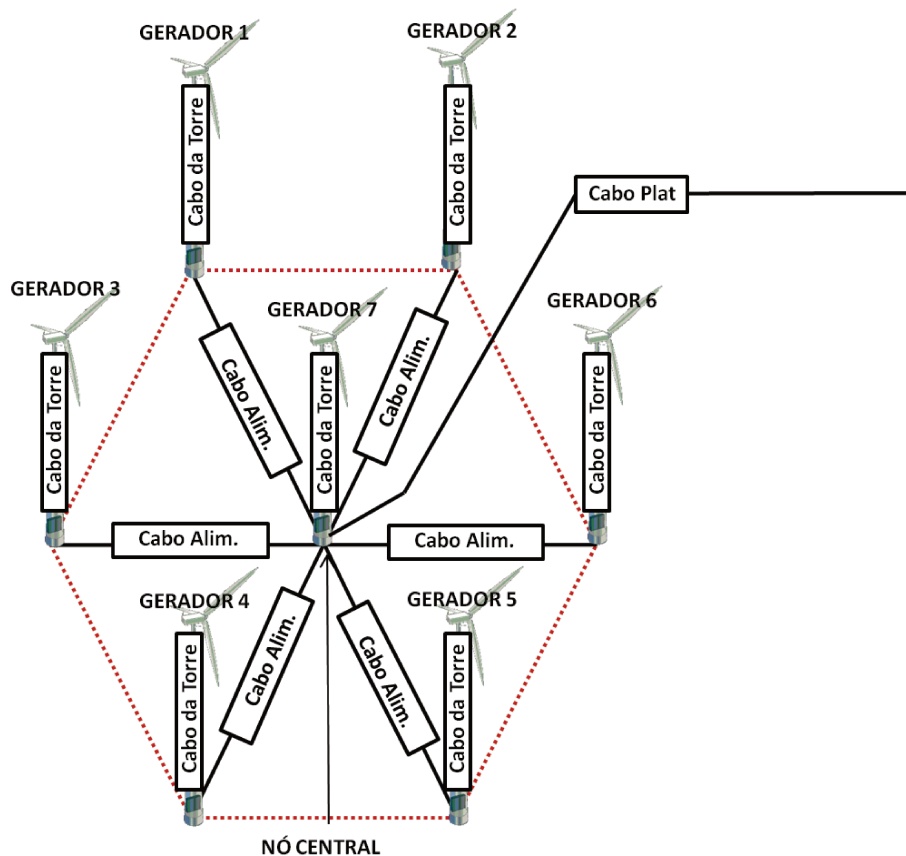


figura 4.23: Distribuição dos geradores – caso STAR_7.

tabela 4.33: Coeficientes de reflexão – caso STAR_7.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ CENTRAL
CABO DA PLATAFORMA	-0,6827
QUALQUER GERADOR	-0,7596

tabela 4.34: Coeficientes de refração – caso STAR_7.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ CENTRAL
CABO DA PLATAFORMA	0,3173
QUALQUER GERADOR	0,2404

tabela 4.35: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso STAR_7.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO DA PLATAFORMA	RAMO GER. 1	RAMO GER. 2	RAMO GER. 3	RAMO GER. 4	RAMO GER. 5	RAMO GER. 6	RAMO GER. 7
PLATAFORMA	1,0000	0,3173	0,3173	0,3173	0,3173	0,3173	0,3173	0,3173
GERADOR 1	0,2404	1,0000	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404
GERADOR 2	0,2404	0,2404	1,0000	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404
GERADOR 3	0,2404	0,2404	0,2404	1,0000	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404
GERADOR 4	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	1,0000	0,2404	0,2404	0,2404
GERADOR 5	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	1,0000	0,2404	0,2404
GERADOR 6	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	1,0000	0,2404
GERADOR 7	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	0,2404	1,0000

A dinâmica da propagação dos transitórios de tensão para esta configuração difere um pouco das anteriores. Neste caso, quando a onda viajante atinge o nó central, ela é refratada para todos os outros ramos simultaneamente. Como todos os alimentadores são idênticos, o tempo decorrido para a onda então refratada ser refletida no topo de cada torre e retornar ao nó central é o mesmo, fazendo do ponto central um constante alvo de interferência construtiva.

Logo, é razoável dizer que uma vez que o processo de energização ocorre sempre da plataforma, a partir do momento em que o transitório atinge o nó central, a tensão neste ponto será construída sob o efeito das reflexões secundárias nos 6 ramos idênticos somadas às reflexões no ramo central (cabo mais curto). Em outras palavras, seria como 6 vezes o efeito de uma onda de tensão de 0,3173 p.u. sendo refletida, ou seja, em torno de 2 p.u., mais as reflexões no ramo do gerador 7.

Para um transitório originado no topo de uma torre, a mesma análise se aplica. O resultado destas múltiplas reflexões pode ser observado nos resultados das simulações no próximo Capítulo.

4. Abordagem Teórica

4.4.9 STAR_9: 9 geradores, conexão em estrela

Secção do Cabo da Plataforma = 185 mm^2 ($Z_c = 25,8 \Omega$ - 1000m de comprimento)

Secção do Cabo do Alimentador = 50 mm^2 ($Z_c = 40 \Omega$ - 800m de comprimento)

Secção do Cabo da Torre = 50 mm^2 ($Z_c = 40 \Omega$ - 80m de comprimento)

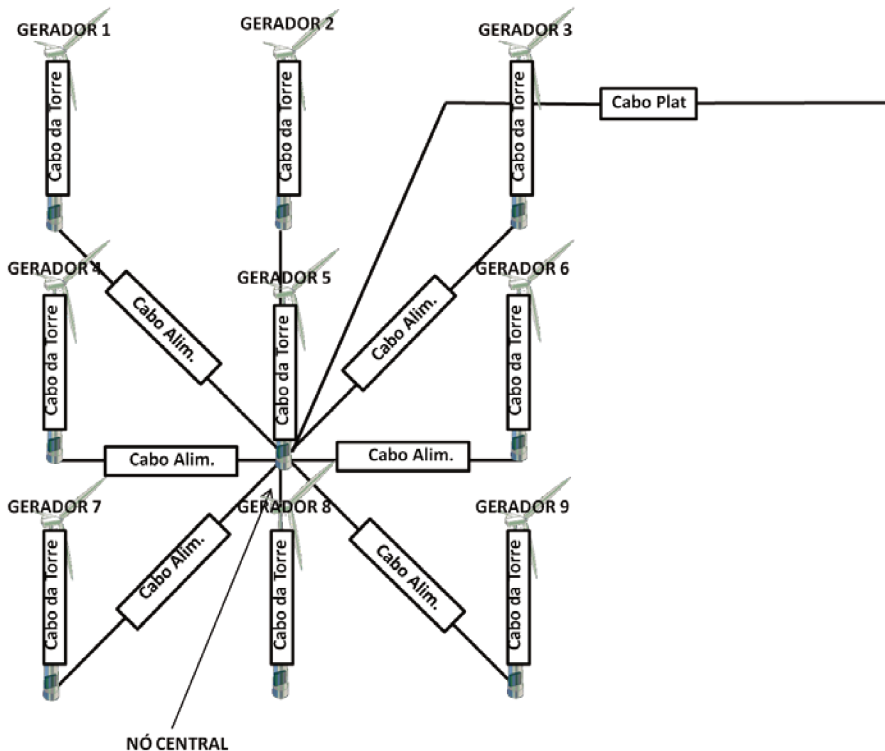


figura 4.24: Distribuição dos geradores – caso STAR_9.

tabela 4.36: Coeficientes de reflexão – caso STAR_9.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ CENTRAL
CABO DA PLATAFORMA	-0,7061
QUALQUER GERADOR	-0,8104

tabela 4.37: Coeficientes de refração – caso STAR_9.

ORIGEM DA ONDA VIAJANTE	NÓ CENTRAL
CABO DA PLATAFORMA	0,2939
QUALQUER GERADOR	0,1896

tabela 4.38: Propagação de transitórios de tensão através dos ramos (p.u.) – caso STAR_9.

ORIGEM DO TRANSITÓRIO	RAMO DA PLATAFORMA	OUTROS RAMOS DE GERADORES	
PLATAFORMA	1,0000	0,2939	
	RAMO DA PLATAFORMA	RAMO DO GERADOR INICIAL	OUTROS RAMOS DE GERADORES
GERADOR 1	0,1896	1,0000	0,1896
GERADOR 2	0,1896	1,0000	0,1896
GERADOR 3	0,1896	1,0000	0,1896
GERADOR 4	0,1896	1,0000	0,1896
GERADOR 5	0,1896	1,0000	0,1896
GERADOR 6	0,1896	1,0000	0,1896
GERADOR 7	0,1896	1,0000	0,1896
GERADOR 8	0,1896	1,0000	0,1896

A dinâmica desta configuração é muito similar à da configuração anterior, com a diferença que a interferência construtiva acontece em 2 grupos de 4 cabos por vez (os 4 cabos localizados nas diagonais do quadrado, e os dos geradores alocados nos centros dos lados).

Os resultados práticos das múltiplas reflexões podem ser vistos no próximo capítulo.

4.5 Conclusões

Coeficientes de reflexão e refração: apesar de ser possível que o coeficiente de refração (β) em um nó seja maior que 1 (quando o fenômeno de refração tem efeito amplificador), quando valores práticos de impedâncias características dos cabos são aplicados, uma amplificação significativa se mostrou bastante difícil de acontecer.

Propagação dos transitórios para outros alimentadores: o arranjo de impedâncias no nó da plataforma resulta em um coeficiente de refração cada vez menor pelo lado dos geradores conforme o tamanho do PE aumenta. Isso quer dizer que apenas uma pequena proporção dos transitórios que tem início em um alimentador pode ser percebida nos outros, assim como pela rede de distribuição externa à rede coletora. Por outro lado, este aspecto também faz que a rede de cabos esteja mais suscetível a transitórios que se iniciem fora dela.

4. Abordagem Teórica

Múltiplas reflexões e interferência construtiva: quanto menor o módulo do coeficiente de reflexão, menor é o número de reflexões secundárias cuja contribuição à sobretensão transitória seja significativa. Normalmente cerca de 4 reflexões são suficientes para atenuar a onda viajante a ponto que ela não tenha mais uma amplitude significativa.

