

REVERSIBILIDADE DOS CONVERSORES CC-CC DIRETOS

7.1. INTRODUÇÃO

Em engenharia elétrica há importantes aplicações onde se deseja controlar o fluxo de energia da fonte de alimentação para a carga e vice-versa. Como exemplo mais evidente dessas aplicações pode-se citar a tração elétrica, onde durante a frenagem da máquina a energia cinética armazenada nas massas em movimento é restituída à fonte na forma de energia elétrica.

Para essa operação emprega-se em geral um conversor CC-CC entre a fonte de alimentação e o motor de corrente contínua, conforme apresentado na Fig. 7.1.

Normalmente a máquina de corrente contínua é empregada com excitação separada, a fim de permitir a inversão da corrente de armadura, mantendo a corrente de campo no mesmo sentido. Esse procedimento gera um torque negativo que possibilita a frenagem regenerativa ou reversão do motor[1].

Na indústria destacam-se como aplicações que exigem conversores CC-CC reversíveis, o controle de posição e o acionamento de veículos elétricos.

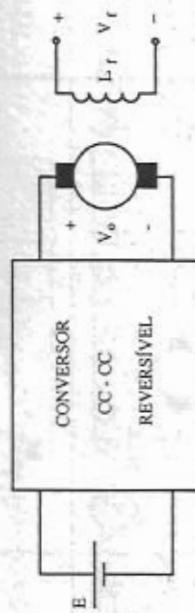


Fig. 7.1: Conversor CC-CC reversível alimentando a máquina de corrente contínua.

7.2. CLASSIFICAÇÃO DOS CONVERSORES CC-CC QUANTO AO QUADRANTE DE OPERAÇÃO

Os conversores CC-CC podem ser classificados de acordo com o número de quadrantes do plano tensão x corrente, no qual eles podem ser capazes de operar. As diferentes configurações dos conversores CC-CC e seus respectivos quadrantes de operação são mostrados na Tabela 7.1.

A configuração A opera no 1º quadrante. Esse quadrante se caracteriza por apresentar tensão média V_o e corrente média I_o positivas. Desse modo, o fluxo de

potência se dá da fonte para a carga. Essa configuração só pode ser usada para tração do motor CC, ela não apresenta reversibilidade e nem frenagem regenerativa.

TABELA 7.1: Configurações e quadrantes de operação

| QUADRANTE | CONFIGURAÇÃO | PLANO $V_o \times I_o$ |
|--|--------------|------------------------|
| PRIMEIRO QUADRANTE | (A) | |
| SEGUNDO QUADRANTE | (B) | |
| DOIS QUADRANTES REVERSIBILIDADE EM CORRENTE | (C) | |
| DOIS QUADRANTES REVERSIBILIDADE EM TENSÃO | (D) | |
| QUATRO QUADRANTES REVERSIBILIDADE EM TENSÃO E CORRENTE | (E) | |

No 2º quadrante a configuração B opera com corrente reversa, assim o fluxo de energia é invertido e vai da carga para a fonte. Durante esta operação ocorre a frenagem regenerativa da máquina.

A configuração C é obtida a partir da combinação das configurações A e B, podendo operar em dois quadrantes. A tensão V_o é sempre positiva enquanto que a corrente I_o pode ser invertida, invertendo-se o fluxo de energia. Portanto, essa configuração é usada tanto para a tração como para a frenagem regenerativa do motor CC.

A configuração D também opera em dois quadrantes. Neste caso a corrente I_o tem sempre o mesmo sentido, enquanto que a tensão V_o pode alterar a sua polaridade. Desde que I_o seja positiva e V_o reversível então o fluxo de energia pode ser invertido. Da mesma forma que na configuração C, esta configuração pode operar na tração ou na frenagem regenerativa do motor CC. Durante a frenagem regenerativa a polaridade da f.c.e.m. da máquina deve ser invertida.

A configuração E é a mais completa, podendo operar nos quatro quadrantes. Nesta situação tanto a tensão V_o como a corrente I_o podem ser invertidas. Esta configuração pode ser usada tanto na reversibilidade como na frenagem regenerativa da máquina.

As configurações A e B apresentam pouco interesse neste capítulo, tendo em vista operarem apenas em um quadrante. Essas estruturas representam na realidade os conversores Buck e Boost, já estudados nos capítulos 2 e 3. Assim, as configurações C, D e E apresentam maiores interesses no que se refere à reversibilidade dos conversores com regeneração de energia para a fonte de alimentação. Nos parágrafos que se seguem serão apresentados maiores detalhes referentes a essas configurações.

7.3. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM CORRENTE

7.3.1. INTRODUÇÃO

A reversibilidade em corrente é facilmente percebida quando se alimenta uma máquina de corrente contínua e deseja-se tração e frenagem, conforme é ilustrado na Fig. 7.2.

Durante a tração do motor a corrente circula de E para E_m (Fig. 7.2.b: energia transferida de E para E_m). Na frenagem regenerativa o motor atua como gerador, a corrente de armadura é invertida e circula de E_m para E (Fig. 7.2.a: energia transferida de E_m para E). Por essa razão se diz que há reversibilidade em corrente.

O princípio básico da reversibilidade em corrente dos conversores CC-CC é descrito como segue.

O torque de um motor de corrente contínua é dado pela Eq. (7.1).

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a \quad (7.1)$$

onde ϕ é o fluxo magnético produzido pelo enrolamento de campo, e I_a é a corrente de armadura. Utilizando-se um motor de corrente contínua com excitação independente e corrente de campo constante, pode-se então considerar o fluxo ϕ como uma constante. Logo:

$$T = K_a \cdot I_a \quad (7.2)$$

A potência mecânica da máquina resulta do produto entre o torque e a velocidade mecânica, isto é:

$$P_m = T \cdot \omega_m \quad (7.3)$$

A passagem de motor para gerador ocorre através da inversão da corrente de armadura, mantendo-se a corrente de campo constante. Assim, o torque do motor terá sentido invertido, o mesmo ocorrendo com a potência, conforme as Eqs. (7.2) e (7.3). A aplicação de uma potência negativa em um motor, que gira a uma certa velocidade resulta em uma frenagem forçada por um torque negativo (Fig. 7.2.a); portanto, para efetuar uma frenagem regenerativa sobre a máquina é necessário inverter o sinal do torque. Para se obter esse comportamento emprega-se a configuração C apresentada na Tab. 7.1.

A Fig. 7.3 mostra o conversor CC-CC reversível em corrente, onde a f.c.e.m. da máquina é representada por uma fonte CC constante.

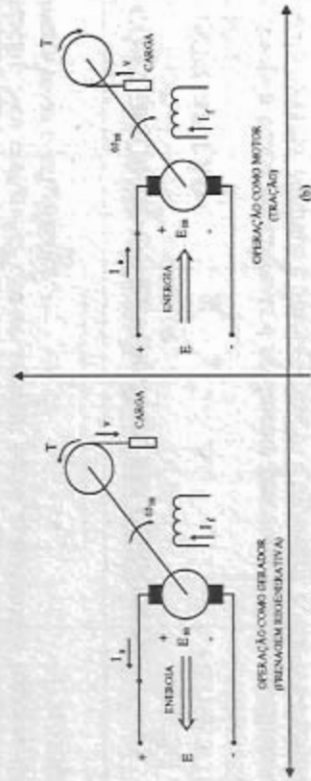


Fig. 7.2: Operação em dois quadrantes de uma máquina de corrente contínua.

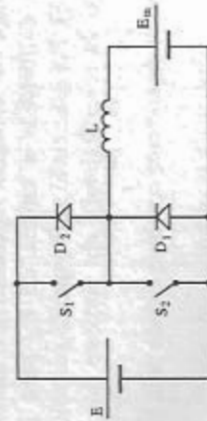


Fig. 7.3: Conversor CC-CC reversível em corrente.

