

TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitor

Vahan Agopyan

Vice-reitor

Antonio Carlos Hernandez



EDITORA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Diretor-presidente

Lucas Antonio Moscato

COMISSÃO EDITORIAL

Presidente

Rubens Ricupero

Vice-presidente

Valeria De Marco

Carlos Alberto Ferreira Martins

Clodoaldo Grotta Ragazzo

Maria Angela Faggin Pereira Leite

Ricardo Pinto da Rocha

Tânia Tomé Martins de Castro

Suplentes

José Roberto Castilho Piqueira

Marta Maria Galdes Teixeira

Sandra Reimão

Editora-assistente

Carla Fernanda Fontana

Chefe Div. Editorial

Cristiane Silvestrin

TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Luiz Cera Zanetta Júnior

Copyright © 2003 by Luiz Cera Zanetta Júnior

1ª edição 2003

2ª edição revista 2020

Edição atualizada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Zanetta Júnior, Luiz Cera

Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência
/ Luiz Cera Zanetta Júnior. – 2. ed. rev. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020. – (Acadêmica; 52).

ISBN 978-85-314-1739-9

1. Circuitos elétricos. 2. Eletromagnetismo. 3. Energia elétrica – Sistemas. 4. Redes elétricas. 5. Transitórios (Elettricidade). I. Título. II. Série.

CDD-621.31921

Índices para catálogo sistemático:

1. Fenômenos transitórios em sistemas de potência:
Engenharia elétrica 621.31921
2. Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência:
Engenharia elétrica 621.31921

Direitos reservados à

Edusp – Editora da Universidade de São Paulo
Rua da Praça do Relógio, 109-A, Cidade Universitária
05508-050 – São Paulo – SP – Brasil
Divisão Comercial: tel. (11) 3091-4008 / 3091-4150
www.edusp.com.br – e-mail: edusp@usp.br

Printed in Brazil 2020

Foi feito o depósito legal

SUMÁRIO

PREFÁCIO	17
1. TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS ELEMENTARES	
E TRANSFORMADA DE LAPLACE	19
1.1 Introdução	19
1.2 Transformada de Laplace	20
1.2.1 Definição.....	20
1.2.2 Algumas Transformadas e Propriedades Elementares.....	20
1.2.3 Transformada de Laplace de Funções Periódicas	25
1.2.4 Inversão da Transformada de Laplace	26
1.3 Circuito <i>RL</i>	28
1.3.1 Circuito <i>RL</i> com Excitação Constante	28
1.3.2 Circuito <i>RL</i> com Excitação Senoidal	29
1.4 Circuito <i>LC</i> Livre.....	34
1.4.1 Análise sob o Ponto de Vista de Troca de Energia	34
1.4.2 Equacionamento do Circuito <i>LC</i> Livre pela Transformada de Laplace ..	35
1.4.3 Circuito <i>LC</i> Excitado com Tensão Constante (Degrau)	37
1.5 Circuito <i>RLC</i> Série com Excitação Senoidal	38
1.6 Análise de Redes Simples com Mais de uma Malha	49
1.6.1 Elementos Indutivos e Capacitivos com Condições Iniciais	49
1.6.2 Análise de Redes.....	51
1.7 Condições Ressonantes à Frequência Nominal	59
1.8 Referências Bibliográficas.....	61

