

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 Treliças (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 <i>RL</i> 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 <i>Z</i>	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 <i>Z</i>	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 Ferrorressonância.....	404
10.7.1	Energização de Transformador e Rejeição de Carga	405
10.7.2	Ferrorressonância	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 Reinscrição 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 Dielétricos 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