7.3.2. MODOS DE FUNCIONAMENTO

Serão considerados três modos de funcionamento descritos a seguir:

1º MODO (TRACÇÃO): Seja o caso em que a chave S_2 é mantida permanentemente aberta e S_1 fecha e abre ciclicamente. Nesta situação existe duas etapas de funcionamento, representadas na Fig. 7.4. Na 1ª etapa a chave S_1 é fechada, e a fonte de alimentação E é conectada aos terminais da carga. Na 2ª etapa S_1 é aberta e a corrente de carga flui através do diodo de roda livre D_1 , sofrendo um decaimento (Fig. 7.5). De fato, analisando a Fig. 7.4, reencontra-se o conversor CC-CC abaixador (conversor Buck), já estudado no capítulo 2.

Neste 1º modo de funcionamento o fluxo de energia se dá da fonte E para a fonte E_m , ou seja, no caso da carga ser uma máquina de corrente contínua ela operaria como motor.

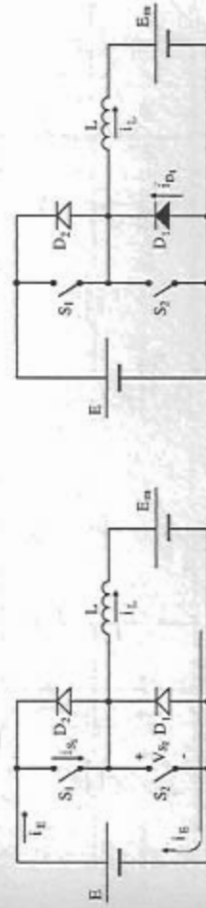


Fig. 7.4: Etapas de funcionamento para o 1º modo.

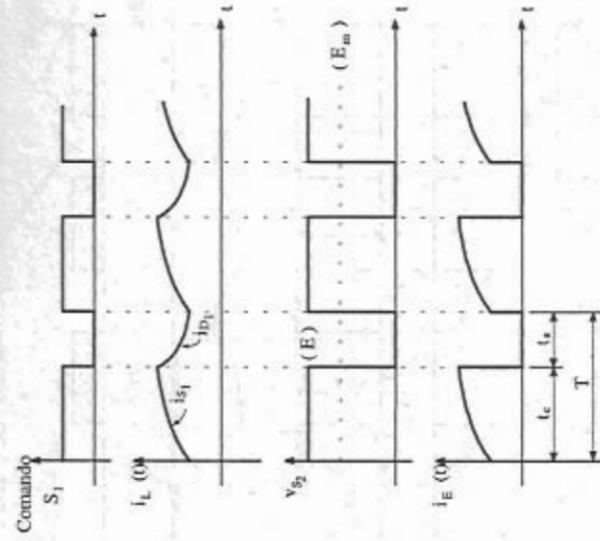


Fig. 7.5: Principais formas de onda.

2º MODO (FRENAGEM REGENERATIVA): Durante este modo de funcionamento, a chave S_1 é mantida permanentemente aberta e S_2 fecha e abre ciclicamente. Logo, a exemplo do 1º modo de operação, ocorrem também neste caso duas etapas de funcionamento representadas na Fig.7.6. Na 1ª etapa a chave S_2 está fechada, e há acumulação de energia na indutância L . Na 2ª etapa a chave S_2 está aberta, e a energia armazenada em L somada a energia da fonte E_m são desviadas para a fonte de alimentação E , através do diodo D_2 . Neste caso, reencontra-se o conversor CC-CC elevador (conversor Boost).

Neste 2º modo as correntes, tanto na fonte de alimentação E como na fonte E_m , são invertidas; consequentemente o fluxo de energia se dá da fonte E_m para a fonte de alimentação E , isso significa que na frenagem regenerativa a máquina de corrente contínua opera como gerador, onde a velocidade é diminuída, produzindo um decréscimo na tensão E_m . As principais formas de onda são apresentadas na Fig.7.7.

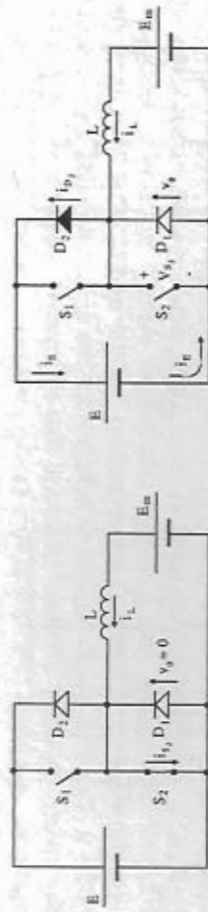


Fig7.6: Etapas de funcionamento para o 2º modo.

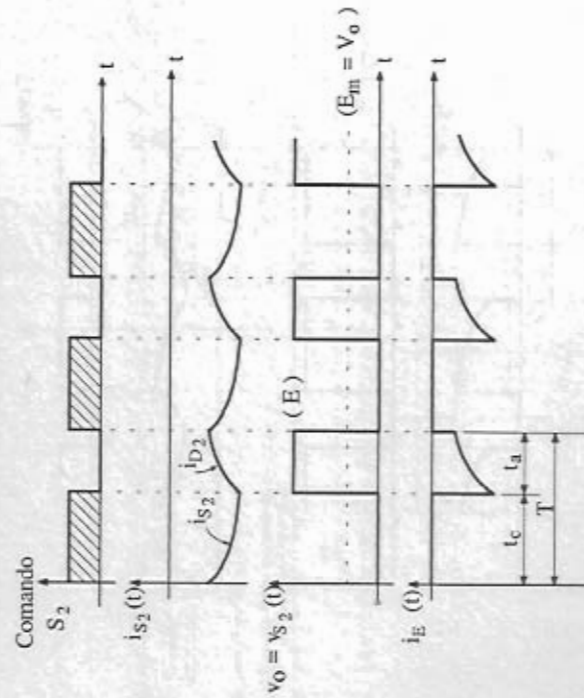


Fig7.7: Principais formas de onda.

3º MODO: Este modo de funcionamento é o mais empregado na indústria. As chaves S_1 e S_2 fecham e abrem complementarmente e de modo cíclico. Com a variação da razão cíclica, pode-se inverter o sentido do fluxo de energia suavemente e sem descontinuidade. As grandezas mais importantes estão representadas na Fig.7.8.

No intervalo $(0, t_r)$, a tensão E_m e a corrente média na indutância $I_{L_{md}}$ são positivas e o fluxo de energia se dá de E para E_m . No intervalo (t_r, t_F) , E_m é positiva e $I_{L_{md}}$ é negativa e o fluxo de energia se dá de E_m para E .

Uma outra forma de operar este 3º Modo de funcionamento é apresentada na Fig.7.9, onde se alternam o 1º e o 2º Modo de funcionamento. Também nesta operação é possível inverter o sentido da corrente média na indutância $i_{L_{md}}$ mantendo a tensão E_m positiva. Portanto, neste caso em particular a razão cíclica é definida da seguinte forma:

$$D = \frac{t_{S1}}{T} = \frac{V_o}{E} \quad (7.4)$$

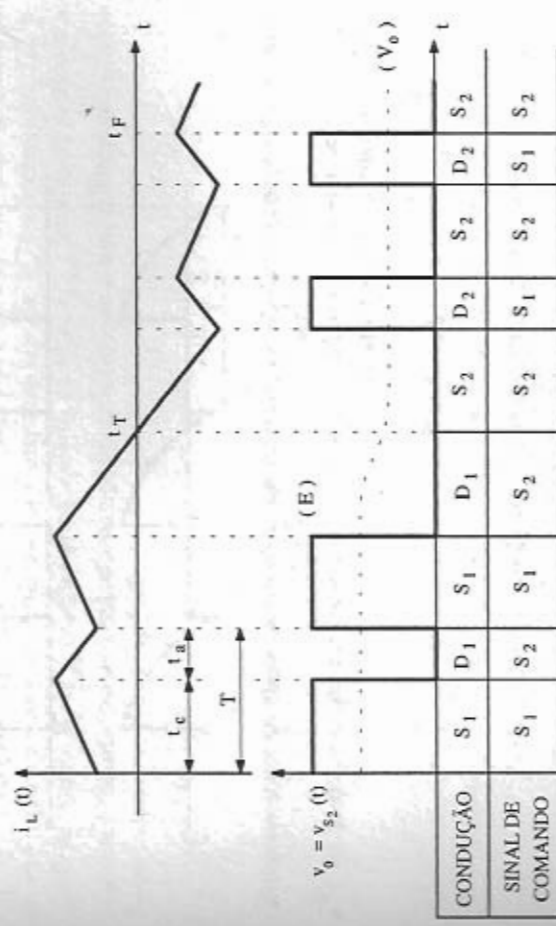


Fig7.8: Formas de onda para o 3º modo de funcionamento.