2.	SÉRIE E TRANSFORMADA DE FOURIER.....	63
2.1	Introdução	63
2.2	A Série de Fourier	63
2.2.1	Decomposição em Série de Fourier.....	64
2.2.2	Transformação Inversa	71
2.2.3	Aplicação da Série de Fourier ao Estudo do Regime Permanente de Redes.....	72
2.3	Transformada de Fourier	77
2.3.1	Convolução e Sistemas Lineares	81
2.3.2	Algumas Propriedades da Transformada de Fourier	81
2.3.3	Fórmulas de Inversão	82
2.3.4	Algumas Transformadas Básicas	83
2.3.5	Transformada Modificada de Fourier	88
2.3.6	Parâmetros Variáveis com a Frequência.....	94
2.4	Referências Bibliográficas.....	96
3.	TRANSFORMADA Z.....	97
3.1	Introdução	97
3.2	Sistemas Discretos e Função de Transferência	97
3.3	Transformação Bilinear	101
3.4	Transformada Inversa – Resposta no Tempo.....	103
3.5	Referências Bibliográficas.....	107
4.	INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS LINEARES.....	109
4.1	Introdução	109
4.2	Descrição do Sistema em Espaço de Estados	110
4.3	Obtenção dos Autovalores e Autovetores da Matriz de Estados A	113
4.4	Decomposição Modal.....	114
4.4.1	Diagonalização da Matriz de Estados A	114
4.4.2	Obtenção da Função de Transferência com o Sistema Diagonalizado	115
4.4.3	Algumas Propriedades da Matriz Diagonalizada	116
4.5	Análise da Resposta no Tempo	119
4.5.1	Integração Numérica pela Regra Trapezoidal	119
4.5.2	Solução no Tempo por Diagonalização	119
4.5.3	Interpretação de Respostas Modais	120
4.6	Funções de Transferência e Representação Matricial.....	121
4.7	Exemplos de Aplicação em Redes Simples	121
4.8	Referências Bibliográficas.....	134
5.	CONVOLUÇÃO E RESPOSTA IMPULSIVA (FÓRMULAS RECURSIVAS)	135
5.1	Introdução	135
5.2	A Integral de Convolução	135
5.3	Resposta Impulsiva	137
5.4	Convolução Discreta	140

5.5	Cálculo da Integral de Convolução por Método Recursivo	143
5.6	Referências Bibliográficas.....	147
6.	PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS MONOFÁSICAS.....	149
6.1	Introdução	149
6.2	Equacionamento Básico.....	151
6.2.1	Modelo de Linha de Transmissão com Perdas	151
6.2.2	Modelo de Linhas de Transmissão sem Perdas	153
6.3	Impedância Característica em Linhas Sem Perdas – Impedância de Surto ...	156
6.4	Propagação de Ondas em Descontinuidades – Reflexão e Refração de Ondas ..	158
6.4.1	Linhas com Impedâncias Características Diferentes	158
6.4.2	Terminal de Linha com Impedância.....	162
6.4.3	Interpretação com o Equivalente de Thévenin	167
6.4.4	Descontinuidades em Série com a Linha de Transmissão.....	169
6.4.5	Propagação de Ondas por Ramificações	175
6.5	Representação de Não Linearidades	176
6.6	Diagrama de Trelças (Lattice)	185
6.7	Método de Bergeron.....	203
6.8	Regime Permanente em Linhas de Transmissão.....	204
6.9	Referências Bibliográficas.....	205
7.	PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS POLIFÁSICAS.....	207
7.1	Introdução	207
7.2	Elementos de Álgebra Matricial Aplicáveis em Propagações de Ondas Polifásicas	208
7.2.1	Obtenção da Matriz Exponencial e^{Ax}	208
7.2.2	Decomposição Modal	209
7.2.3	Propriedades de Matrizes Simétricas e Balanceadas	210
7.2.4	Diagonalização de um Produto de Matrizes Simétricas	211
7.3	Equacionamento em Componentes de Fase.....	213
7.3.1	Equacionamento Matricial	213
7.3.2	Matriz de Impedâncias Características	215
7.3.3	Análise no Domínio do Tempo para Linha Ideal (sem Perdas)	216
7.3.4	Propagação de Ondas Polifásicas em Descontinuidades	218
7.3.5	Equivalente de Thévenin em Circuitos Polifásicos.....	220
7.4	Equacionamento em Componentes Modais.....	222
7.4.1	Decomposição em Componentes Modais.....	222
7.4.2	Interpretação das Componentes Modais.....	225
7.4.3	Análise no Domínio do Tempo.....	230
7.4.4	Propagações em Descontinuidades com Componentes Modais	232
7.5	Método de Bergeron.....	249
7.6	Referências Bibliográficas.....	250
8.	SOLUÇÃO NUMÉRICA DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS.....	253
8.1	Introdução	253
8.2	Solução Transitória – Modelagem dos Componentes Elementares.....	254

