

IVO BARBI
DENIZAR CRUZ MARTINS

**ELETRÔNICA DE POTÊNCIA:
CONVERSORES CC-CC BÁSICOS
NÃO ISOLADOS**

Florianópolis
Edição dos Autores
2000

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA: CONVERSORES CC-CC BÁSICOS NÃO ISOLADOS

Ivo Barbi

Denizar Cruz Martins

Endereço: INEP – Instituto de Eletrônica de Potência
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
Caixa Postal 5119
88.040 – 970, Florianópolis – SC
Brasil
Fone: 0(xx)48-331.92.04
Fax: 0(xx)48-234.54.22
Internet: <http://www.inep.ufsc.br>
E-mail: ivo@inep.ufsc.br
denizar@inep.ufsc.br

CATALOGAÇÃO NA FONTE

B236e

Barbi, Ivo

Eletrônica de potência : conversores CC-CC básicos
não isolados / Ivo Barbi, Denizar Cruz Martins. –
Florianópolis : Ed. dos Autores, 2000.

377p. : il., grafs., tabs.

Inclui bibliografia.

1. Eletrônica de potência. 2. Conversores de corrente
elétrica. 3. Conversores estáticos. I. Martins, Denizar
Cruz. II. Título.

CDU: 621.314.22

Catálogo na fonte por: Onélia S. Guimarães CRB-14/071

AGRADECIMENTOS

Ao **Centro Tecnológico da UFSC**, pelo apoio à presente edição, permitindo a distribuição deste livro para as bibliotecas das Universidades Brasileiras que possuem cursos de Engenharia Elétrica.

Agradecemos especialmente o extraordinário esforço dedicado pelo Eng. **Luiz Cláudio Souza dos Santos** na preparação deste livro, incluindo as simulações, desenhos de figuras e curvas, e na digitação do texto. A sua competência e devoção ao trabalho serão sempre lembradas.

Desejamos também agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na revisão deste livro, em particular **aos alunos do curso de eletrônica de potência 2**, mestrado em créditos do ano de 2000, e graduação do 1º semestre de 2000 turma 841.

BIOGRAFIA DOS AUTORES

Ivo Barbi nasceu em Gaspar, Santa Catarina em 1949 Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1973. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1976 e o título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Institut National Polytechnique de Toulouse, França, em 1979. Fundou a Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência e o Instituto de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Santa Catarina. Desde 1992, é Editor Associado na área de Conversores Estáticos de Potência do IEEE Transactions on Industrial Electronics.

Denizar Cruz Martins nasceu em São Paulo, São Paulo em 1955. Formou-se em Engenharia Elétrica e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1978 e 1981, respectivamente. Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, França, em 1986. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

PREFÁCIO

A Eletrônica de Potência se tornou, nas últimas décadas, uma das áreas mais ativas da Engenharia Elétrica e Eletrônica, e se encontra hoje nas mais variadas atividades do campo tecnológico e científico ligado a Engenharia em geral; seja na conversão pura e simples de energia elétrica, ou no comando e controle de sistemas eletrônicos. Certas atividades que no passado, aparentemente, não necessitavam do seu conhecimento, hoje devem ao menos estar cientes dos efeitos causados pela Eletrônica de Potência. Cita-se como exemplo os engenheiros da área de Sistemas de Potência, que necessitam conhecer o comportamento que os Conversores Estáticos apresentam sobre a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, no que se refere a geração de reativos e a distorção das formas de onda de tensão e corrente.

A Eletrônica de Potência é fundamentalmente uma ciência, cujo objetivo básico é estudar os Conversores Estáticos. Esses Conversores são divididos em quatro categorias: conversores CC-CC, CC-CA, CA-CC e CA-CA. O material que ora se apresenta, tem como meta difundir, de forma simples, a teoria fundamental dos conversores CC-CC não isolados.