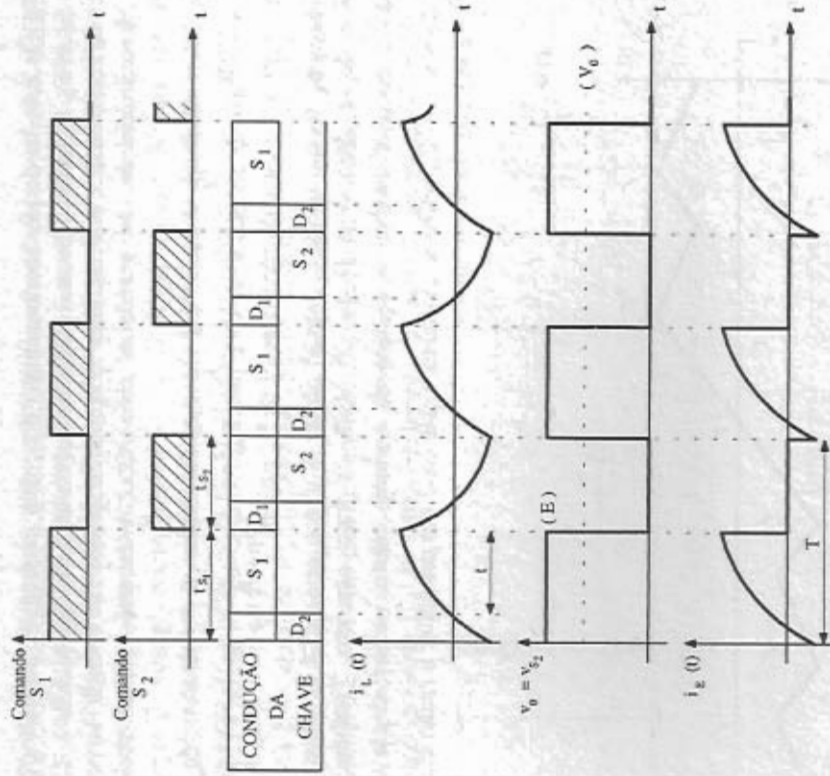


Fig 7.9: Principais formas de onda alternando o 1º e o 2º modo de funcionamento.

No plano tensão x corrente, o conversor reversível em corrente opera no 1º e no 2º quadrante, conforme mostrado na Fig. 7.10.

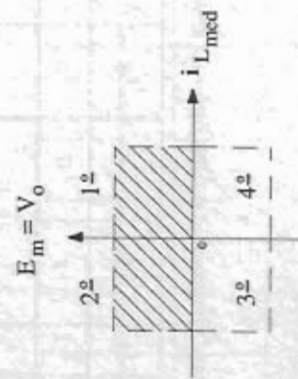


Fig 7.10: Plano tensão x corrente para o conversor reversível em corrente.

Se a carga for do tipo RLE, tem-se que:

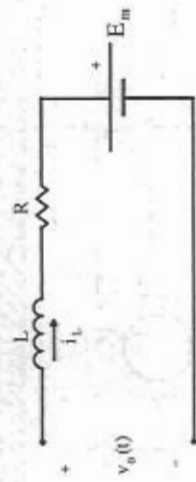


Fig. 7.11: Carga do tipo RLE.

Assim:

$$V_o = E_m + R \cdot I_{Lmd}$$

Imposto pelo comando Imagem da velocidade da máquina: $f(\omega_m)$ Imagem do torque; $f(\text{torque})$

A tensão média aplicada à carga (V_o) pode ser controlada alterando-se o tempo de condução da chave comandada (por exemplo t_c). Se V_o for menor que E_m , a queda de tensão $R \cdot I_{Lmd}$ altera sua polaridade, ou seja, I_{Lmd} inverte de sentido e a máquina é freiada, pois invertendo-se a corrente inverte-se o torque eletromagnético. Desse modo se obtém a Fig. 7.12:

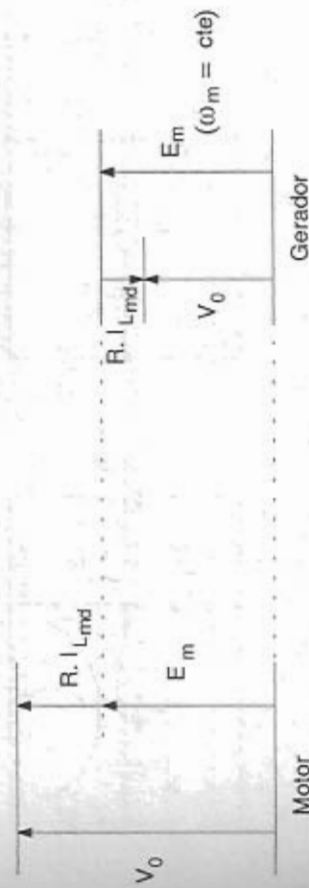


Fig 7.12: Comportamento do sistema com carga tipo RLE.

7.4. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM TENSÃO

7.4.1. INTRODUÇÃO

O circuito básico de potência do conversor CC-CC reversível em tensão é apresentado na Fig. 7.13. A polaridade da fonte E_m depende do modo de operação

do conversor (tipo Buck ou Boost). No caso da fonte E_m ser a f.c.e.m. de uma máquina de corrente contínua basta inverter a polaridade do enrolamento de campo.

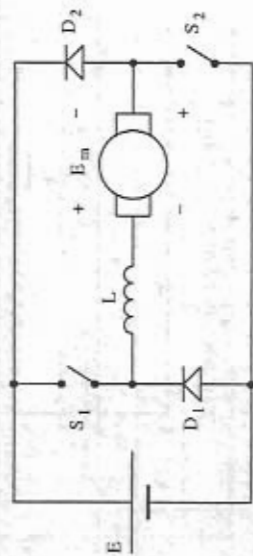


Fig. 7.13: Estrutura do conversor reversível em tensão.

Os modos de funcionamento com suas respectivas etapas estão representados a seguir:

7.4.2. MODOS DE FUNCIONAMENTO

a) FLUXO DE ENERGIA DE "E" PARA "E_m" (MODO DE OPERAÇÃO BUCK→TRAÇÃO)

1º MODO: A chave S_1 é mantida permanentemente fechada e S_2 opera fechando e abrindo. As duas etapas de funcionamento estão representadas na Fig. 7.14.

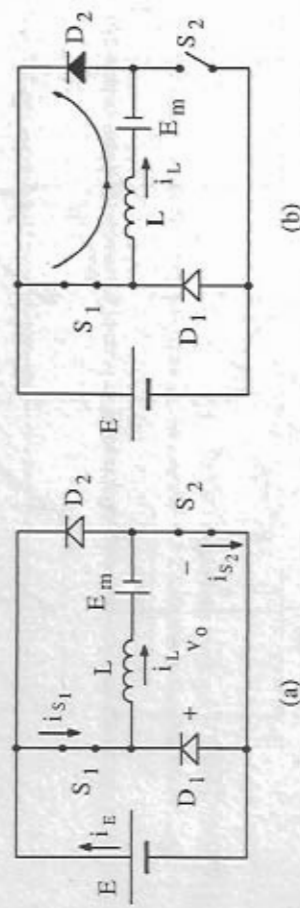


Fig. 7.14: Etapas de funcionamento para o primeiro modo de operação.

As principais formas de onda para este primeiro modo de operação são mostradas na Fig. 7.15.

2º MODO: As duas chaves S_1 e S_2 são fechadas e abertas simultaneamente de modo cíclico, conforme está apresentado na Fig. 7.16. Durante o intervalo em que S_1 e S_2 encontram-se abertas, os diodos D_1 e D_2 mantêm-se em condução para permitir a circulação da corrente i_L . As principais formas de onda são apresentadas na Fig. 7.17.