8.2.1	Modelo para Indutância	254
8.2.2	Modelo para Capacitância	255
8.2.3	Modelo para Resistências	256
8.2.4	Circuito RL Monofásico	256
8.2.5	Modelos de Linhas	257
8.3	Solução de Transitórios com a Análise Nodal	264
8.4	Elementos Não Lineares	272
8.4.1	Elementos Resistivos	272
8.4.2	Elementos Indutivos	278
8.4.3	Conversão da Curva $V \times I$ (Valores Eficazes) em $\varphi \times i$ (Valores Instantâneos)	280
8.5	Representação de Chaves	284
8.6	Redes Polifásicas	287
8.6.1	Circuito Trifásico com Indutâncias Mútuas	287
8.6.2	Circuito Trifásico com Resistências e Indutâncias	289
8.6.3	Circuito Trifásico com Capacitâncias Acopladas	290
8.6.4	Resistências Acopladas	291
8.6.5	Linhas Trifásicas	292
8.7	Comentários sobre Erros Numéricos	298
8.8	Solução com a Transformada Z	302
8.9	Referências Bibliográficas	304
9.	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS COM A FREQUÊNCIA	305
9.1	Introdução	305
9.2	Energização de Linha de Transmissão em Vazio	306
9.3	Correspondência entre os Domínios do Tempo e da Frequência	311
9.4	Ajuste de Funções Racionais	318
9.5	Tratamento Numérico das Integrais de Convolução	323
9.5.1	Cálculo Recursivo	323
9.5.2	Cálculo Recursivo com a Transformada Z	329
9.6	Tratamento Modal com Matrizes Variando com a Frequência	330
9.6.1	Decomposição Espectral da Matriz de Propagação	331
9.6.2	Matrizes Variáveis com a Frequência em Componentes de Fase	333
9.7	Referências Bibliográficas	335
10.	ANÁLISE DO REGIME PERMANENTE E SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS....	337
10.1	Introdução	337
10.2	Energização de Linhas e Rejeição de Carga	338
10.2.1	Energização de Linhas	338
10.2.2	Rejeição de Carga	348
10.3	Curto-circuito	354
10.4	Fases Abertas em Linhas de Transmissão – Religamento	
	Monopolar e Polo Travado	361
10.4.1	Introdução	361
10.4.2	Representação da Rede	362

10.4.3	Modelo para Estudo do Religamento Monopolar – Abertura Monopolar	373
10.4.4	Modelo para o Estudo do Polo Travado	378
10.4.5	Aspectos de Estudos.....	379
10.5	Tensões Induzidas em Circuitos Paralelos	379
10.5.1	Generalidades	379
10.5.2	Modelagem do Acoplamento entre Circuitos	380
10.5.3	Circuitos com Compensação Reativa	382
10.5.4	Aspectos a Considerar em Estudos de Ressonância em Circuitos Paralelos	387
10.6	Análise de Resposta em Frequência de Redes.	390
10.6.1	Introdução.....	390
10.6.2	Modelagem dos Elementos da Rede	391
10.6.3	Efeitos da Circulação de Harmônicas	393
10.6.4	Saturação em Transformadores.....	394
10.6.5	Circuitos Retificadores	395
10.6.6	Filtragem de Harmônicas.....	399
10.7	Sobretensões Sustentadas Envolvendo Transformadores e Ferorressonância.....	404
10.7.1	Energização de Transformador e Rejeição de Carga	405
10.7.2	Ferorressonância.....	405
10.8	Referências Bibliográficas.....	419
11.	SOBRETENSÕES DE MANOBRA	421
11.1	Introdução	421
11.2	Aspectos Gerais.....	421
11.3	Energização e Religamento de Linhas.....	424
11.3.1	Energização	424
11.3.2	Religamento	429
11.3.3	Carga Residual para Abertura Tripolar	432
11.3.4	Resistor de Pré-inserção	437
11.4	Aplicação de Curto (Ocorrência de Faltas)	439
11.4.1	Sistema em Corrente Alternada	439
11.4.2	Linha em Corrente Contínua.....	441
11.5	Eliminação de Curtos (Faltas)	443
11.6	Rejeição de Carga.....	444
11.7	Energização de Transformadores	444
11.8	Manobras de Seccionadoras em Subestações Isoladas com Gás SF ₆	450
11.9	Referências Bibliográficas.....	452
12.	SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS.....	455
12.1	Introdução	455
12.2	Aspectos Gerais.....	457
12.2.1	Polaridade e Intensidade da Corrente.....	457
12.2.2	Frente de Onda e Tempo de Cauda	459
12.2.3	Ângulo de Inclinação	460