Atualmente, a maioria dos cursos de Engenharia Elétrica das Universidades brasileiras apresentam em seu programa a disciplina de Eletrônica de Potência, devido a grande procura que essa área desperta no setor industrial, principalmente o setor de "no-breaks", de fontes chaveadas e de acionamento de máquinas elétricas.

As novas tecnologias, como a miniaturização de componentes e a expansão de memórias em microprocessadores, facilitaram a proliferação da Eletrônica de Potência, por tornar os sistemas eletrônicos industriais mais simples, eficientes, baratos e mais acessíveis a todos os níveis da população. Essa questão foi fundamental para a popularização da Eletrônica de Potência em todos os países do mundo industrializado.

No século 21, teremos a oportunidade de observar o grande impacto da Eletrônica de Potência sobre a indústria de automação, de transporte, de transmissão e distribuição de energia elétrica, na conversão de energia, e no tratamento de energias renováveis como a eólica e a solar. Estamos no limiar de completar 100 anos de avanço da Eletrônica de potência, que teve seu início na indústria eletrônica. Durante todos esses anos a contribuição prestada pela Eletrônica de Potência, no desenvolvimento tecnológico mundial, é incontestável. Os programas aeroespaciais, aeronavais e a indústria de informática, de automação industrial, acionamento elétrico e controle de processos industriais, foram os mais beneficiados, devido,

principalmente, a concepção de fontes de alimentação mais performantes, de baixo peso e volume.

No seio da Eletrônica de Potência, os Conversores Estáticos CC-CC representam um ramo importante no progresso dessa ciência. Diante dessa constatação os autores sentiram a necessidade e a responsabilidade de gerar um material que pudesse ser utilizado para iniciar os estudos daqueles que estivessem interessados em ingressar nessa área da Engenharia Elétrica.

Este trabalho foi particularmente escrito para dar aos leitores noções das características básicas dos Conversores CC-CC não isolados, e permitir solidificar os conceitos fundamentais dessa ciência, procurando ampliar os seus horizontes para o amadurecimento de novas idéias.

Este livro é destinado essencialmente a estudantes de graduação dos cursos de Engenharia Elétrica e Eletrônica, e a estudantes de nível técnico dos cursos de Eletrotécnica e Eletrônica. Contudo, esta obra pode ser muito útil em cursos de pós graduação, no que se refere a introdução da teoria básica dos Conversores CC-CC não isolados. O livro serve também como referência para engenheiros envolvidos em projetos e aplicações de circuitos elétricos chaveados, exigindo como pré-requisitos o conhecimento de eletrônica básica e circuitos elétricos.

Outra preocupação desta obra é apresentar uma série de exercícios resolvidos e propostos, objetivando exercitar os principais conceitos discutidos durante o texto. Alguns exemplos orientam o leitor a desenvolver uma metodologia de cálculo que permita criar novos projetos de circuitos eletrônicos.

Com base nisso os autores esperam que esta obra possa ser útil a estudantes, profissionais e acadêmicos envolvidos com a área de Eletrônica de Potência.

Florianópolis, 21 de Julho de 2000
Ivo Barbi e Denizar Cruz Martins

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AOS CONVERSORES CC-CC

1.1. OBJETIVOS.....	1
1.2. DESCRIÇÃO FUNCIONAL E DEFINIÇÕES.....	1
1.3. VANTAGENS DO CONVERSOR CHAVEADO SOBRE O REGULADOR LINEAR.....	2
1.4. CLASSIFICAÇÃO DOS CONVERSORES CC-CC NÃO ISOLADOS QUANTO À TOPOLOGIA E AO GANHO ESTÁTICO.....	3
1.5. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À REVERSIBILIDADE.....	5
1.6. EXERCÍCIOS.....	6
1.6.1. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS.....	6
1.6.2. EXERCÍCIOS PROPOSTOS.....	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

CAPÍTULO 2

CONVERSOR CC-CC ABAIXADOR DE TENSÃO (BUCK)