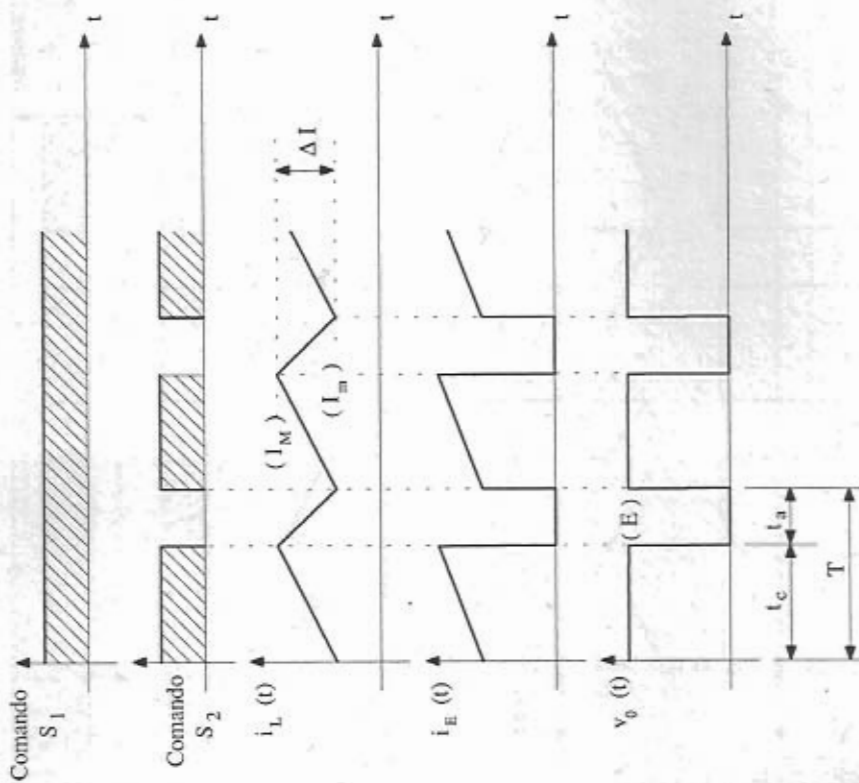


Fig. 7.15 Principais formas de onda.

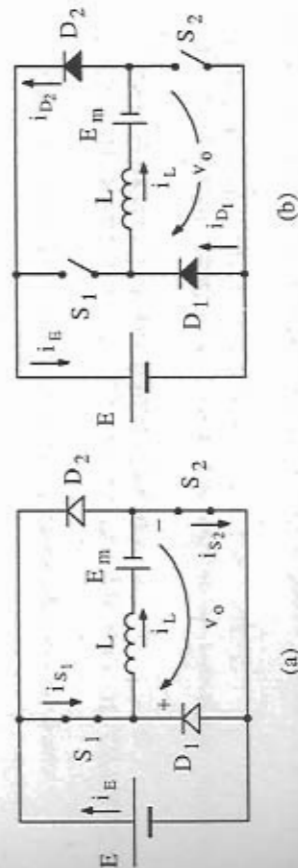


Fig. 7.16: Etapas de funcionamento para o comando simultâneo de S_1 e S_2 .

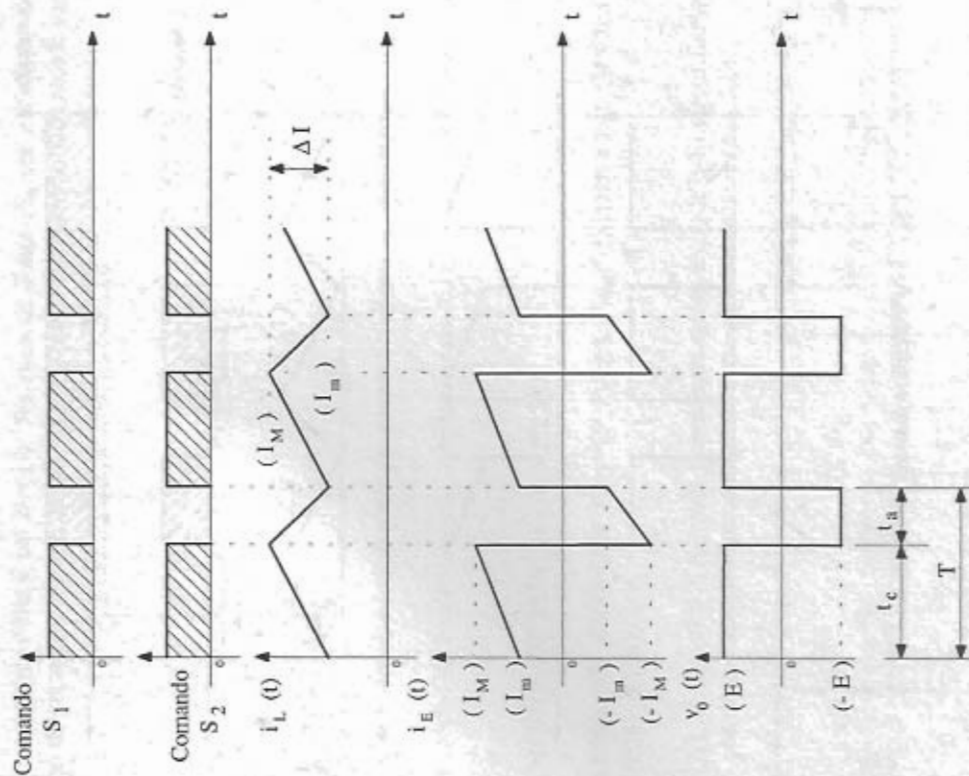


Fig.7.17: Principais formas de onda - 2º Modo de funcionamento.

b) FLUXO DE ENERGIA DE "E" PARA "E" (MODO DE OPERAÇÃO BOOST→REGENERAÇÃO REGENERATIVA)

Para a operação neste modo de funcionamento é necessário inverter a polaridade da fonte E_m , conforme é mostrado nas etapas a seguir:

1º MODO: A chave S_1 é mantida permanentemente aberta, enquanto a chave S_2 fecha e abre ciclicamente. As duas etapas de funcionamento estão representadas na Fig.7.18. A Fig.7.19 mostra as principais formas de onda.

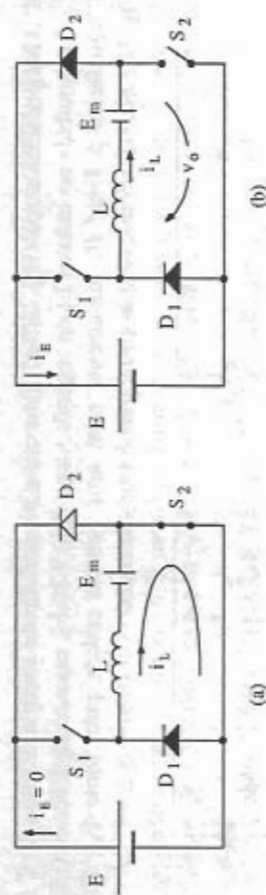


Fig.7.18: Etapas de funcionamento para o 1º modo de operação.

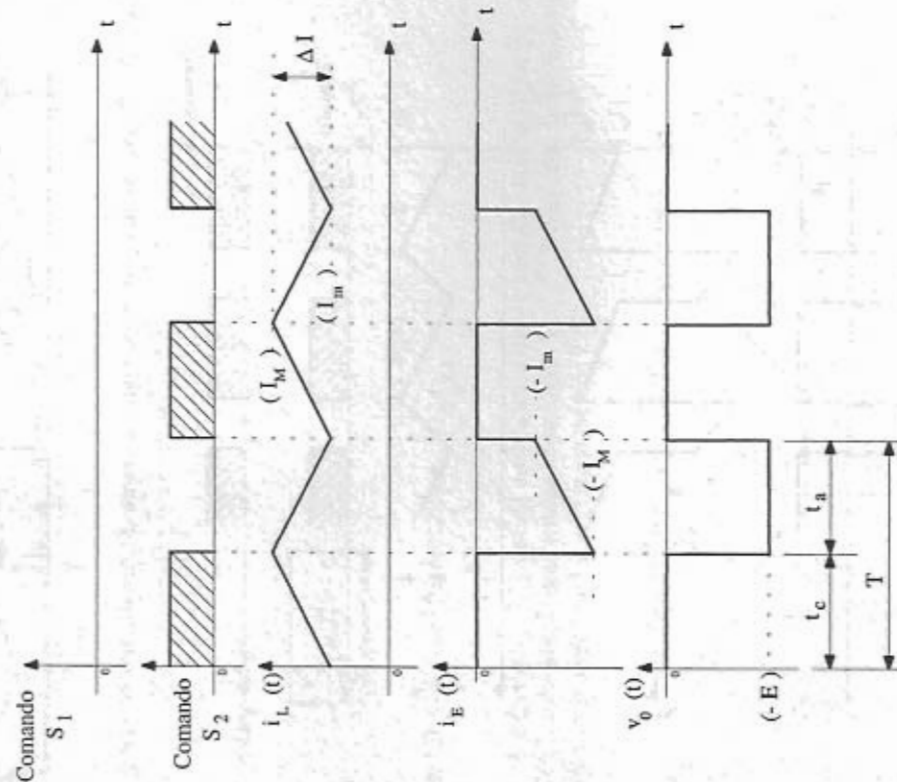


Fig.7.19: Principais formas de onda para o 1º modo de operação.