Conclusão principal: devido à atenuação resultante das reflexões e refrações consecutivas, e ao NBI exigido pela norma de fabricação de transformadores, os transitórios de tensão originados no momento de energização do PEM não são suficientes para causar uma sobretensão perigosa à rede coletora.

SIMULAÇÕES

O comportamento de algumas das configurações de PEM estudadas no capítulo anterior foi simulado com o auxílio do software PSCAD (veja tabela 5.1).

Os cabos foram modelados de acordo com a descrição física construtiva disponível em [13], tabela 26, e a metodologia descrita na seção 5.1 abaixo. Uma única exceção cabe ao cabo de 50mm², que foi modelado com base nas informações da tabela 24 de [13], mas com a espessura de isolamento de 8mm, apropriada para um nível de tensão mais alto. Sua impedância característica foi calculada com o auxílio do software PSCAD, como mostrado a seguir. Os cabos foram modelados como enterrados, porém o valor de resistividade da terra foi substituído pelo da água do mar [17], já que na situação real estes cabos estão no oceano.

A fonte de tensão utilizada foi o componente *AC Voltage Source* ideal (impedância série nula) de 36 kV, 50 Hz. Entretanto, como o período do sinal nesta frequência (20ms) é muito maior que o período de duração de qualquer transitório observado (algumas centenas de μ s), para esta análise veremos que a fonte AC equivale a uma bateria de tensão nominal $V(t=0)$.

tabela 5.1: Casos simulados no PSCAD.

CASO ID	DESCRIÇÃO	SIMULADO?
F1_W4	1 ALIMENTADOR COM 4 GERADORES	SIM
F4_W4	4 ALIMENTADORES COM 4 GERADORES CADA	NÃO
F1_W6	1 ALIMENTADOR COM 6 GERADORES	NÃO
F6_W6	6 ALIMENTADORES COM 6 GERADORES CADA	NÃO
F1_W9	1 ALIMENTADOR COM 9 GERADORES	NÃO
F9_W9	9 ALIMENTADORES COM 9 GERADORES CADA	SIM
STAR_7	7 GERADORES, CABOS CONECTADOS EM ESTRELA	SIM
STAR_9	9 GERADORES, CABOS CONECTADOS EM ESTRELA	NÃO

5. Simulações

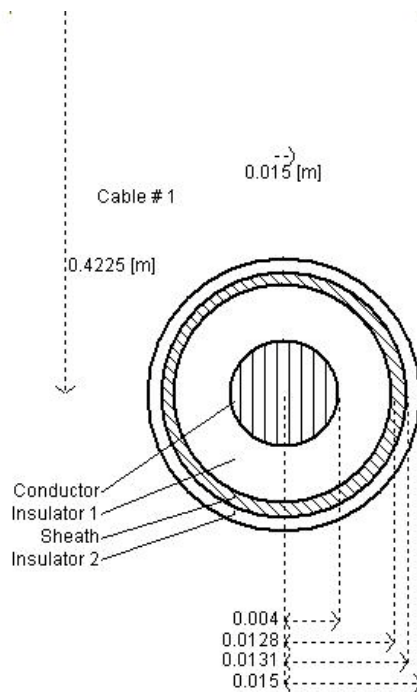


figura 5.1: Seção transversal do modelo do cabo de 50 mm² no PSCAD.

5.1 Modelagem dos Cabos

Os cabos utilizados nas simulações foram modelados de acordo com a metodologia descrita em [18]. O objetivo é conseguir uma representação tão próxima quanto possível do cabo real com relação à sua resposta a fenômenos transitórios, assim como para a frequência nominal (50 Hz). O modelo foi desenvolvido no software PSCAD/EMTDC, que possui um desempenho satisfatório na representação desta faixa de frequências, e é válido tanto para cabos monopolares como para os tripolares.

O PSCAD/EMTDC dispõe de três opções de modelagem para cabos de energia [19]:

- a) **Bergeron Model:** representa o cabo por parâmetros distribuídos, e é adequado para representar com precisão o comportamento do cabo em apenas uma frequência;
- b) **Frequency Dependant (mode) Model:** adequado para representar com precisão o comportamento do cabo em uma larga faixa de frequências. Entretanto, não é muito preciso no caso de condutores não idealmente transpostos.
- c) **Frequency Dependant (phase) Model:** o melhor dentre os três disponibilizados pelo programa, e por isso foi selecionado para as simulações. É adequado para representar o comportamento do cabo em uma larga faixa de frequências, e lida

também com as matrizes de transformação modal para cabos não idealmente transpostos.

5.1.1 Seleção dos Parâmetros dos Cabos no PSCAD/EMTDC

Os parâmetros requeridos para representação de cabos e linhas de transmissão são as matrizes de impedâncias série Z e de admitância shunt Y.

$$Z(\omega) = R(\omega) + j \cdot \omega \cdot L \quad (29)$$

$$Y(\omega) = G(\omega) + j \cdot \omega \cdot C \quad (30)$$

Onde:

R= resistência série do condutor por unidade de comprimento;

L= indutância série do condutor por unidade de comprimento;

G= admitância shunt do condutor por unidade de comprimento;

C= capacitância shunt do condutor por unidade de comprimento;

Como pode ser visto, tanto Z quanto Y são dependentes da frequência. O PSCAD/EMTDC, assim como a maioria dos programas de cálculo do tipo EMTP, tem rotinas dedicadas a determinar esta característica. Calcula as matrizes do cabo baseado na geometria e nas propriedades dos materiais, dadas como entrada pelo usuário. Entretanto, existem algumas diferenças entre o cabo real e o modelado, que são (veja figura 5.1):

1. PSCAD/EMTDC não leva em consideração a camada semicondutora presente nos cabos atuais;
2. PSCAD/EMTDC assume que o condutor é um sólido homogêneo, quando na realidade é formado pela junção de vários condutores pequenos.

Ainda, existem algumas dimensões geométricas dos cabos que não são informadas pelos fabricantes.

5. Simulações



figura 5.2: Seção transversal dos cabos reais [13].

Como pode ser visto pela figura 5.1, o PSCAD/EMTDC necessita dos parâmetros geométricos do núcleo, camada isolante e blindagem. O cabo real, entretanto, é formado pelo condutor, uma camada semicondutora interna e uma de proteção externa à camada de isolamento, além da isolamento e blindagem já descritas. As próximas seções descreverão como ajustar os dados de entrada do PSCAD para levar em consideração a laminação do núcleo e as camadas semicondutoras.

5.1.2 Parâmetros do Núcleo

Os parâmetros do núcleo solicitados pelo PSCAD/EMTDC são: a resistividade e o raio. Entretanto, a seção nominal indicada pelo fabricante é diferente da área do círculo correspondente ao raio informado devido ao fato de que o núcleo do cabo real é composto da aglomeração de um feixe de condutores de menor espessura (núcleo laminado). Uma vez que o programa assume o núcleo como sendo um condutor sólido, uma correção deve ser feita para levar em consideração o preenchimento do raio especificado. Esta correção é feita através do aumento da resistividade ρ por um fator igual ao inverso do fator de preenchimento, conforme 31 abaixo:

$$\rho' = \rho \cdot \frac{\Pi r_1^2}{A_c} \quad (31)$$

Onde ρ' é a resistividade corrigida, ρ é a resistividade do material do núcleo, r_1 é o raio do condutor como informado pelo fabricante do manual, e A_c é a seção transversal eficiente do núcleo. A resistividade dos materiais mais utilizados em núcleos de cabos é dada na tabela abaixo:

tabela 5.2: Resistividade do cobre e alumínio.

Material	Cobre	Alumínio
ρ ($\Omega.m$)	$1.72E^{-8}$	$2.82E^{-8}$

5.1.3 Isolação e Camada semicondutora

A isolação principal de cabos de alta tensão está sempre colocada entre duas camadas semicondutoras. Logo, uma alteração deve ser feita nos dados de entrada para levá-las em consideração. Conforme explicado em [18], esta modificação é feita permitindo-se que a isolação se estenda entre o condutor central e o de blindagem, e aumentando sua permissividade proporcionalmente para que a capacitância fique inalterada. Este procedimento é resumido pelos seguintes passos:

1. Calcular r_2 , r_1 (conforme figura 5.4) e a soma das espessuras das camadas semicondutoras e isolação principal. Este raio é dado como o raio externo da isolação no PSCAD/EMTDC.
2. Calcular a permissividade corrigida ϵ_{r1} como sendo:

$$\epsilon_{r1} = \epsilon_{rins} \cdot \frac{\ln(r_2 / r_1)}{\ln(b / a)} \quad (32)$$

Onde a e b são os raios interno e externo da isolação, respectivamente, e ϵ_{rins} é a permissividade do material isolante.

5.1.4 Condutor de Blindagem

Quando o condutor de blindagem é feito de uma tela de arames, como no caso dos cabos XLPE da ABB, a melhor maneira de modelá-lo é como um condutor tubular de seção A_s conforme informada pelo fabricante, raio interno r_2 e externo r_3 conforme dado por:

$$r_3 = \sqrt{\frac{A_s}{\Pi} + r_2^2} \quad (33)$$

5.1.5 Exemplo Numérico

Para ilustrar a metodologia descrita acima, foi tomado como exemplo o cabo XLPE da ABB de 95mm^2 (figura 5.3), tensão nominal de 30 kV (referência tabela 25 de [10]). Os dados do fabricante estão resumidos abaixo:

5. Simulações

- Seção transversal do condutor: 95 mm^2 ;
- Diâmetro do condutor: 11.2 mm ;
- Espessura da isolação: 8 mm ;
- Diâmetro sobre a isolação: 28.8 mm ;
- Seção transversal da blindagem: 25 mm^2 ;
- Diâmetro externo do cabo: 37 mm ;