12.2.4	Densidade de Queda de Raios.....	460
12.2.5	Topografia e Características do Solo.....	461
12.3	Modelos para Cálculo de Sobretensões	461
12.3.1	Linhas e Cabos	461
12.3.2	Torres.....	461
12.3.3	Aterramento	463
12.3.4	Equipamentos	466
12.3.5	Modelo Eletrogeométrico	466
12.3.6	Suportabilidade do Isolamento	468
12.4	Estudos de Linhas de Transmissão.....	468
12.4.1	Local e Tipo de Queda.....	468
12.4.2	Queda Direta.....	468
12.4.3	Queda Indireta.....	469
12.4.4	Estudos com Para-raios de Linha.....	472
12.4.5	Tensões Induzidas.....	479
12.4.6	Cabos Subterrâneos	484
12.4.7	Efeito Corona.....	484
12.5	Estudos de Subestações	486
12.5.1	Subestações com Isolamento em Ar.....	488
12.5.2	Subestações Blindadas	492
12.6	Referências Bibliográficas.....	494
13.	TRANSITÓRIOS ENVOLVENDO BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO	497
13.1	Introdução	497
13.2	Sobretensões	498
13.2.1	Energização de um Banco de Capacitores.....	498
13.2.2	Energização com Carga Residual ou Reacendimento do Arco na Abertura de um Único Banco de Capacitores (Último Banco a Abrir) – <i>Restrike</i>	500
13.2.3	Sobretensões Transitórias na Abertura de Bancos de Capacitores – Reacendimento e Solicitações aos Para-raios	502
13.2.4	Manobras com Ampliação da Tensão	506
13.2.5	Sobretensões de Impulso Atmosférico	506
13.3	Sobrecorrentes.....	508
13.3.1	Solicitações de Sobrecorrentes	508
13.3.2	Energização do n-ésimo Banco ($n>1$) – Energização em <i>Back to Back</i>	508
13.3.3	Reacendimento na Abertura de um Banco de Capacitores	510
13.3.4	Curto-circuito	511
13.4	Circuitos Trifásicos	525
13.4.1	Abertura de Bancos de Capacitores	525
13.4.2	Fechamento de Chaves no Circuito Trifásico.....	530
13.5	Características Elétricas dos Equipamentos e Solicitações Transitórias.....	536
13.5.1	Disjuntores	536
13.5.2	Transformadores de Corrente	537