2º MODO: As chaves S_1 e S_2 são fechadas e abertas simultaneamente e ciclicamente. As duas etapas de funcionamento são mostradas na Fig.7.20.

Na primeira etapa (Fig.7.20.a), uma certa quantidade de energia oriunda de E e E_m é acumulada no indutor L ; na segunda etapa (Fig.7.20.b), essa energia acumulada é transferida à fonte E , juntamente com uma parcela cedida pela fonte E_m . Na Fig.7.21 estão representadas as principais formas de onda.

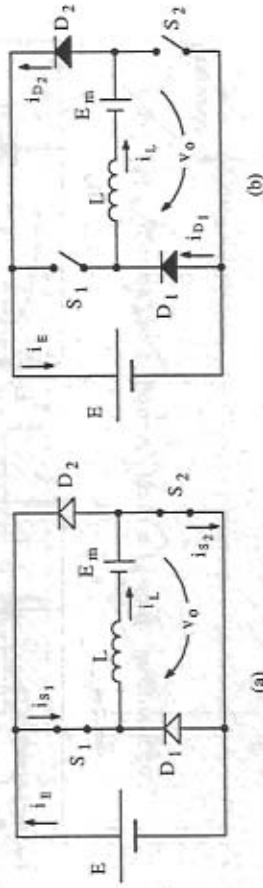


Fig.7.20: Etapas de funcionamento para o comando simultâneo de S_1 e S_2

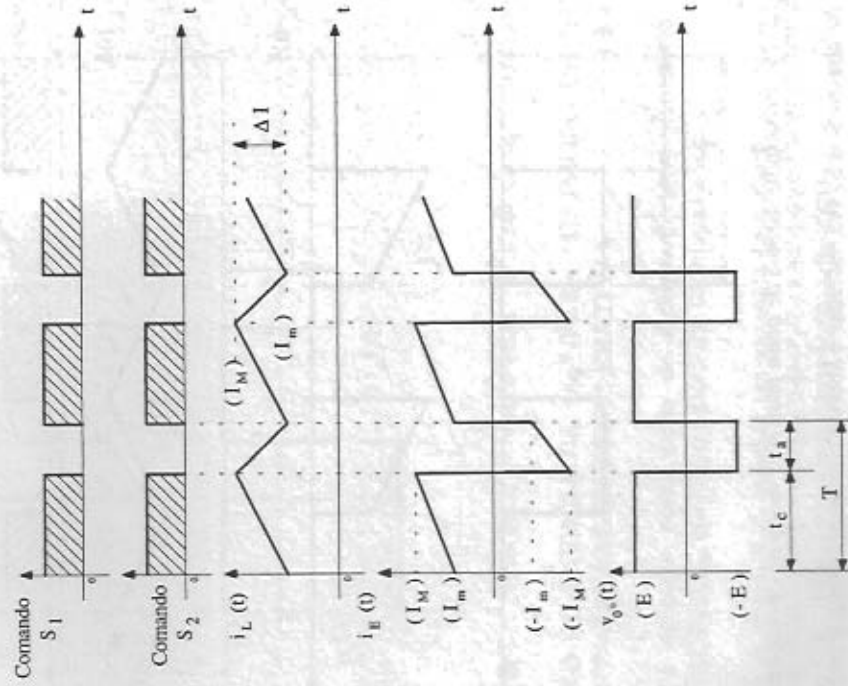


Fig.7.21: Principais formas de onda.

7.4.3. EQUACIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM TENSÃO

Para o estudo do comportamento matemático do conversor CC-CC reversível em tensão será analisado o 2º modo de funcionamento, onde o sentido da corrente na carga não é alterado, mas a tensão $v_o(t)$ pode variar entre E e $-E$ (Figs.7.17 e 7.21).

a) CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA ESTÁTICA

A tensão média na carga para o modo contínuo de operação é dada por:

$$V_o = \frac{E \cdot tc - E \cdot ta}{T} = \frac{E \cdot tc - E \cdot (T - tc)}{T} \quad (7.5)$$

$$V_o = \frac{E \cdot tc - E \cdot T + E \cdot tc}{T} = \frac{2E \cdot tc - E \cdot T}{T} \quad (7.6)$$

Desse modo:

$$\boxed{\frac{V_o}{E} = 2D - 1} \quad (7.7)$$

onde: $D = \frac{tc}{T} \rightarrow$ razão cíclica

A expressão (7.7) define a característica de transferência estática do conversor CC-CC reversível em tensão operando no 2º modo de funcionamento; sua representação gráfica é apresentada na Fig.7.22.

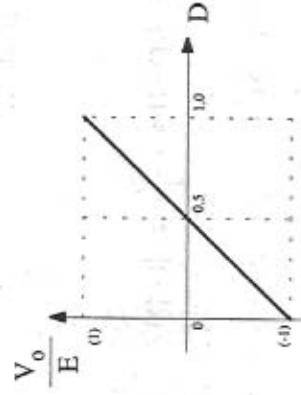


Fig.7.22: Característica de transferência estática para o conversor CC-CC reversível em tensão.

No plano tensão x corrente, o conversor CC-CC reversível em tensão opera no 1º e no 4º quadrante, como está representado na Fig.7.23.

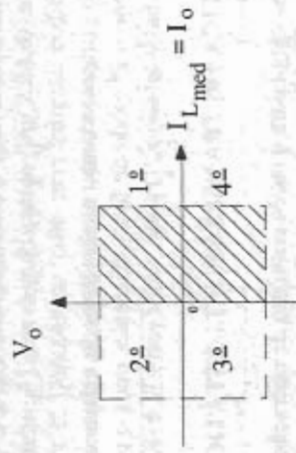


Fig. 7.23: Plano tensão x corrente para o conversor CC-CC reversível em tensão.

b) ONDULAÇÃO DA CORRENTE DE CARGA

A partir das formas de onda representadas na Fig. 7.17 ou 7.21, obtém-se a formulação matemática que é apresentada a seguir.

$$I_M = I_m + \frac{(E - E_m)}{L} \cdot t_c \quad (7.8)$$

onde: $I_M \rightarrow$ representa o valor máximo de corrente no indutor L .

$I_m \rightarrow$ representa o menor valor de corrente no indutor L .

Assim,

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{(E - E_m)}{L} \cdot t_c \quad (7.9)$$

$$E_m = V_o = E \cdot (2 \cdot D - 1) \quad (7.10)$$

Desse modo:

$$\Delta I = \frac{E}{L} \cdot t_c - \frac{E}{L} \cdot (2D - 1) \cdot t_c = \frac{2E}{L} \cdot t_c \cdot (1 - D) \quad (7.11)$$

$$\Delta I = \frac{2E}{L} \cdot T \cdot D \cdot (1 - D) \quad (7.12)$$

O valor máximo da ondulação de corrente (ΔI_{\max}) ocorre para $D = 0,5$. Logo:

$$\Delta I_{\max} = \frac{E}{2 \cdot L \cdot f} \quad (7.13)$$

c) ONDULAÇÃO RELATIVA DA CORRENTE DE CARGA

Seja uma carga com a configuração mostrada na Fig. 7.24.