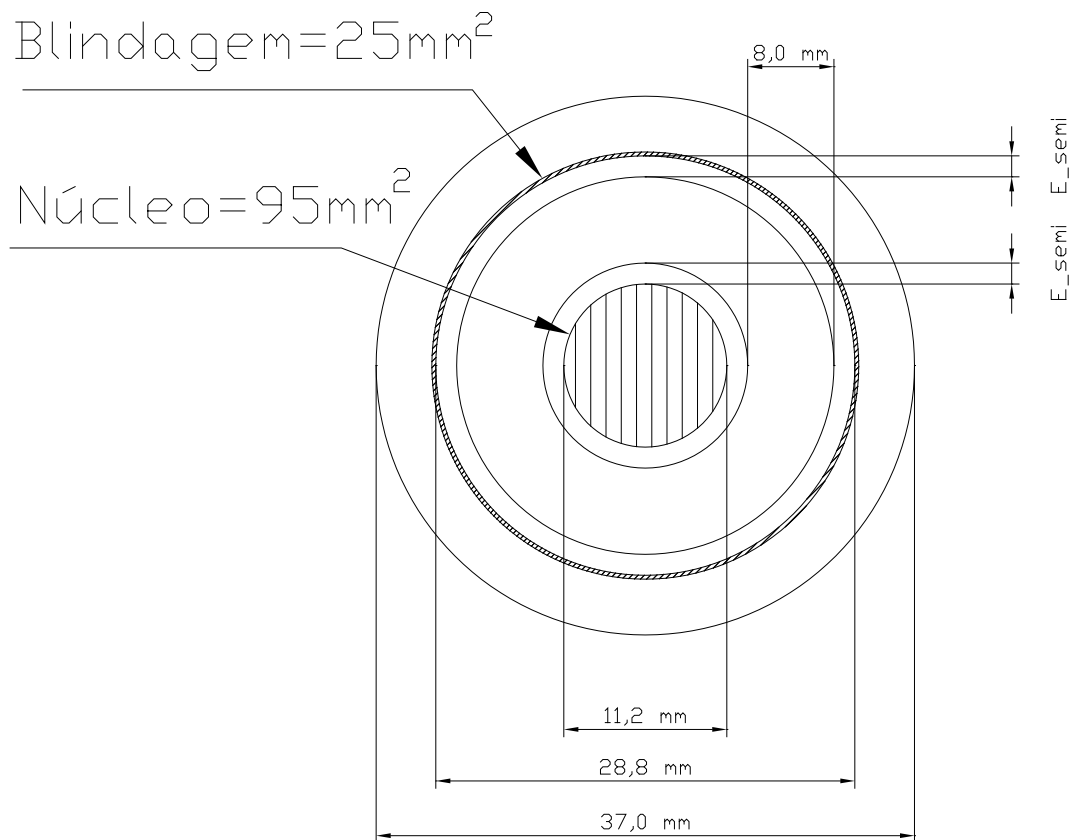


figura 5.3: Seção transversal real do cabo de 95 mm^2 .

Os dados de entrada para o PSCAD/EMTDC foram calculados conforme abaixo:

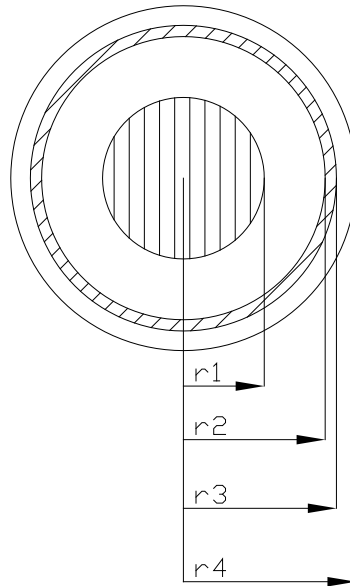


figura 5.4: Secção transversal do cabo conforme modelo PSCAD.

1. **Dados do núcleo:** raio do núcleo assumido como metade do diâmetro:

$$r_1 = \frac{11.2}{2} = 5.6 \text{ mm} \quad (34)$$

Resistividade do cobre corrigida:

$$\rho' = 2.82E^{-8} \cdot \frac{\pi 5.6^2}{95} = 2.92E^{-8} \Omega \cdot m \quad (35)$$

2. **Primeira Camada Isolante:** r_2 dado como metade do diâmetro sobre a isolação:

$$r_2 = \frac{28.8}{2} = 14.4 \text{ mm} \quad (36)$$

A espessura das camadas semicondutoras é calculada pela diferença entre o diâmetro sobre a isolação e o diâmetro do condutor central, comparada com a

5. Simulações

espessura da isolação. As camadas interna e externa são assumidas como sendo de mesma espessura.

$$E_{semi} = \frac{D_{ext} - D_{cond} - 2 \cdot esp_{is}}{4} = 0.4 \text{ mm} \quad (37)$$

Sendo:

E_{semi} = Espessura da camada semicondutora (tabela 4.5);

D_{ext} = Diâmetro sobre a isolação (tabela 4.5);

D_{cond} = Diâmetro do condutor central (tabela 4.5);

esp_{is} = espessura da isolação (tabela 4.5);

$$a = r_1 + 0.4 = 6 \text{ mm} \quad (38)$$

$$b = r_2 - 0.4 = 14 \text{ mm} \quad (39)$$

O valor da permissividade relativa da isolação dada por [13] é 2.3.

$$\varepsilon_{r1} = 2.3 \cdot \frac{\ln(5.6/14.4)}{\ln(6/14)} = 2.56 \quad (40)$$

3. Blindagem: o material da blindagem neste caso é alumínio.

$$r_3 = \sqrt{\frac{25}{\pi} + 14.4^2} = 14.67 \text{ mm} \quad (41)$$

4. Segunda Camada Isolante: o material considerado é o mesmo utilizado para a primeira camada isolante, e o raio é determinado pelo diâmetro externo do cabo.

$$r_4 = \frac{37}{2} = 18.5 \text{ mm} \quad (42)$$

A próxima tabela mostra os dados de entrada do PSCAD/EMTDC calculados com base nas informações da tabela 25 de [10]. A única exceção se faz para o cabo de 50mm², que foi

modelado com base nas informações da tabela 24 de [13], mas com a espessura de isolamento do próximo nível de tensão.

tabela 5.3: Dados de modelagem dos cabos utilizados.

Seção Transversal	Resistividade do Cobre Corrigida	r ₁	r ₂	a	b	Permissividade Corrigida	r ₃	r ₄
(mm ²)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)
50	2.83	4.00	12.80	4.4	12.4	2.58	13.11	15.00
95	2.92	5.60	14.40	6	14	2.56	14.67	18.50
120	2.93	6.30	15.10	6.7	14.7	2.56	15.36	19.50
150	2.98	7.10	15.90	7.5	15.5	2.55	16.25	20.50
185	2.99	7.90	16.70	8.3	16.3	2.55	17.03	21.00
240	3.02	9.05	17.85	9.45	17.45	2.55	18.16	22.50
300	3.07	10.20	19.00	10.6	18.6	2.54	19.29	24.00
400	2.98	11.60	20.40	12	20	2.54	20.67	25.50
500	3.04	13.10	22.20	13.65	21.65	2.63	22.45	27.00
630	3.12	14.90	24.00	15.45	23.45	2.63	24.23	29.00
800	3.14	16.85	25.95	17.4	25.4	2.63	26.16	31.50
1000	3.18	18.95	28.05	19.5	27.5	2.62	28.25	33.50

5.2 Verificação da Velocidade da Onda Viajante

De acordo com o descrito na seção 3.2, a velocidade da onda viajante em um cabo ideal é calculada pela seguinte equação:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad [m/s] \quad (43)$$

A informação contida no Guia de Usuário dos cabos XLPE da ABB diz que a permissividade relativa do material isolante vale $\epsilon_r = 2.3$. A permeabilidade relativa utilizada foi $\mu_r = 1$, o que resulta em uma velocidade da onda viajante teórica de:

$$v = \frac{300}{\sqrt{2.3}} = 197.8 \quad [m/\mu s] \quad (44)$$

Para validar o cálculo, 2 cabos diferentes foram energizados no software PSCAD, um de 500 mm² e 500 m de comprimento, e o outro de 50mm² e 800m de comprimento. O passo de integração utilizado na simulação foi de 0,2 μs . Os tempos de percurso observados foram:

5. Simulações

tabela 5.4: Verificação da velocidade da onda viajante.

DADOS DO CABO		TEMPO DE TRÂNSITO	VELOCIDADE RESULTANTE
SEÇÃO TRANSVERSAL	COMPRIMENTO		
50 mm ²	800 m	3.999 μs	200 m/ μs
500 mm ²	500 m	2.394 μs	208 m/ μs

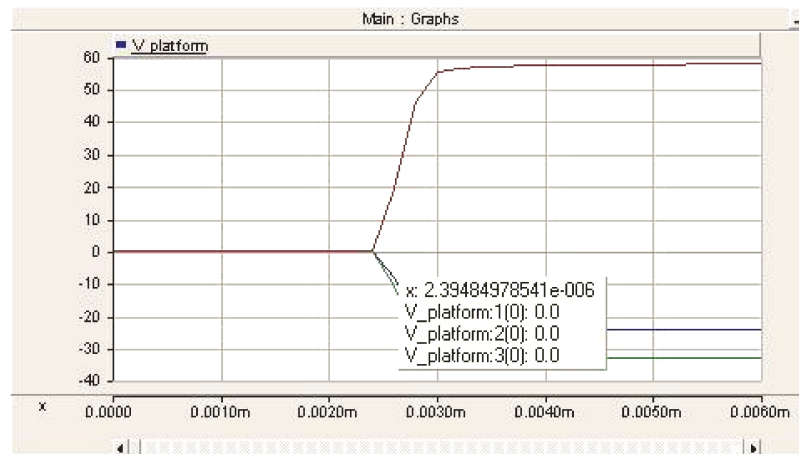


figura 5.5: Tempo de trânsito para onda viajante de tensão, cabo de 500mm², 500m de comprimento.

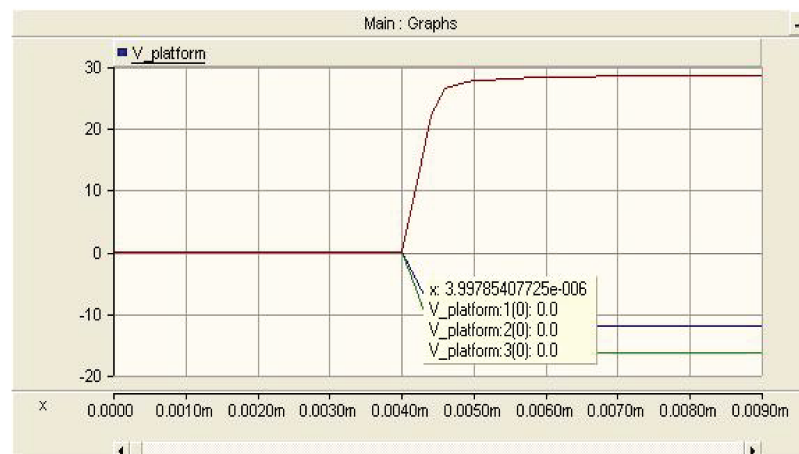


figura 5.6: Tempo de trânsito para onda viajante de tensão, cabo de 50mm², 800m de comprimento.