2.1. INTRODUÇÃO.....	15
2.2. PRINCÍPIO DO CONVERSOR CC-CC ABAIXADOR COM CARGA RESISTIVA.....	15
2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO COM CARGA RLE.....	18
2.4. CONDUÇÃO CONTÍNUA E DESCONTÍNUA.....	21
2.5. ANÁLISE DO CONVERSOR BUCK EM CONDUÇÃO CONTÍNUA PARA CARGA RLE.....	22
2.5.1. RELAÇÕES ENTRE OS VALORES MÉDIOS.....	22
2.5.2. ONDULAÇÃO DA CORRENTE DE CARGA EMPREGANDO MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM).....	25
2.5.3. ESTUDO DA MODULAÇÃO POR VALORES EXTREMOS DA CORRENTE.....	30
2.6. ANÁLISE EM CONDUÇÃO DESCONTÍNUA PARA CARGA RLE.....	33
2.6.1. CÁLCULO DA TENSÃO E DA CORRENTE MÉDIA NA CARGA.....	33
2.6.2. DETERMINAÇÃO DA RAZÃO CÍCLICA DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUA D_{crit} EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONVERSOR (a, D, T/r).....	35
2.7. ESTUDO EM CONDUÇÃO CRÍTICA PARA CARGA RLE.....	36
2.8. CARACTERÍSTICA DE CARGA (CARGA RLE).....	38
2.9. CÁLCULO DA INDUTÂNCIA CRÍTICA.....	41

2.10. FILTRAGEM DA CORRENTE DE ENTRADA	42
2.11. FILTRAGEM DA TENSÃO DE SAÍDA	46
2.12. CONTROLE DO CONVERSOR BUCK EMPREGANDO MODULAÇÃO PWM	51
2.13. EXERCÍCIOS	52
2.13.1 EXERCÍCIOS RESOLVIDOS	52
2.13.2 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPÍTULO 3

CONVERSOR CC-CC ELEVADOR DE TENSÃO (BOOST)

3.1. INTRODUÇÃO	67
3.2. PRINCÍPIO DO CONVERSOR CC-CC ELEVADOR DE TENSÃO	67
3.2.1. ETAPAS DE FUNCIONAMENTO	68
3.2.2. CARACTERÍSTICA IDEAL DE TRANSFERÊNCIA ESTATICA DO CONVERSOR BOOST	69
3.3. OPERAÇÃO EM CONDUÇÃO CONTÍNUA	70
3.3.1. ONDULAÇÃO DA CORRENTE DE ENTRADA (ΔI)	73
3.3.2. ONDULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA (ΔV_o)	76
3.3.3. RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE MÉDIA DE SAÍDA (I_o) E A CORRENTE MÉDIA DE ENTRADA (I_{em})	78
3.4. OPERAÇÃO EM CONDUÇÃO DESCONTÍNUA	79
3.5. CONDUÇÃO CRÍTICA	82
3.6. CÁLCULO DA INDUTÂNCIA CRÍTICA (L_{cr})	86
3.7. CARACTERÍSTICA DE CARGA	86
3.8. FILTROS DE ENTRADA E DE SAÍDA	89
3.8.1. FILTRO DE ENTRADA (L)	89
3.8.2. FILTRO DE SAÍDA (C)	90
3.9. CONTROLE DO CONVERSOR BOOST EMPREGANDO MODULAÇÃO PWM	90
3.10. EXERCÍCIOS	91
3.10.1 EXERCÍCIOS RESOLVIDOS	91
3.10.2 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