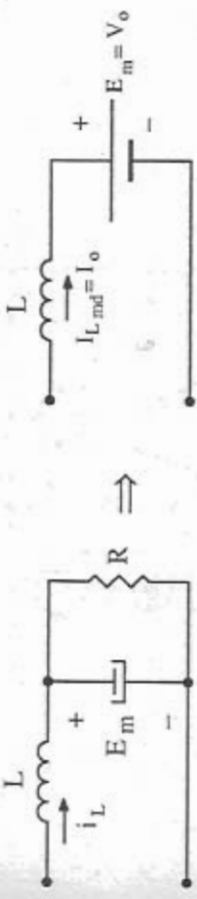


Fig. 7.24: Carga do conversor CC-CC reversível em tensão.

Assim

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{E \cdot (2D - 1)}{R} \quad (7.14)$$

$$\frac{\Delta I}{I_o} = \frac{2E}{L} \cdot T \cdot D \cdot (1 - D) \cdot \frac{R}{E \cdot (2D - 1)} \quad (7.15)$$

ou seja:

$$\frac{\Delta I}{I_o} = \frac{2T}{\tau} \cdot \frac{D \cdot (1 - D)}{(2D - 1)} \quad (7.16)$$

$$\text{onde: } \tau = \frac{L}{R} \quad (7.17)$$

Finalmente:

$$\boxed{\frac{\tau \cdot \Delta I}{T \cdot I_o} = \frac{2D(1 - D)}{(2D - 1)}} \quad (7.18)$$

A expressão (7.18) está representada graficamente na Fig. 7.25.

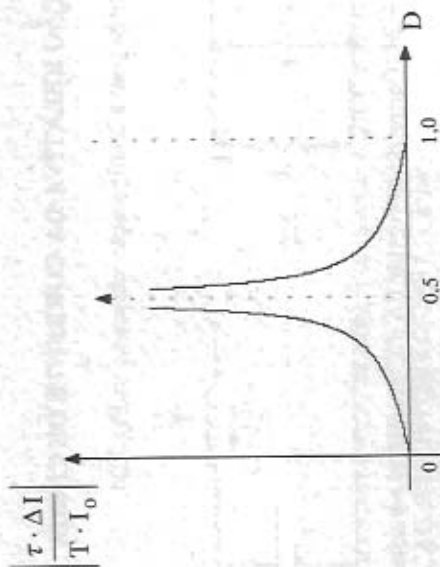


Fig. 7.25: Ondulação relativa da corrente de carga.

7.5. CONVERSOR CC-CC REVERSÍVEL EM TENSÃO E CORRENTE

7.5.1. INTRODUÇÃO

A estrutura de potência do conversor CC-CC para cargas reversíveis em tensão e corrente está mostrada na Fig. 7.26.

Esta estrutura é normalmente empregada na indústria no controle de posição dos servomotores de corrente contínua. Ela pode ser encarada como sendo o resultado da combinação das topologias estudadas nos parágrafos precedentes (topologia reversível em corrente e topologia reversível em tensão), podendo portanto, operar nos quatro quadrantes do plano corrente x tensão (ou torque x velocidade), como está representado na Fig. 7.27.

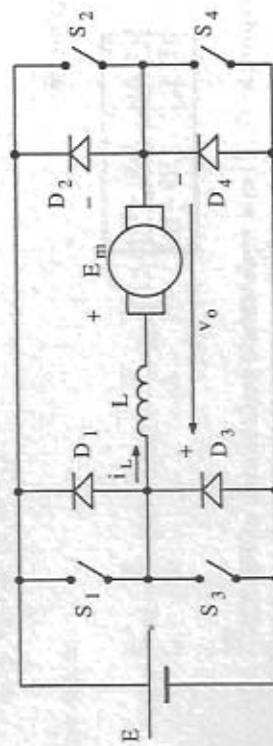


Fig. 7.26: Estrutura de potência do conversor CC-CC reversível em tensão e corrente.

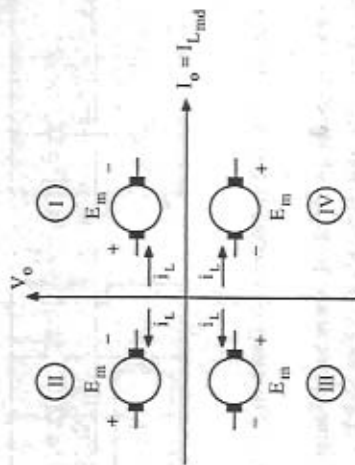


Fig. 7.27: Quatro quadrantes do plano corrente x tensão.

7.5.2. MODOS DE FUNCIONAMENTO

a) FLUXO DE ENERGIA DE "E" PARA "Em" (MODO DE OPERAÇÃO BUCK → TRACÇÃO)

1º MODO: A chave S_4 é mantida permanentemente fechada, enquanto S_1 abre e fecha ciclicamente. A etapa de roda livre se efetua através de S_4 e D_3 . As chaves S_2 e S_3 não são acionadas, permanecendo abertas. A Fig. 7.28 mostra as duas etapas de funcionamento. Durante essas etapas a máquina CC opera como motor no 1º quadrante.

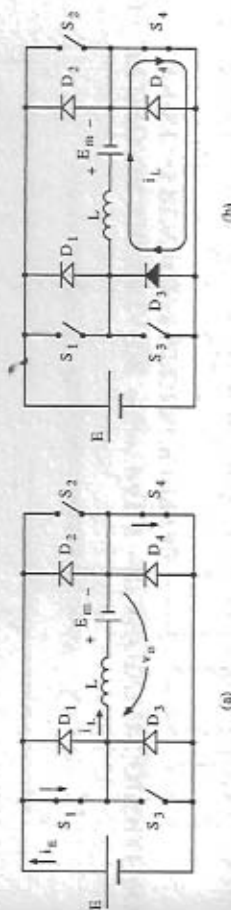


Fig. 7.28: Operação no 1º quadrante (motor).

2º MODO: A chave S_3 é mantida sempre fechada, e a chave S_2 abre e fecha ciclicamente. A etapa de roda livre é assegurada pelo diodo D_4 . Nesta situação a máquina também opera como motor, porém no 3º quadrante, pois houve mudança no sentido da corrente e na polaridade da tensão de carga. As chaves S_1 e S_4 permanecem abertas. Neste modo de operação a máquina gira no sentido contrário em relação ao 1º modo de funcionamento. A Fig. 7.29 mostra as principais etapas de funcionamento.

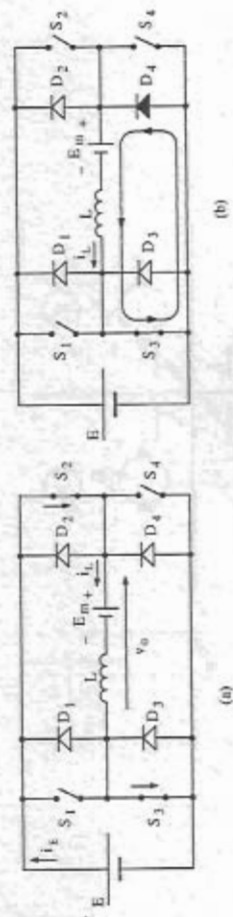


Fig. 7.29: Operação no 3º quadrante (tração-funcionamento como motor).

As principais formas de onda de tensão e corrente na carga, para os dois modos de funcionamento descritos, estão representadas na Fig. 7.30.