Levando em consideração o passo de integração utilizado, o modelo pode ser considerado como suficientemente preciso para os estudos de fenômenos transitórios.

5.3 Medição da Impedância Característica

Como o nível de tensão da rede coletora considerado nesta análise é 36kV, o modelo do cabo de 50mm² foi construído mesclando-se as informações construtivas contidas em [13] para o nível de tensão de 20kV e a espessura de isolamento de 8 mm, a mesma usada em cabos para 45kV.

A energização deste modelo do cabo no PSCAD nos permitiu medir a sua impedância característica, conforme segue:

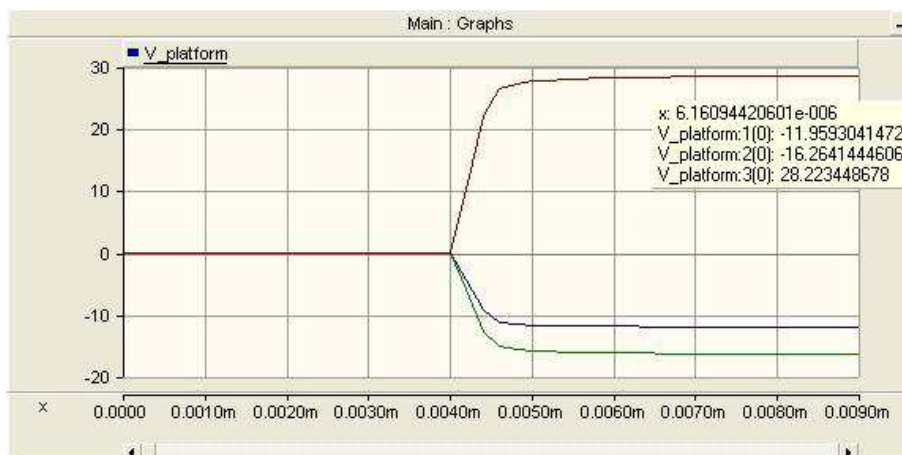


figura 5.7: Onda de tensão durante a energização do modelo do cabo de 50mm².

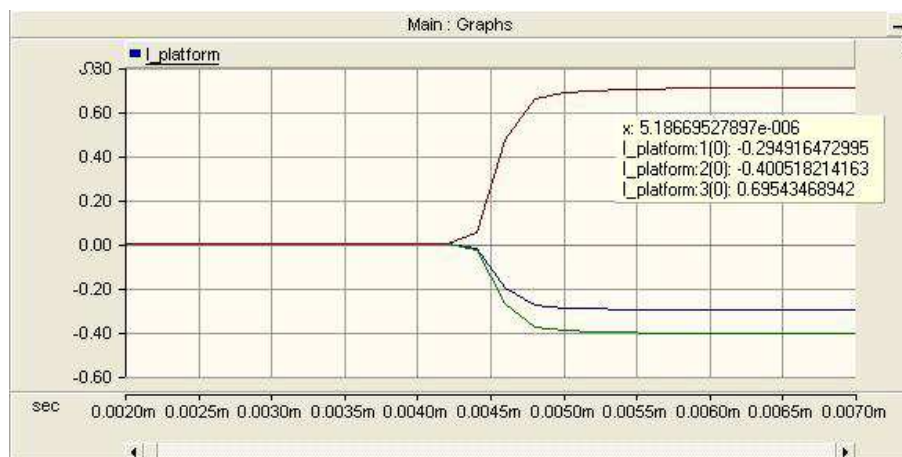


figura 5.8: Onda de corrente durante a energização do modelo do cabo de 50mm².

A impedância característica pode ser medida via simulação como a proporção entre as amplitudes das ondas de tensão e corrente durante o transitório de energização. De acordo com os cálculos mostrados na tabela abaixo, o valor de 40Ω foi assumido.

5. Simulações

tabela 5.5: Medição via simulação da impedância característica do cabo de 50mm².

	Tensão Medida	Corrente Medida	Impedância Característica
fase 1	-11.95 kV	-0.29 kA	41.20 Ω
fase 2	-16.26 kV	-0.40 kA	40.65 Ω
fase 3	28.22 kV	0.69 kA	40.89 Ω

5.4 Verificação de Configurações Seleccionadas

Algumas das configurações estudadas foram simuladas no software PSCAD, com o intuito de validar as análises já feitas e observar o efeito de todas as reflexões e refrações geradas pelo processo de energização.

O modelo do PSCAD leva em consideração o tempo de subida das ondas viajantes de tensão, a atenuação e perdas dos cabos utilizados, aspectos que não foram considerados nas análises do Capítulo 4. Os resultados obtidos são mostrados e discutidos a seguir.

5.4.1 F1_W4: 1 alimentador, 4 geradores

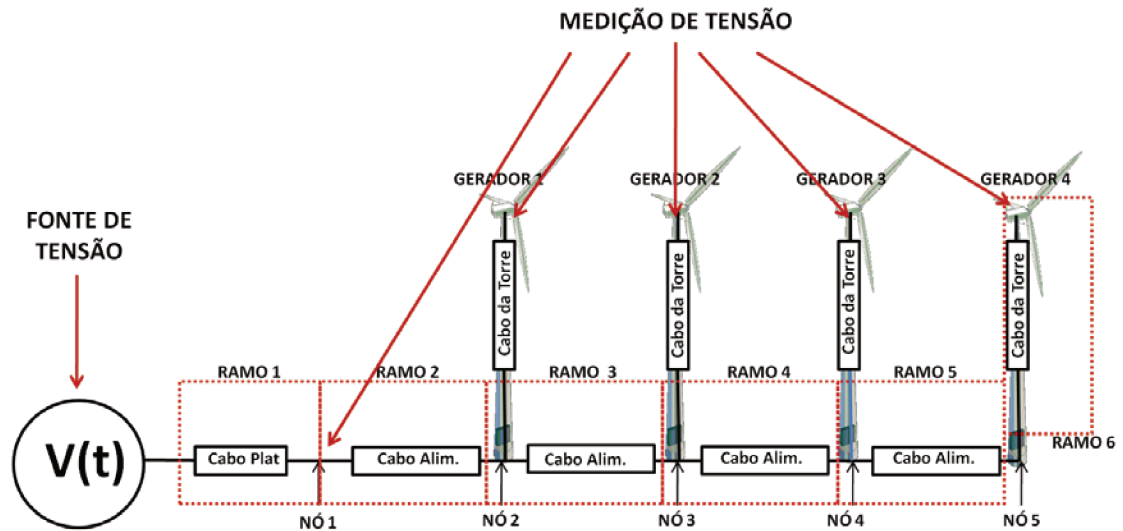


figura 5.9: Configuração da simulação – caso F1_W4.

Referindo-se à figura acima, a tensão foi medida nos terminais de alta tensão dos transformadores do tipo seco localizados nos topos das torres, e no nó entre o cabo da plataforma e o início dos alimentadores. Neste caso, todos os cabos são de 50mm², e os comprimentos são os mesmos descritos na seção 4.3.3.2. O disjuntor

foi fechado no instante $t=3\text{ms}$, momento no qual a tensão da fase 2 encontra-se no seu pico.

A primeira figura (figura 5.10) mostra o transitório de tensão atingindo o nó1. Como não há reflexão neste ponto (os dois cabos são idênticos), estes valores foram assumidos como sendo o valor da onda de tensão incidente V_1 (12.25, -25.29 e 13.04 kV) para as fases 1, 2 e 3 respectivamente.

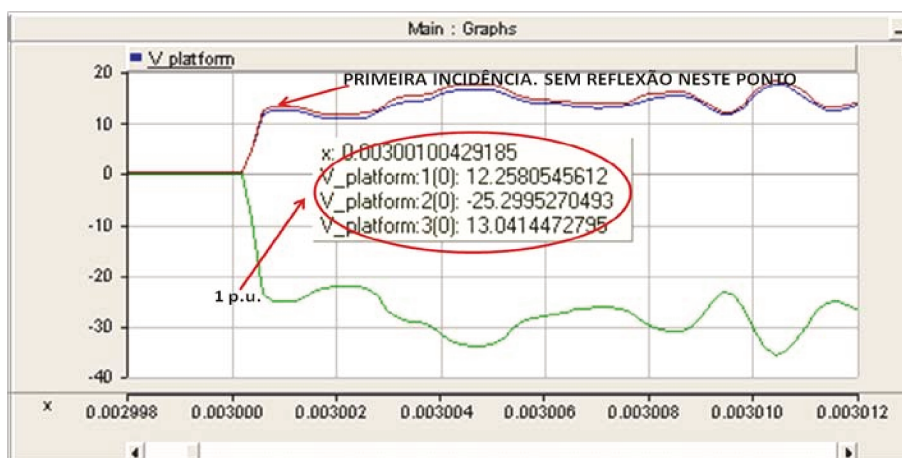


figura 5.10: Onda incidente no nó1.

A próxima figura (figura 5.11) mostra a forma de onda do transitório nos terminais do transformador na primeira torre, e o valor máximo atingido pela tensão nas três fases (tensão nominal de 36kV).

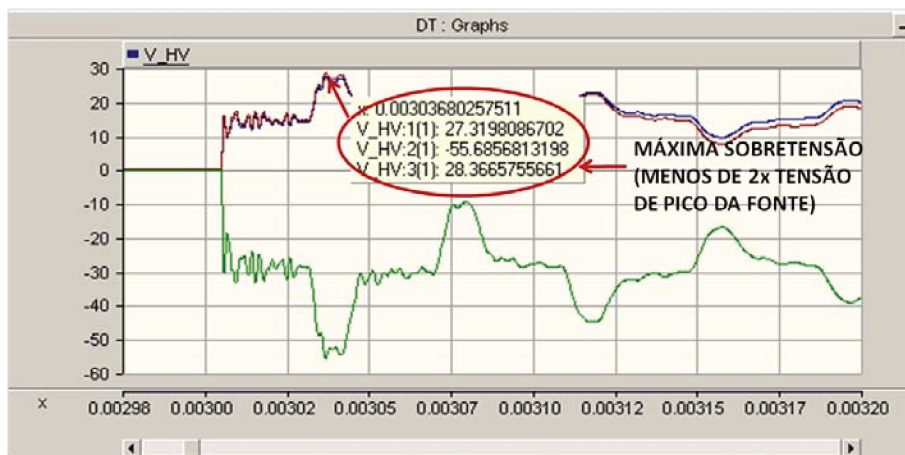


figura 5.11: Transitório no topo da torre 1.