CAPÍTULO 4

CONVERSOR CC-CC À ACUMULAÇÃO DE ENERGIA

4.1. INTRODUÇÃO	111
4.2. CONVERSOR CC-CC À ACUMULAÇÃO INDUTIVA (BUCK-BOOST)	111
4.2.1. INTRODUÇÃO	111
4.2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR BUCK-BOOST	112
4.2.3. OPERAÇÃO NO MODO DE CONDUÇÃO CONTÍNUA	115
4.2.3.1. DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE I_m e $I_{m\max}$	117
4.2.3.2. DETERMINAÇÃO DA ONDULAÇÃO DE CORRENTE ΔI_E DA ONDULAÇÃO DE TENSÃO ΔV_o NA SAÍDA DO CONVERSOR	118
4.2.4. OPERAÇÃO NO MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUA	119
4.2.5. OPERAÇÃO NO MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA	123
4.2.6. CARACTERÍSTICA DE CARGA	123
4.2.7. CONTROLE DO CONVERSOR BUCK-BOOST EMPREGANDO MODULAÇÃO PWM	127
4.3. CONVERSOR CC-CC À ACUMULAÇÃO CAPACITIVA (CONVERSOR CÚK)	127
4.3.1. INTRODUÇÃO	127
4.3.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E FORMAS DE ONDA	130
4.3.3. ANÁLISE QUANTITATIVA DE UM CIRCUITO PRÁTICO	132
4.3.3.1. DETERMINAÇÃO DAS ONDULAÇÕES DE CORRENTE	132
4.3.3.2. CÁLCULO DE ΔI_E (ONDULAÇÃO DA CORRENTE DE ENTRADA)	132
4.3.3.3. CÁLCULO DE ΔI_o (ONDULAÇÃO DA CORRENTE NO INDUTOR L_o)	135
4.3.3.4. DETERMINAÇÃO DAS ONDULAÇÕES DE TENSÃO	137
4.3.3.5. CÁLCULO DE ΔV_o (ONDULAÇÃO DE TENSÃO NO CAPACITOR C)	137
4.3.3.6. CÁLCULO DE ΔV_o (ONDULAÇÃO DE TENSÃO NA CARGA)	137
4.3.4. CARACTERÍSTICA DE CARGA	139
4.4. EXERCÍCIOS	143
4.4.1. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS	143
4.4.2. EXERCÍCIOS PROPOSTOS	165
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

CAPÍTULO 5

CONVERSOR CC-CC SEPIC

5.1. INTRODUÇÃO	171
5.2. ANÁLISE DO CONVERSOR CC-CC SEPIC EM REGIME PERMANENTE E MODO DE CONDUÇÃO CONTÍNUA	171
5.2.1. ETAPAS DE FUNCIONAMENTO E FORMAS DE ONDA	172
5.2.2. ANÁLISE MATEMÁTICA	173
a) BALANÇO DE ENERGIA	176
b) DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE CORRENTE	176
b.1 - CORRENTE MÉDIA DE ENTRADA (I_{Emd})	176
b.2 - CORRENTE MÉDIA NA INDUTÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO (I_{Lmag})	177
b.3 - RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE MÉDIA DE ENTRADA E A CORRENTE MÉDIA NA INDUTÂNCIA MAGNETIZANTE	177
b.4 - CORRENTE MÉDIA DE SAÍDA (I_o)	178
c) ONDULAÇÃO DA CORRENTE DE ENTRADA (ΔI_e)	179
d) ONDULAÇÃO DA CORRENTE NA INDUTÂNCIA MAGNETIZANTE (ΔI_{Lm})	180
e) CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA ESTÁTICA (G)	180
f) ONDULAÇÃO DE TENSÃO NOS CAPACITORES C E C_o	181
g) CORRENTES E TENSÕES MÉDIAS, EFICAZES E DE PICO NA CHAVE "S"	182
g.1 - CORRENTE MÉDIA NA CHAVE "S"	182
g.2 - CORRENTE DE PICO NA CHAVE "S"	184
g.3 - CORRENTE EFICAZ NA CHAVE "S"	185
g.4 - TENSÃO DE PICO NA CHAVE "S"	185
g.5 - TENSÃO MÉDIA NA CHAVE "S"	186
5.3. ANÁLISE DO CONVERSOR CC-CC SEPIC EM REGIME PERMANENTE E MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUA	187
5.3.1. ETAPAS DE FUNCIONAMENTO E FORMAS DE ONDA	187
5.3.2. ANÁLISE MATEMÁTICA	188
a) FORMA DE ONDA DA CORRENTE NO DIODO D	192
b) FORMA DE ONDA DA CORRENTE NA CHAVE "S"	193
c) DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO D1 E DA CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA ESTÁTICA	194
5.4. ANÁLISE DOS LIMITES DE CONDUÇÃO CONTÍNUA E DESCONTÍNUA DO CONVERSOR SEPIC EM REGIME PERMANENTE (CONDUÇÃO CRÍTICA)	196
5.5. CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA ESTÁTICA E CARACTERÍSTICA DE CARGA DO CONVERSOR SEPIC EM REGIME PERMANENTE	199
5.6. ANÁLISE DOS TEMPOS DE CONDUÇÃO E ABERTURA DA CHAVE DE POTÊNCIA NO MODO DE CONDUÇÃO CONTÍNUA	201
5.7. CONTROLE DO CONVERSOR SEPIC EMPREGANDO MODULAÇÃO PWM	204
5.8. COMENTÁRIOS	204