13.5.3	Bancos de Capacitores.....	538
13.5.4	Para-raios	538
13.6	Referências Bibliográficas.....	539
14.	TRANSITÓRIOS ENVOLVENDO BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE	541
14.1	Introdução	541
14.2	Esquemas de Proteção dos Bancos de Compensação em Série	542
14.2.1	Dispositivos de Proteção com Centelhadores.....	544
14.2.2	Dispositivos de Proteção com Para-raios de Óxido de Metal (<i>MOV</i>).....	545
14.3	Estudos em Redes com Bancos de Compensação em Série.....	545
14.3.1	Estudos dos Níveis de Disparo dos Centelhadores.....	545
14.3.2	Sobretensões de Reinserção com Centelhadores.....	547
14.3.3	Estudos com Elementos Não Lineares.....	552
14.4	Estudos Complementares	558
14.5	Referências Bibliográficas.....	560
15.	TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA.....	561
15.1	Introdução	561
15.1.1	A Natureza da Corrente de Curto	562
15.1.2	Extinção da Corrente de Curto	562
15.2	Tensão de Restabelecimento Transitória (<i>TRT</i>)	564
15.2.1	Componente de Regime Permanente	564
15.2.2	Componente Transitória.....	564
15.2.3	Sequência de Abertura dos Contatos.....	565
15.3	Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória (<i>TRT</i>)	565
15.3.1	Método de Injeção de Correntes e Princípio da Superposição	565
15.3.2	Método de Abertura de Chaves	568
15.4	Tensões de Restabelecimento Transitórias em Circuitos Indutivos Monofásicos	568
15.4.1	Interrupção da Corrente em Circuitos Puramente Indutivos.....	568
15.4.2	A Natureza Oscilatória dos Circuitos Predominantemente Indutivos	570
15.4.3	Tensão de Restabelecimento Transitória em Circuitos Amortecidos	576
15.5	Cálculo da <i>TRT</i> em Circuitos Trifásicos (Curto Terminal)	579
15.5.1	Estudo do Primeiro Polo a Abrir no Curto Trifásico Isolado na Saída de Linha	579
15.5.2	Curto Trifásico Isolado na Barra	583
15.5.3	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (<i>TCTRT</i>).....	584
15.5.4	Análise de Aberturas de Curtos Equilibrados com Componentes Simétricas.....	587
15.5.5	Propagação de Ondas.....	593
15.6	Curto Quilométrico.....	597
15.6.1	Interpretação no Domínio do Tempo	598

15.6.2	Interpretação no Domínio da Frequência.....	602
15.7	Comentários Sobre o Arco Elétrico, Curto Assimétrico e <i>TRTI</i>	603
15.7.1	Arco Elétrico	604
15.7.2	Corrente Assimétrica	604
15.7.3	Tensão de Restabelecimento Transitória Inicial (<i>TRTI</i>)	605
15.8	Tensão de Restabelecimento Transitória em Sistemas com Compensação em Série (<i>TRTI</i>)	605
15.9	Normas de Tensão de Restabelecimento Transitória.....	607
15.10	Referências Bibliográficas.....	609
16.	ARCO ELÉTRICO	611
16.1	Introdução	611
16.2	Aspectos Físicos do Arco Elétrico	611
16.2.1	Modelos Físicos	612
16.3	Algumas Características do Arco Elétrico.....	613
16.3.1	Características Estáticas	613
16.3.2	Comportamento Transitório	614
16.4	Modelos Tipo Caixa-Preta.....	615
16.4.1	Equacionamento Básico	616
16.4.2	Modelo de Cassie	617
16.4.3	Modelo de Mayr	618
16.5	Interrupção de Pequenas Correntes Indutivas.....	623
16.5.1	Modelo Dinâmico do Arco a Pequenas Perturbações.....	624
16.5.2	Estabilidade do Arco Elétrico a Pequenas Correntes.....	627
16.6	Arco Secundário	640
16.6.1	Modelos de Arco	641
16.6.2	Variáveis a Serem Levadas em Conta no Fenômeno da Extinção ..	642
16.6.3	Resultados Experimentais	643
16.7	Referências Bibliográficas.....	644
17.	PRINCÍPIOS DA COORDENAÇÃO DO ISOLAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUBESTAÇÕES	647
17.1	Introdução	647
17.2	Conceitos Probabilísticos Básicos	648
17.2.1	Conceitos Elementares.....	648
17.2.2	Função Densidade de Probabilidade e Função Distribuição	649
17.2.3	Função de Variável Aleatória	653
17.2.4	Densidades de Probabilidades e Distribuições com Duas Variáveis Aleatórias.....	655
17.3	Suportabilidades dos Meios Isolantes	656
17.3.1	Ensaio Dielétrico a Impulso Atmosférico e de Manobra	656
17.3.2	Isolamento.....	656
17.3.3	Suportabilidades a Impulsos para Isolamentos Autorrecuperantes.....	659
17.4	Métodos de Coordenação do Isolamento.....	663
17.4.1	Método Determinístico	665