A terceira figura (figura 5.12) mostra as primeiras reflexões. Tomando por base o atraso entre os degraus de tensão e o sinal da onda de tensão incidente (positiva

5. Simulações

se a tensão aumenta, e negativa se a tensão diminui) pode ser deduzido o local onde a reflexão se originou.

De acordo com esta lógica, o primeiro degrau refere-se à primeira incidência, pois acontece $5,5\mu\text{s}$ após o fechamento do disjuntor (em $t = 3\text{ms}$), exatamente o tempo necessário para a onda viajante cruzar os 900 metros entre a plataforma e o primeiro alimentador, mais a altura da torre. As oscilações de maior frequência ao redor deste degrau de tensão referem-se às reflexões no cabo da torre e nos ramos adjacentes.

O segundo degrau significativo de tensão ocorre $33\ \mu\text{s}$ após o fechamento do disjuntor, ou $27,5\ \mu\text{s}$ após o primeiro degrau, o que indica que a reflexão vem da última torre (fim do alimentador).

Isso é uma evidência da ocorrência de interferência construtiva ao longo de todo o alimentador. De acordo com a teoria desenvolvida no capítulo 4, quando a onda viajante atinge a base de uma torre, apenas $2/3$ dela continua viajando pela próxima seção de alimentador. Este fenômeno acontece 4 vezes até que a onda atinja o ponto inicial novamente, e após 4 amortecimentos desta ordem somente uma pequena parcela do transitório inicial deveria ser visto nos terminais do transformador da primeira torre novamente. O que deve ser levado em consideração neste caso é que cada vez que o transitório é refratado para a próxima porção do cabo do alimentador, uma onda viajante idêntica é iniciada no cabo da torre correspondente. Após menos de $1\ \mu\text{s}$ esta onda, 100% refletida nos terminais do transformador, é refratada na base da torre novamente, na mesma direção que a primeira (agora com valor $4/9$). Devido à distorção e ao tempo de subida dos degraus de tensão representados pela simulação, estas duas ondas viajantes com pequeno atraso não podem ser distinguidas claramente nos gráficos, mas o valor de tensão atingido é uma evidência da sua ocorrência.

Por fim, pode ser dito que, se um transitório de tensão de 1 p.u. atinge o primeiro ponto de derivação, imediatamente $2/3$ dele começa a viajar em direção ao segundo nó, e $2/3$ viaja em direção ao topo da torre. Após menos de $1\ \mu\text{s}$, este segundo transitório é refratado novamente e começa a seguir o primeiro, com magnitude $(2/3)*(2/3)=4/9$. Considerando que estas duas ondas viajantes atinjam o próximo nó praticamente ao mesmo tempo (atraso entre elas de menos de $1\ \mu\text{s}$), a amplitude do transitório de tensão que atinge o nó será sempre em torno de 1 p.u. ($2/3 + 4/9 = 10/9$), e é por isso que ele pode ser visto no nó 1 mesmo após ser refratado 5 vezes.

O terceiro degrau de tensão, desta vez de sinal negativo, acontece $10\ \mu\text{s}$ após o segundo, e corresponde a $2/3$ (valor do coeficiente de refração no nó) do aproximadamente 1 p.u. que foi refletido na fonte de tensão, onde o coeficiente de reflexão vale -1. Este ciclo (o transitório de tensão indo da fonte de tensão até o final do alimentador e de volta ao ponto inicial) é repetido diversas vezes. Cada vez que ele acontece, a amplitude sofre um amortecimento em torno de $1/3$ em módulo, e alterna o sinal. Após alguns ciclos, o transitório desaparece.

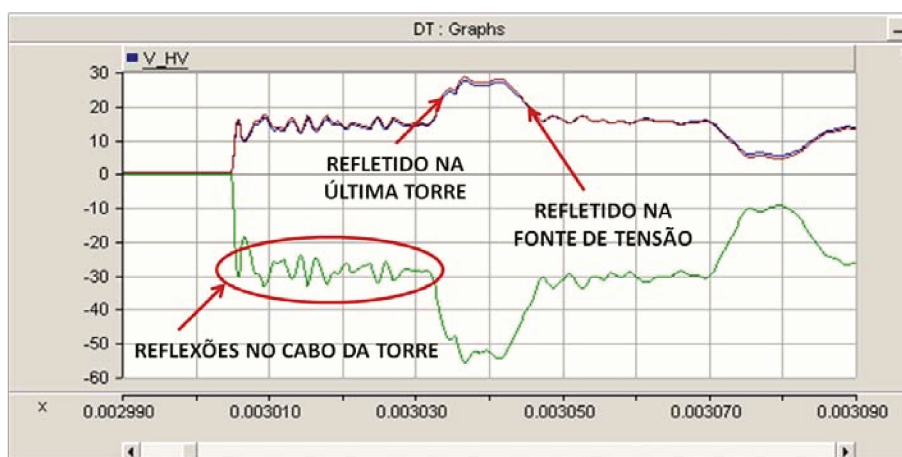


figura 5.12: Primeiro ciclo de reflexões.

As próximas 4 figuras (figuras 5.13 a 5.16) mostram a primeira frente de onda incidindo nos terminais dos 4 transformadores no topo das torres. Os valores medidos correspondem ao dobro da amplitude da onda viajante que atinge aquele ponto, (devido ao coeficiente de reflexão nestes pontos, que vale 1).

A tabela 5.6 abaixo mostra a redução na amplitude da onda viajante de aproximados 1/3 a cada nó (em comparação ao nó anterior), validando o cálculo dos coeficientes feito no capítulo anterior.

As diferenças de valores devem-se principalmente a atenuação (perdas joule nos cabos), mas a distorção da forma de onda também dificulta a identificação do instante exato, após o tempo de subida e antes da próxima incidência. Por isso, a escala do tempo foi usada como referência na maioria dos casos.

tabela 5.6: Primeiras refrações na rede – caso F1_W4.

GERADOR	TENSÃO (FASE 2)	ONDA INCIDENTE	EM RELAÇÃO A V_1 ($V_1 = -25.22$)	% DA ONDA INCIDENTE NO NÓ ANTERIOR	COEFICIENTE DE REFRAÇÃO CALCULADO
1	-30,32 kV	-15,16 kV	0,6011	0,6011	0,6667
2	-17,50 kV	-8,75 kV	0,3439	0,5771	0,6667
3	-9,32 kV	-4,66 kV	0,1847	0,5325	0,6667
4	-8,97 kV	-4,48 kV	0,1776	0,9613	1,0000

5. Simulações

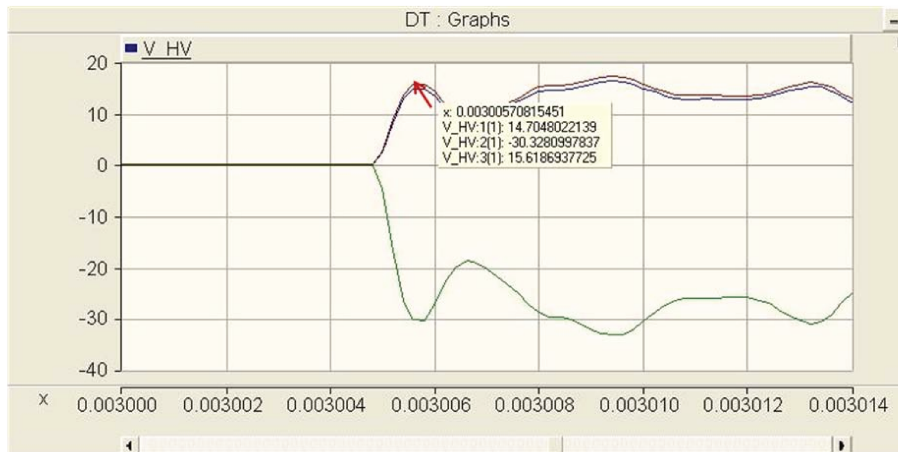


figura 5.13: Primeira incidência no gerador 1.

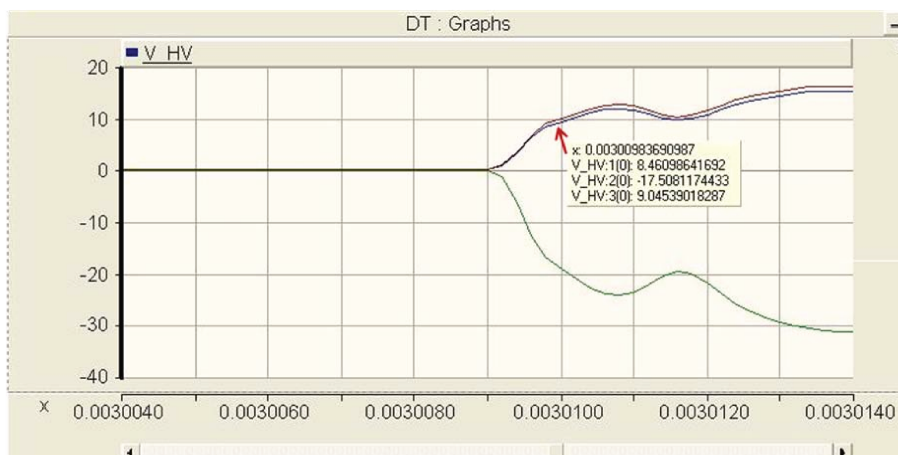


figura 5.14: Primeira incidência no gerador 2.