5.9. EXERCÍCIOS	206
5.9.1. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS	206
5.9.2. EXERCÍCIOS PROPOSTOS	231
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	235

CAPÍTULO 6

CONVERSOR CC-CC ZETA

6.1. INTRODUÇÃO	237
6.2. ANÁLISE DO CONVERSOR CC-CC ZETA NO MODO DE CONDUÇÃO CONTÍNUA EM REGIME PERMANENTE	237
6.2.1. ETAPAS DE FUNCIONAMENTO E FORMAS DE ONDA	239
6.2.2. EQUACIONAMENTO BÁSICO DO CONVERSOR	242
6.2.3. CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA ESTÁTICA	243
6.2.4. DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE CORRENTE	244
a) INDUTOR DE MAGNETIZAÇÃO L_m	244
b) INDUTOR DE SAÍDA L_o	246
c) CHAVES DE POTÊNCIA	247
6.2.5. ANÁLISE DA ONDULAÇÃO DE TENSÃO NOS CAPACITORES C E C_o	249
a) CAPACITOR DE ACOPLAMENTO C	249
b) CAPACITOR DE SAÍDA C_o	251
6.2.6. ANÁLISE DA ONDULAÇÃO DE CORRENTE NOS INDUTORES L_m E L_o	252
a) INDUTOR DE MAGNETIZAÇÃO L_m	253
b) INDUTOR DE FILTRAGEM L_o	253
6.2.7. DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO	254
a) CHAVES DE POTÊNCIA	254
b) CAPACITOR DE ACOPLAMENTO C	255
c) CAPACITOR DE FILTRAGEM C_o	256
6.2.8. VALORES MÉDIOS DE CORRENTE E TENSÃO NAS CHAVES DE POTÊNCIA	257
a) CHAVE "S" DE POTÊNCIA	257
b) DIODO "D" DE POTÊNCIA	258
6.2.9. DETERMINAÇÃO DOS VALORES EFICAZES DE CORRENTE	260
a) CORRENTE EFICAZ NA CHAVE "S"	261
b) CORRENTE EFICAZ NO DIODO D	262
c) CORRENTE EFICAZ NO CAPACITOR DE ACOPLAMENTO C	262
d) CORRENTE EFICAZ NO CAPACITOR DE SAÍDA C_o	263
6.3. ANÁLISE DO CONVERSOR CC-CC ZETA NO MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUA EM REGIME PERMANENTE	264
6.3.1. ETAPAS DE FUNCIONAMENTO E FORMAS DE ONDA	265
6.3.2. EQUACIONAMENTO BÁSICO DO CONVERSOR	266
6.3.3. CARACTERÍSTICA DE DESCONTINUIDADE DA CORRENTE	269
6.3.4. CORRENTE MÉDIA NA CHAVE "S"	270