17.4.2	Método Estatístico	665
17.4.3	Método Estatístico Simplificado	668
17.4.4	Aplicações dos Métodos de Coordenação do Isolamento	668
17.5	Coordenação do Isolamento de Subestações.....	669
17.5.1	Tensões à Frequência Nominal	670
17.5.2	Sobretensões Atmosféricas.....	670
17.5.3	Sobretensões de Manobra.....	671
17.6	Coordenação do Isolamento de Linhas de Transmissão.....	676
17.6.1	Coordenação do Isolamento a Surtos Atmosféricos	677
17.6.2	Coordenação do Isolamento a Surtos de Manobra	693
17.7	Referências Bibliográficas.....	699
18.	PARA-RAIOS.....	701
18.1	Introdução	701
18.2	Controle de Sobretensões – Aspectos Básicos.....	702
18.2.1	Interpretação com o Equivalente de Thévenin.....	702
18.2.2	Equivalente de Thévenin em Circuitos Trifásicos.....	705
18.3	Tipos e Características de Para-raios.....	706
18.3.1	Para-raios de Carboneto de Silício	706
18.3.2	Para-raios de Óxido Metálico (<i>MOV</i>)	707
18.4	Aplicação de Para-raios e Aspectos da Coordenação do Isolamento	711
18.4.1	Tensão Nominal	712
18.4.2	Níveis de Proteção	712
18.5	Atuação de Para-raios em Redes Elétricas	714
18.5.1	Representação dos Para-raios	714
18.5.2	Descargas de Bancos de Capacitores.....	715
18.5.3	Descargas de Linhas de Transmissão – Representação com Circuito π Distribuído	717
18.5.4	Representação de Linhas com Impedâncias de Surto	721
18.6	Referências Bibliográficas.....	733
	SOBRE O AUTOR.....	735

PREFÁCIO

Este trabalho dirige-se a alunos, professores e profissionais envolvidos com estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.

Embora o assunto pareça à primeira vista um pouco árido, procuramos tratá-lo em linguagem simples, embasada em conceitos da teoria de circuitos com parâmetros concentrados e em noções de propagação de ondas eletromagnéticas em circuitos com parâmetros distribuídos, passando dessa forma pelos fenômenos rapidamente variáveis no tempo.

Não foi nosso objetivo desenvolver aspectos avançados de transitórios eletromagnéticos, nem tampouco analisar aspectos tecnológicos de linhas ou de equipamentos, sujeitos a permanente evolução. Desse modo, publicações especializadas podem ser mais eficientes nessa abordagem.

Entretanto, ao tratarmos destes transitórios, é inevitável uma associação com os efeitos de tais fenômenos em equipamentos componentes de um sistema de potência, sem, contudo, desviarmo-nos do aspecto básico perseguido, sempre voltado para a compreensão dos princípios fundamentais dessas condições transitórias.

Nos capítulos iniciais, de 1 a 6, apresentamos conceitos básicos fundamentais de circuitos elétricos, de sistemas lineares e de propagação de ondas em linhas de transmissão. Desse modo foram condensadas nesses capítulos as informações essenciais para o tratamento de transitórios, assim como as transformadas básicas para o estudo de redes elétricas. Evidentemente, a literatura específica destes tópicos é abundante e mais profunda; no entanto, o propósito dessa síntese foi o de reunir as informações mínimas necessárias para o entendimento de diversos fenômenos e de modelagem de redes elétricas.