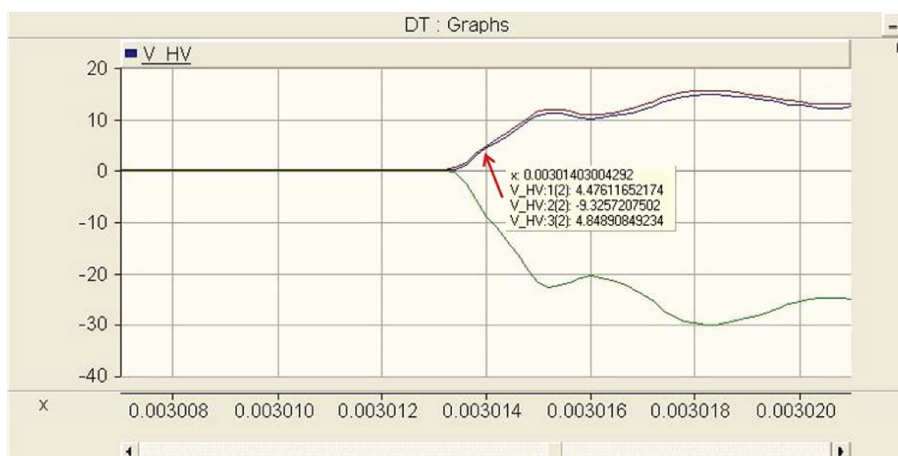


figura 5.15: Primeira incidência no gerador 3.

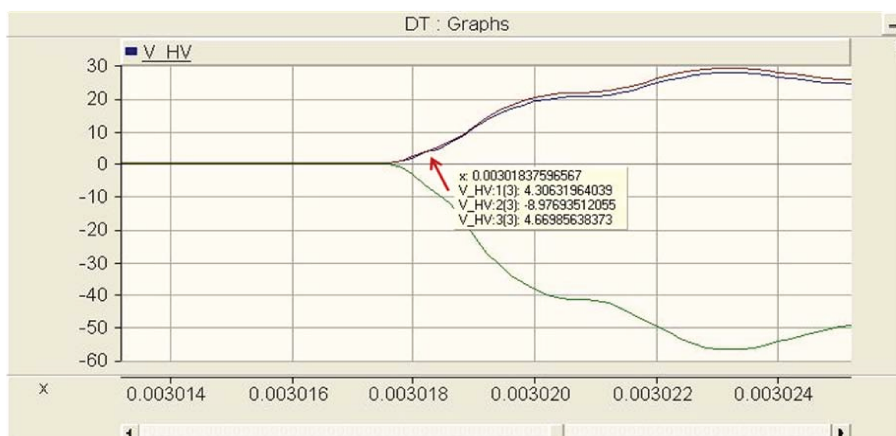


figura 5.16: Primeira incidência no gerador 4.

5.4.2 F9_W9: 9 alimentadores, 9 geradores por alimentador

Alguns cálculos foram feitos sobre o valor da amplitude da primeira onda incidente para validar o cálculo dos coeficientes feitos no capítulo 4 para os primeiros nós.

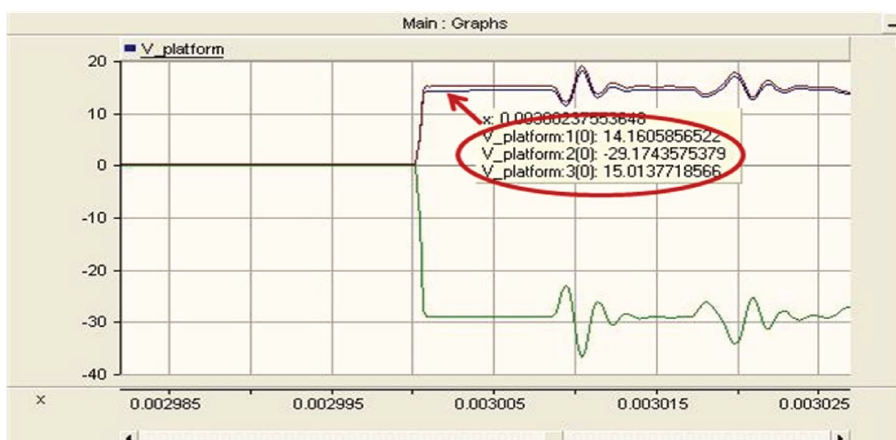


figura 5.17: Degrau de tensão de amplitude V_1 . Medições após o cabo da plataforma.

5. Simulações

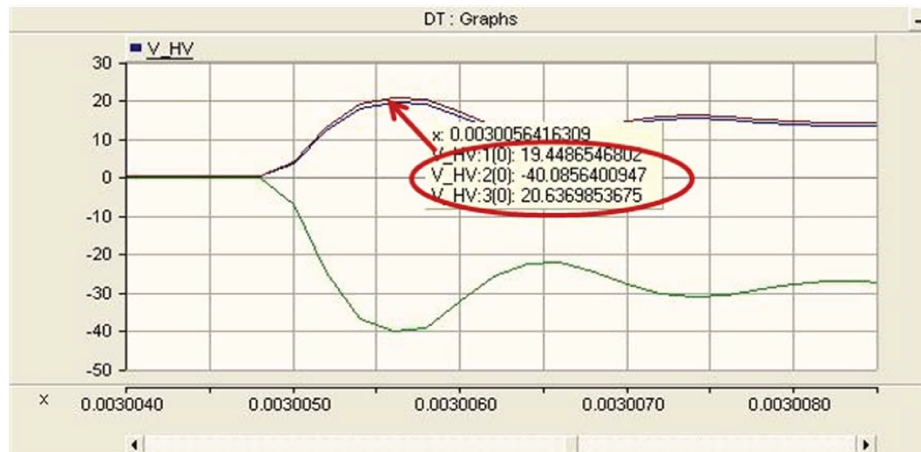


figura 5.18: Tensão nos terminais do transformador do gerador 1. Verificação do Coeficiente de Refração.

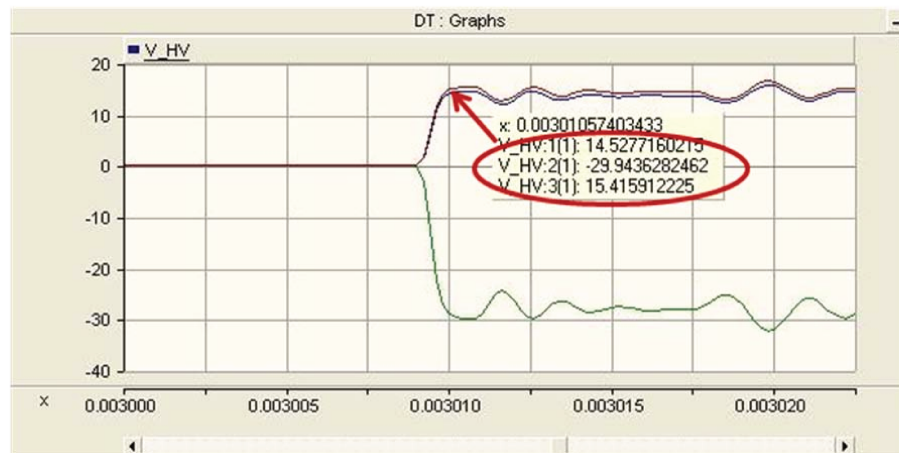


figura 5.19: Tensão nos terminais do transformador da torre 2.

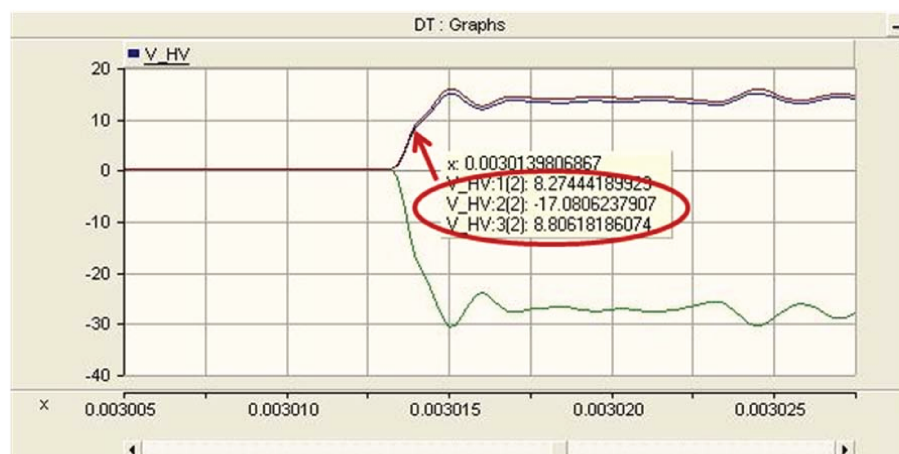


figura 5.20: Tensão nos terminais do transformador da torre 3.

tabela 5.7: Primeiras incidências nos nós da rede – caso F9_W9.

GERADOR	TENSÃO (FASE 2)	ONDA INCIDENTE	EM RELAÇÃO A V_1 ($V_1 = -29.17$ kV)	% DA ONDA INCIDENTE NO NÓ ANTERIOR	COEFICIENTE DE REFRAÇÃO CALCULADO
1	-40,08 kV	-20,04 kV	0,6870	0,6870	0,7772
2	-29,94kV	-14,97 kV	0,5131	0,7470	0,7772
3	-17,08 kV	-8,54 kV	0,2927	0,5704	0,7772

Os últimos gráficos (figuras 5.21 a 5.24) mostram as formas de onda dos transitórios de tensão como vistos em algumas torres. Eles são muito similares na forma, exceto pelo intervalo de tempo entre dois degraus de tensão significativos, pois estes variam de acordo com a distância entre o ponto de observação e a plataforma, assim como o final do alimentador. A explicação sobre o formato da onda é análoga à do caso F1_W4.

A máxima sobretensão ainda fica muito abaixo do NBI estabelecido em [2], de 150 kV.