6.3.5. BALANÇO DE ENERGIA E CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA ESTÁTICA	271
6.3.6. CORRENTE MÉDIA NO INDUTOR DE FILTRAGEM L_o E NO INDUTOR MAGNETIZANTE L_m	273
6.3.7. CORRENTE MÉDIA NA CARGA (I_o)	273
6.3.8. DETERMINAÇÃO DAS ONDULAÇÕES DE CORRENTE	274
a) ONDULAÇÃO DE CORRENTE NO INDUTOR DE MAGNETIZAÇÃO L_m (ΔI_{Lm})	274
b) ONDULAÇÃO DE CORRENTE NO INDUTOR DE SAÍDA L_o (ΔI_{Lo})	276
6.3.9. DETERMINAÇÃO DAS ONDULAÇÕES DE TENSÃO	276
a) ONDULAÇÃO DE TENSÃO NO CAPACITOR DE ACOPLAMENTO C_o	276
b) ONDULAÇÃO DE TENSÃO NO CAPACITOR DE SAÍDA C_o	278
6.3.10. DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE CORRENTE NAS CHAVES E INDUTORES	280
a) CHAVES DE POTÊNCIA	280
b) INDUTORES L_m e L_o	281
6.3.11. DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS DE TENSÃO NAS CHAVES DE POTÊNCIA	283
6.4. ANÁLISE DOS LIMITES DE CONDUÇÃO CONTÍNUA E DESCONTÍNUA DO CONVERSOR ZETA EM REGIME PERMANENTE (CONDUÇÃO CRÍTICA)	283
6.5. CARACTERÍSTICA DE CARGA DO CONVERSOR ZETA EM REGIME PERMANENTE	286
6.6. CONTROLE DO CONVERSOR ZETA EMPREGANDO MODULAÇÃO PWM	287
6.7. COMENTÁRIOS	291
6.8. EXERCÍCIOS	292
6.8.1. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS	292
6.8.2. EXERCÍCIOS PROPOSTOS	316
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	319

CAPÍTULO 7	
REVERSIBILIDADE DOS CONVERSORES CC-CC DIRETOS	
7.1. INTRODUÇÃO	321
7.2. CLASSIFICAÇÃO DOS CONVERSORES CC-CC QUANTO AO QUADRANTE DE OPERAÇÃO	321
7.3. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM CORRENTE	323
7.3.1. INTRODUÇÃO	323
7.3.2. MODOS DE FUNCIONAMENTO	325
7.4. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM TENSÃO	329

7.4.1. INTRODUÇÃO	329
7.4.2. MODOS DE FUNCIONAMENTO	330
a) FLUXO DE ENERGIA DE "E" PARA "E _m " (MODO DE OPERAÇÃO BUCK→TRAÇÃO)	330
b) FLUXO DE ENERGIA DE "E _m " PARA "E" (MODO DE OPERAÇÃO BOOST→FRENAGEM REGENERATIVA)	332
7.4.3. EQUACIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM TENSÃO	335
a) CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA ESTATICA	335
b) ONDULAÇÃO DA CORRENTE DE CARGA	336
c) ONDULAÇÃO RELATIVA DA CORRENTE DE CARGA	337
7.5. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM TENSÃO E CORRENTE	338
7.5.1. INTRODUÇÃO	338
7.5.2. MODOS DE FUNCIONAMENTO	339
a) FLUXO DE ENERGIA DE "E" PARA "E _m " (MODO DE OPERAÇÃO BUCK→TRAÇÃO)	339
b) FLUXO DE ENERGIA DE "E _m " PARA "E" (MODO DE OPERAÇÃO BOOST→FRENAGEM REGENERATIVA)	340
c) REVERSIBILIDADE NO SENTIDO DE GIRO DA MÁQUINA CC	342
7.5.3. CARACTERÍSTICA DE CARGA DO CONVERSOR CC-CC DE QUATRO QUADRANTES	345
7.6. EXERCÍCIOS	350
7.6.1. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS	350
7.6.2. EXERCÍCIOS PROPOSTOS	363
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	366
RESPOSTA DE ALGUNS EXERCÍCIOS PROPOSTOS	367