Em seguida, no capítulo 7, apresentamos conceitos de propagação de ondas em circuitos polifásicos, que constituem basicamente os sistemas de potência, e introduzimos, no capítulo 8, o método mais eficiente aplicado em programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos. No capítulo 9, tratamos a representação de parâmetros de linhas variáveis com a frequência, assunto até os dias de hoje, apesar dos esforços enviados, não plenamente consolidado.

No capítulo 10, analisamos as sobretensões sustentadas, ou condições em regime permanente de uma rede elétrica em situações de alterações estruturais da rede, provocadas por manobras ou curto-circuito. O domínio dessas condições é aspecto crucial na análise dos fenômenos transitórios. Nesse capítulo apresentamos ainda uma introdução ao complexo fenômeno de ferorressonância em sistemas de potência.

Nos capítulos de 11 a 15, apresentamos uma descrição geral dos principais fenômenos transitórios existentes em redes elétricas. Os de maior complexidade, que envolvem um grande número de equações diferenciais, são analisados nos seus aspectos fundamentais, ficando o cálculo sob responsabilidade dos programas em computador. Os mais simples são tratados analiticamente, como exemplo de aplicação das técnicas introduzidas nos capítulos iniciais. Todos esses fenômenos podem ser analisados com recursos computacionais, porém, o fato de enfatizarmos o tratamento analítico dessas condições transitórias prende-se a uma necessidade natural de interpretarmos, ao menos qualitativamente, os princípios destes fenômenos.

Descrevemos os fenômenos com frentes de ondas lentas (sobretensões de manobras) e rápidas (sobretensões de impulso atmosférico), assim como manobras envolvendo bancos de compensação derivada e série. São ainda tratados os tópicos referentes à abertura de disjuntores, no que diz respeito às tensões transitórias de restabelecimento.

No capítulo 16, apresentamos um resumo de informações sobre o comportamento do arco elétrico, equacionado apenas com os modelos básicos do tipo caixa preta, sem a complexidade das equações físicas do equilíbrio termodinâmico. Através destes modelos simples temos a noção fundamental do fenômeno de extinção do arco elétrico em linhas de transmissão e em disjuntores, enriquecendo de certa forma aspectos tratados no capítulo 15.

No capítulo 17, complementamos os capítulos que abordam as sobretensões no que concerne à organização dos procedimentos de engenharia para a definição de isolamentos sob a denominação conhecida de coordenação do isolamento.

Os para-raios são estudados no capítulo 18 por sua importância no controle de sobretensões e sua menção recorrente em diversos capítulos, sobretudo no capítulo 17.

No decorrer do texto, procuramos, na medida do possível, complementá-lo com exemplos que procuram esclarecer as exposições teóricas, sendo que soluções mais elegantes do que as aqui propostas certamente poderão ser encontradas.

Constitui-se em um texto básico para o estudante que pretende iniciar sua formação nos fenômenos transitórios e também para o profissional que busca o amadurecimento de ideias muitas vezes não completamente sedimentadas.

Diante da dimensão do tema, entendemos que especialistas podem valer-se de publicações técnicas mais específicas em aspectos que poderiam ter sido mais aprofundados. Alguns não o foram por limitação da extensão do texto e outros por merecerem ainda melhores estudos.

Esperamos que os resultados apresentados sejam úteis em novas investigações e interpretações dos fenômenos aqui discutidos e assim serão bem-vindas as críticas e sugestões que possam aprimorar o conteúdo deste trabalho.

* **

Esta segunda edição mantém a estrutura de capítulos da primeira. Algumas intervenções mais significativas e minuciosas visam tornar o texto mais elucidativo e preciso.

LANÇAMENTO 2019

JÁ DISPONÍVEL

LIVRARIA VIRTUAL

www.edusp.com.br/loja

LIVRARIAS

www.edusp.com.br/livrarias

INFORMAÇÕES

Divulgação Edusp

divulga@usp.br