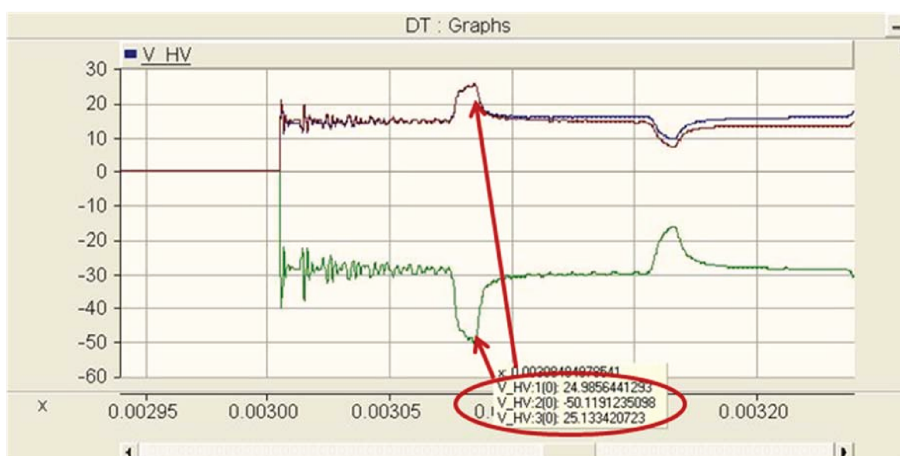


figura 5.21: Transitório de tensão visto nos terminais do transformador do gerador 1.

5. Simulações

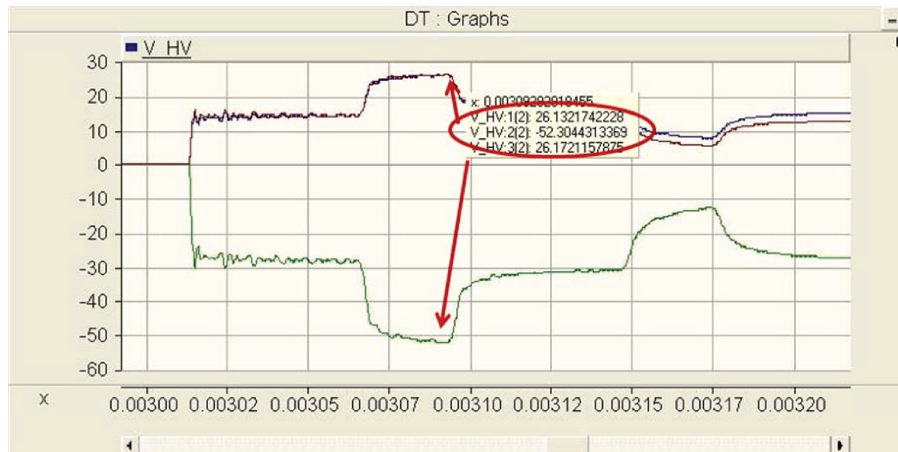


figura 5.22: Transitório de tensão visto nos terminais do transformador do gerador 3.

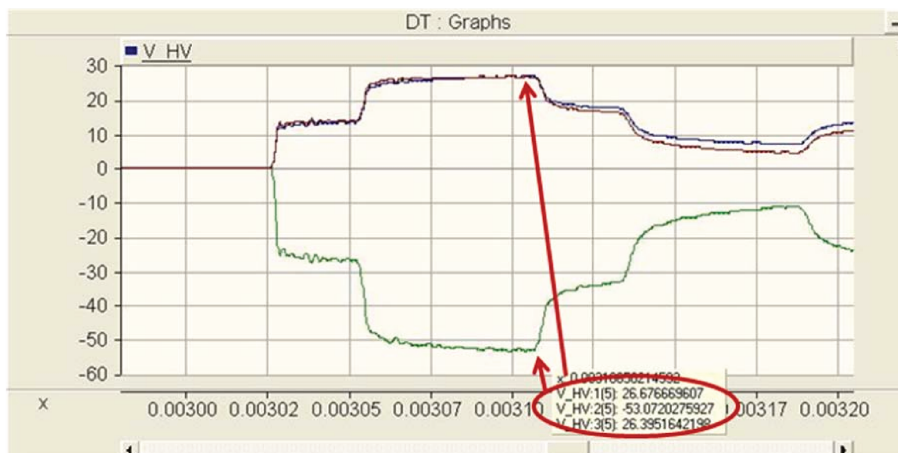


figura 5.23: Transitório na torre 6.

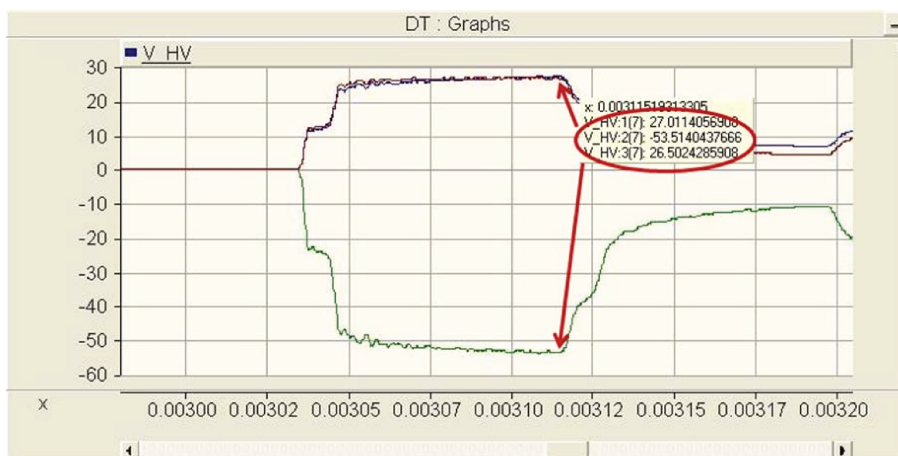


figura 5.24: Transitório na torre 8.

5.4.3 STAR_7: 7 Geradores, Cabos Conectados em Estrela

Devido à simetria da rede coletora, as formas de onda dos transitórios de tensão em todos os pontos de medição (terminais de transformadores e nó central) são praticamente idênticas. Enquanto o nó central é um ponto claro de ocorrência de interferência construtiva, em cada gerador também incidem as refrações de todas as ondas que atingem o nó central, assim como as reflexões ocorridas no cabo da própria torre.

A forma de onda do transitório pode ser explicada da seguinte maneira: quando a primeira onda viajante atinge o nó central, a primeira refração, de aproximadamente 0,3 p.u., começa a percorrer simultaneamente os cabos dos 7 geradores. Quando elas retornam ao nó central (após terem sido refletidas nos terminais dos transformadores), a segunda refração, apesar de ter um valor absoluto pequeno, é multiplicada por 6 (considerando que, neste momento, as reflexões do 7º gerador, de período menor, já desapareceram), e começa sua viagem em direção à fonte de tensão. Enquanto isso, as refrações secundárias são refletidas diversas vezes dentro da rede coletora, criando os primeiros degraus de tensão visíveis, todos de valor positivo.

É fácil pensar que, como o coeficiente de reflexão no nó central para ondas vindo do topo das torres é negativo, a magnitude dos degraus de tensão deveria ser alternada. Entretanto, para cada reflexão negativa, existem 5 outras refrações positivas oriundas dos outros cabos, tornando a resultante positiva em todas as torres.

As repetições deste ciclo vão aumentando o pico de tensão, até que a reflexão oriunda da fonte de tensão ($\alpha = -1$) atinge o nó central, desta vez como uma contribuição negativa. De início, ela contribui somente para diminuir a amplitude dos degraus de tensão, mas as reflexões secundárias desta incidência negativa tornam-se predominantes sobre as reflexões positivas anteriores, e logo a tensão começa a cair.

As próximas duas figuras (figuras 5.25 e 5.26) mostram as formas de onda dos transitórios de tensão nos transformadores das torres 1 a 6, e na plataforma. Os níveis de sobretensão atingidos não são perigosos para os equipamentos.

5. Simulações

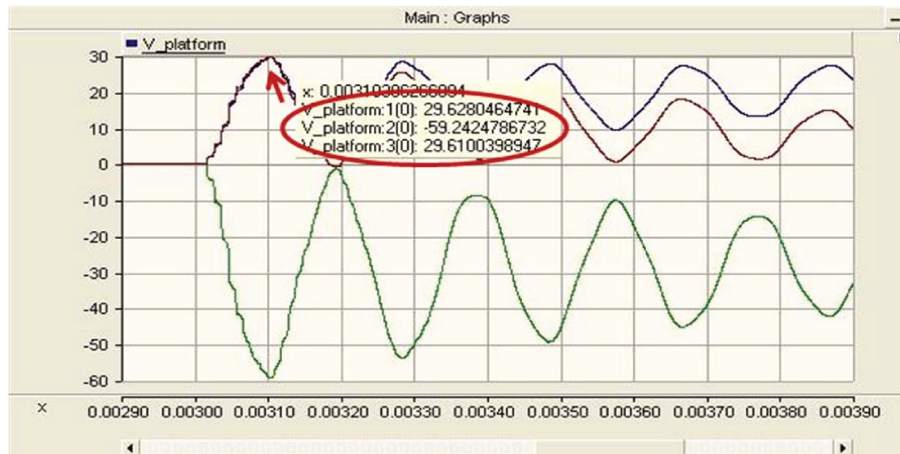


figura 5.25: Transiente de tensão na plataforma.

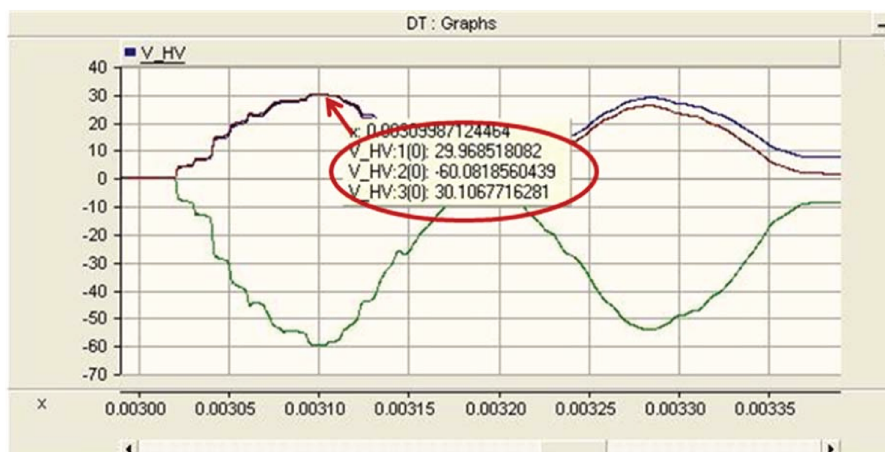


figura 5.26: Transiente de tensão nos terminais dos transformadores das torres 1 a 6.