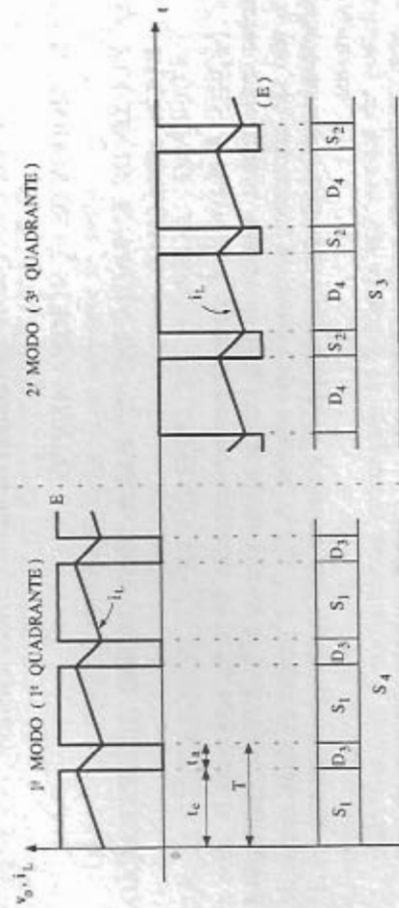


Fig. 7.30: Principais formas de onda.

b) FLUXO DE ENERGIA DE "Em" PARA "E" (MODO DE OPERAÇÃO BOOST → FRENAGEM REGENERATIVA)

1º MODO: Este modo de funcionamento inicia com a chave S_3 e o diodo D_4 ambos conduzindo; é a fase de acumulação de energia no indutor L . Em seguida, com a abertura da chave S_3 , essa energia é devolvida à fonte E através dos diodos D_1 e D_4 (as outras chaves permanecem inativas). Observe que o diodo D_4 mantém-se em condução durante todo o processo de funcionamento. A Fig. 7.31 mostra as principais etapas de operação.

Durante este modo de funcionamento a máquina opera como gerador (2º quadrante).

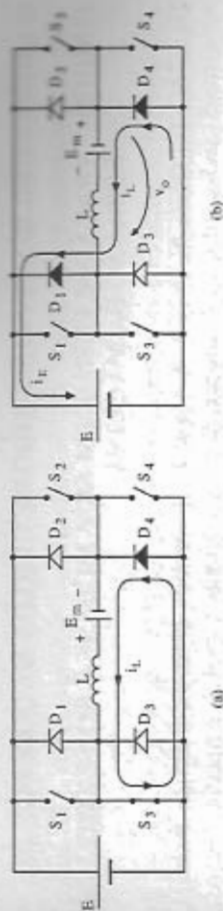


Fig. 7.31: Principais etapas de operação - 2º quadrante.

2º MODO: Operação no 4º quadrante. Neste caso a f.c.e.m. E_m está com polaridade invertida em relação ao 1º modo de funcionamento. A fase de acumulação de energia é obtida com o fechamento da chave S_1 e a condução do diodo D_2 . Quando S_1 é aberta a energia acumulada em L é devolvida à fonte de entrada E através dos diodos D_2 e D_3 . As duas etapas de operação estão apresentadas na Fig. 7.32. Nesta situação a máquina também opera como gerador; contudo, o sentido de giro é contrário ao do caso anterior (1º modo de funcionamento).

As principais formas de onda estão representadas na Fig. 7.33.

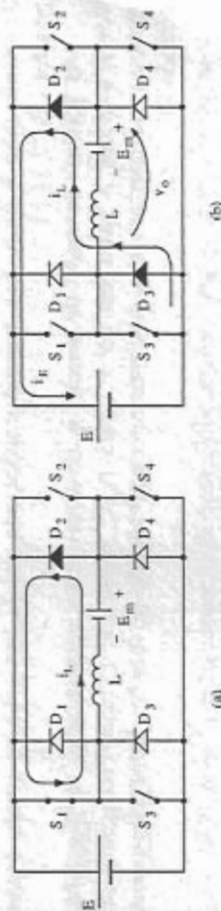


Fig. 7.32: Principais etapas de operação - 4º quadrante.

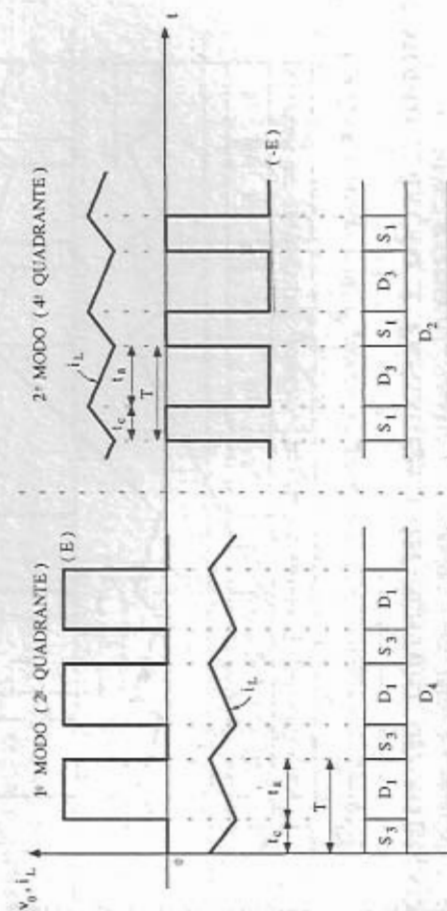


Fig. 7.33 Principais formas de onda.

c) REVERSIBILIDADE NO SENTIDO DE GIRO DA MÁQUINA CC

1º MODO: TRACÇÃO E FRENAGEM SEM MUDANÇA NO SENTIDO DE ROTAÇÃO DA MÁQUINA

TRACÇÃO (1º QUADRANTE): A chave S_4 é mantida permanentemente fechada, enquanto S_1 fecha e abre ciclicamente. O tempo durante o qual S_1 é mantida fechada controla o fluxo de potência da fonte para a carga. Na abertura de S_1 o diodo D_3 entra em condução realizando a etapa de roda livre. As etapas de funcionamento são descritas na Fig.7.28.

FRENAGEM REGENERATIVA (2º QUADRANTE): Para frear a máquina, devolvendo energia à fonte E, mantém-se a etapa de roda livre (Fig.7.28.b), até que a corrente se anule; nesse momento a chave S_4 abre e S_3 é comandada a fechar; o diodo D_4 entra imediatamente em condução, invertendo a corrente na máquina e iniciando o processo de frenagem. Nesta etapa (Fig.7.31.a) tem-se a acumulação de energia no indutor L.

Quando S_3 abre, o diodo D_1 entra em condução e, juntamente com D_4 , devolvem para a fonte E a energia armazenada em L (máquina operando como gerador - Fig.7.31.b).

As formas de onda de tensão e corrente estão apresentadas na Fig.7.34. Verifica-se que a passagem do 1º para o 2º quadrante (Tração/Frenagem), se processa suavemente e sem descontinuidade. O sentido de rotação da máquina não é alterado.

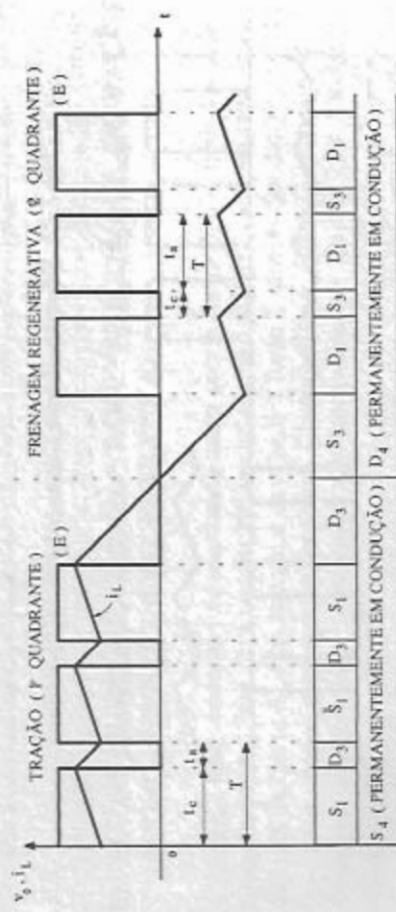


Fig.7.34: passagem do 1º para o 2º quadrante com frenagem regenerativa.

2º MODO: TRACÇÃO E FRENAGEM COM SENTIDO DE ROTAÇÃO INVERTIDO

Neste 2º modo de operação tanto o sentido de rotação da máquina quanto a f.c.e.m. E_m são invertidas em relação ao 1º modo de funcionamento visto anteriormente.

TRACÇÃO (3º QUADRANTE): A chave S_3 é mantida sempre fechada, e a chave S_2 abre e fecha ciclicamente, controlando o fluxo de energia da fonte para a carga. Durante a abertura de S_2 a continuidade da corrente é assegurada pelo diodo D_4 . As etapas de funcionamento estão descritas na Fig.7.29.