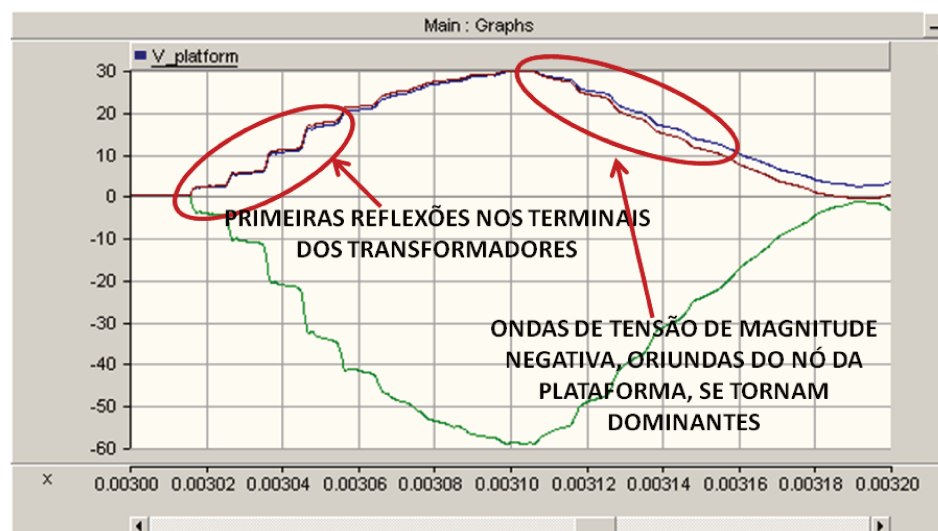


figura 5.27: Construção da forma de onda dos transientes.

5.5 Observações Conclusivas

Cálculo dos coeficientes: os resultados das simulações validam o cálculo dos coeficientes de reflexão e refração feitos no capítulo anterior.

Múltiplas reflexões e interferência construtiva: apesar das múltiplas reflexões e interferência construtiva terem se mostrado responsáveis por um aumento significativo nos níveis de sobretensão atingidos durante o período de energização das redes coletoras, esta manobra sozinha não se mostrou suficiente para criar níveis de tensão maiores que os limites padrão dos equipamentos. Mesmo no caso da rede em estrela, que parecia crítica, os valores máximos de tensão atingidos ainda ficaram muito abaixo do NBI recomendado pela norma de fabricação vigente [2].

5. Simulações

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A conclusão principal deste trabalho é de que somente a configuração da rede de cabos, mesmo com muitos pontos de reflexão e ocorrência de interferência construtiva, apesar de agir como um amplificador para algumas ondas viajantes originadas durante o processo de energização do PEM, não é suficiente para produzir uma sobretensão perigosa para os transformadores instalados nos topos das torres. Isso acontece porque as conexões usuais dos cabos nos pontos de derivação (bases das torres) e os valores típicos de impedância característica resultam em coeficientes de refração menores que 1 na grande maioria dos casos, muitas vezes até menores que 0,5, transformando sua ação em um filtro (ou atenuador) para os transitórios de tensão. Desta forma, enquanto as reflexões múltiplas e a interferência construtiva agem no sentido de aumentar o nível de tensão dos transitórios, as refrações consecutivas agem no sentido de amortecer as ondas viajantes, fazendo que a sobretensão resultante nunca chegue a níveis maiores que o NBI que os transformadores são construídos para suportar.

Algumas outras conclusões podem ser citadas:

Diferenças entre LT formadas por cabos nus e Redes Coletoras formadas por cabos isolados: comparando uma LT (formada por cabos nus) a uma rede coletora (formada por cabos isolados), pode ser dito que, apesar de na segunda a velocidade da onda viajante ser mais baixa (devido à permissividade relativa dos materiais isolantes ser maior que 1), as distâncias envolvidas são menores, resultando em menores tempos de percurso, e finalmente em transitórios de frequências mais elevadas.

Particularidades das Redes Coletoras: a conexão de cada torre na rede coletora gera um ponto de reflexão e refração. Como a conexão nas bases das torres é na verdade um ponto de derivação, a refração age nestes pontos como um multiplicador do transitório, que somado aos múltiplos pontos de reflexão torna comum a ocorrência de interferência construtiva ao longo de toda a rede.

Efeito da conexão de uma Rede de Cabos a uma LT: atenção especial deve ser dada a situações nas quais o fenômeno de refração age como um amplificador (coeficiente de refração maior que 1). Um exemplo é a conexão de uma LT a uma rede de cabos. Nestes casos, quando um transitório de tensão se propaga da rede de cabos para a LT (na qual a impedância característica pode ser 10 vezes maior) ele pode ser amplificado em até 100%, por isso a utilização de métodos de amortização de reflexões (e refrações) deve ser estudada.

Análise via Software: o software PSCAD mostrou precisão adequada para representar o fenômeno de transitório de tensão mesmo para tempos de percurso menores que 1 μ s. O menor passo de simulação utilizado foi de 0,2 μ s.

6.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros são sugeridas as seguintes análises:

1. Estudar o comportamento da rede coletora durante chaveamento de disjuntores por eliminação de falta de dentro ou de fora do PEM. É fácil pensar que, se o resultado das múltiplas reflexões foi uma sobretensão de aproximadamente 2 p.u. para as configurações estudadas, se alguma eliminação de falta hipotética sozinha gerar uma sobretensão de 3 p.u., as múltiplas reflexões levarão este valor para 6 p.u., o que seria danoso aos transformadores instalados nos topos das torres. Entretanto, não pode ser esquecido que é somente na energização, quando os transformadores estão descarregados, que eles se comportam como um circuito aberto, refletindo 100% das ondas viajantes de tensão que incidem sobre seus terminais. Isso torna necessária uma nova análise completa da configuração sob carga antes que qualquer conclusão seja tomada.
2. Estudar o impacto dos transitórios com alta taxa de subida quando atingem os enrolamentos dos transformadores e geradores, mas para isto um modelo construtivo preciso destes equipamentos seria necessário. Uma versão mais simples deste tópico seria medir o tempo de subida dos degraus de tensão resultantes e compará-lo com o limite de 1.2 μ s colocado para os ensaios de impulso sugeridos pelo IEEE em [2].
3. Simular a conexão dos geradores na rede, logo após a energização da rede coletora. Para isto seriam necessários alguns detalhes do protocolo operacional do PE (tais como ordem de sincronismo e critérios adotados), assim como detalhes técnicos das máquinas.

REFERÊNCIAS

- [1] General Requirements for Liquid Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers, IEEE Standard. C57.12.00-2006.
- [2] General Requirements for Dry Type Ventilated Distribution, Power and Regulating Transformers, IEEE Std. C57.12.01-2005.
- [3] http://ec.europa.eu/climateaction/eu_action/index_en.htm.
- [4] The European Wind Energy Association, “The European Wind Initiative, Wind power research and development for the next ten years”.
- [5] http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_1educacao/atlas/energia_eolica/5_6_energia.html, acessado em Janeiro de 2011.
- [6] http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20091214_1.pdf, , acessado em Janeiro de 2011.
- [7] <http://exame.abril.com.br/economia/meio-ambiente-e-energia/noticias/eolicas-dominam-leilao-energia-renovavel-590903>, , acessado em Janeiro de 2011.
- [8] <http://www.abeeolica.org.br/zpublisher/materias/Noticias.asp?id=19571>, , acessado em Janeiro de 2011.
- [9] http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=3246&id_area=, acessado em Janeiro de 2011.
- [10] The European Wind Energy Association, “The European Offshore Wind Industry – key trends and statistics: 1st half 2010”.
- [11] Commission of the European Communities, “Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions - Offshore Wind Energy: Action needed to deliver on the Energy Policy Objectives for 2020 and beyond”, Brussels, 13.11.2008..
- [12] The European Wind Energy Association (EWEA), “European Offshore Wind Map for 2009”, disponível em http://www.wind-eole.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Offshore/European_Offshore_Wind_Map_2009.pdf, acessado em Janeiro de 2011.

7. Referências

- [13] “ABB XLPE Cable User’s Guide”, Technical documentation, obtido em Maio de 2010 do site www.abb.com.
- [14] W. Sweet, “Danish turbines take unfortunate turn”, Spectrum, IEEE, vol. 41, Issue 11, pp. 30-34, Novembro de 2004.
- [15] M. Reza, H. Breder, “Cable System Transient Study, Vindforsk V-110. Experiments with switching transients and their mitigation in a windpower collection grid scale model”, Elforsk report 09:05, 2009.
- [16] M. Boyra, “Transient Overvoltage in Cable Systems, Part 2 – Experiments on fast transients in cable systems”, Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.
- [17] http://www.kavelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html, acessado em Janeiro de 2011.
- [18] B. Gustavsen, “Study of Transformer Resonant Overvoltages Caused by Cable-Transformer High-Frequency Interaction”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, No.2, Abril de 2010.
- [19] Manual do software PSCAD.
- [20] L. van der Sluis, “Transients in Power Systems”, John Wiley & Sons Ltd, Delft University of Technology, the Netherlands, 2001.
- [21] K. Srivastava, M. Reza, “Surge Mitigation Methods Comparison with PSCAD Model calibrated to Wind Laboratory Circuit”, Relatório Técnico, ABB Corporate Research, 2009.
- [22] T. Abdulahovic, M. Reza, “Analysis of High-Frequency Electrical Transients in Cable Systems”, Relatório Técnico, ABB Corporate Research, 2009.
- [23] A. Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, John Wiley & Sons Ltd, Unites States, 1991.
- [24] S. Bebre, A. Daniel, “Analysis of Transients in Wind Parks: Modelling of System Components and Experimental Verification”, Master of Science Thesis, Chamlers University of Technology, Göteborg, Swedes, 2007.
- [25] The European Wind Energy Association press room, “Offshore wind heads for record year”, disponível em [http://www.ewea.org/index.php?id=60&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=1865&tx_ttnews\[backPid\]=1&cHash=c0f89ca1cbe22ef183866d16d86d38a9](http://www.ewea.org/index.php?id=60&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=1865&tx_ttnews[backPid]=1&cHash=c0f89ca1cbe22ef183866d16d86d38a9), acessado em Janeiro de 2011.
- [26] L.C.Z.Junior, “Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência”, Edusp, 1ª Edição, 2003.
- [27] J. R. Cardoso, “Engenharia Eletromagnética”, Editora Campus, 1ª Edição, 2010.