FRENAGEM REGENERATIVA (4º QUADRANTE): A passagem da etapa de tração para a etapa de frenagem é realizada mantendo-se o roda livre através de D_4 , até que a corrente se anule. A partir desse instante a chave S_3 é aberta e S_1 é fechada, provocando a imediata condução do diodo D_2 . Tem-se assim o armazenamento de energia no indutor L. Quando S_1 abre a energia acumulada em L é devolvida a fonte E via D_2 e D_3 . Fica evidente portanto, a frenagem da máquina com regeneração de energia. A Fig.7.32 apresenta as etapas de funcionamento.

As principais formas de onda para este 2º modo de funcionamento são mostradas na Fig.7.35, onde verifica-se que a passagem do 3º para o 4º quadrante (Tração/Frenagem), se processa suavemente e sem descontinuidade.

3º MODO

OPERAÇÃO NO 1º E 4º QUADRANTE

As chaves S_1 e S_4 abrem e fecham ciclicamente, enquanto as chaves S_2 e S_3 permanecem inativas. Na abertura de S_1 e S_4 a energia armazenada no indutor L é recuperada pela fonte E. As etapas de funcionamento relativas a esta operação são mostradas na Fig.7.36.

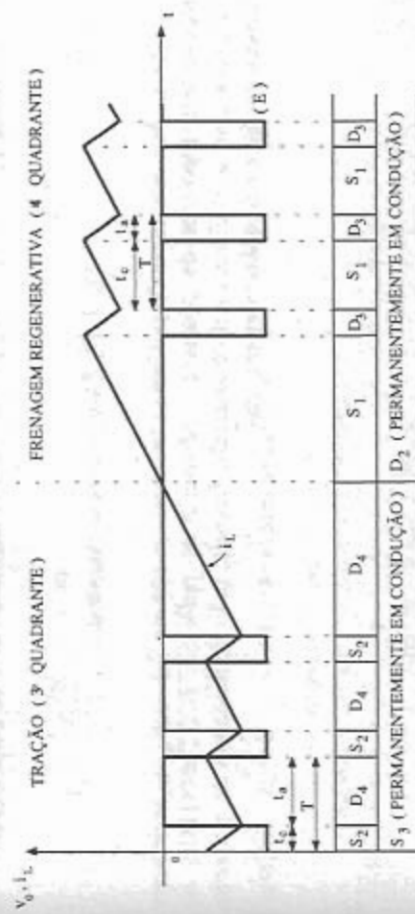


Fig.7.35: Passagem do 3º para o 4º quadrante com frenagem regenerativa.

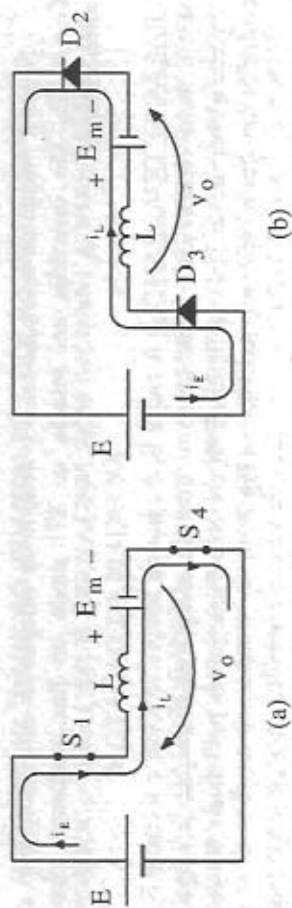


Fig. 7.36: Etapas de funcionamento.

OPERAÇÃO NO 2º E 3º QUADRANTE

Durante esta operação as chaves S_2 e S_3 abrem e fecham ciclicamente, e as chaves S_1 e S_4 ficam permanentemente abertas. Na abertura das chaves S_2 e S_3 a continuidade da corrente de carga é assegurada pela condução dos diodos D_1 e D_4 , onde ocorre a transferência de energia acumulada no indutor L para a fonte E . As etapas de funcionamento são apresentadas na Fig. 7.37.

As formas de onda de tensão e corrente na carga para este 3º modo de funcionamento estão representadas na Fig. 7.38.

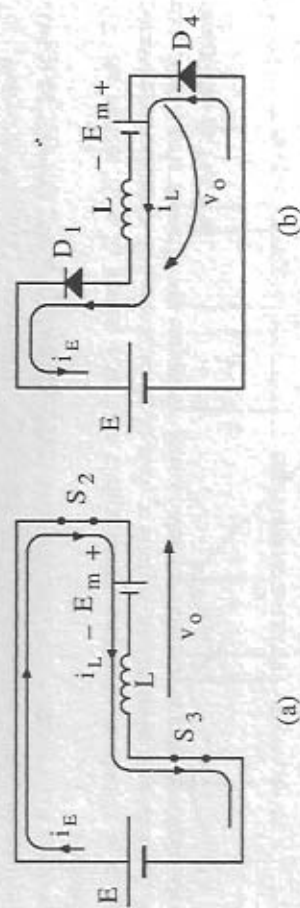


Fig. 7.37: Etapas de funcionamento.

Obs.: Nas estruturas de potência estudadas, as chaves S_1 , S_2 , S_3 , S_4 podem ser transistores bipolares de potência, Mosfet's de potência, IGBT's, GTO's ou tiristores com seus circuitos de comutação forçada, tudo dependendo da potência, tensão, corrente e frequência envolvidas.

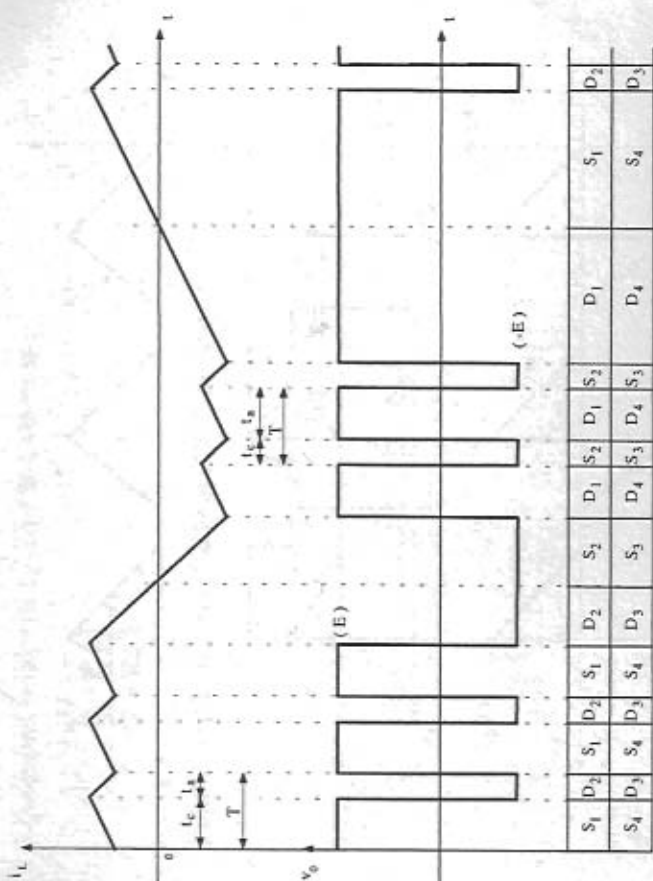


Fig. 7.38: Corrente e tensão na carga.

7.5.3. CARACTERÍSTICA DE CARGA DO CONVERSOR CC-CC DE QUATRO QUADRANTES

As formas de onda do conversor CC-CC de quatro quadrantes para condução descontínua estão representadas na Fig. 7.39. A partir dessas formas de onda obtém-se o valor médio e de pico da corrente de carga, ou seja:

$$I_o = \frac{I_M \cdot t_c}{2T} + \frac{I_M \cdot t_a}{2T} \quad (7.19)$$

$$I_M = \frac{(E - E_m)}{L} \cdot t_c \quad (7.20)$$

onde: $I_o = I_{L_{md}}$ → corrente média na carga

I_M → corrente de pico na carga.

Substituindo a Eq. (7.20) em (7.19) tem-se:

$$I_o = I_{L_{md}} = \frac{(E - E_m) \cdot t_c^2}{2TL} + \frac{(E - E_m)}{2TL} \cdot t_c \cdot t_a \quad (7.21)$$

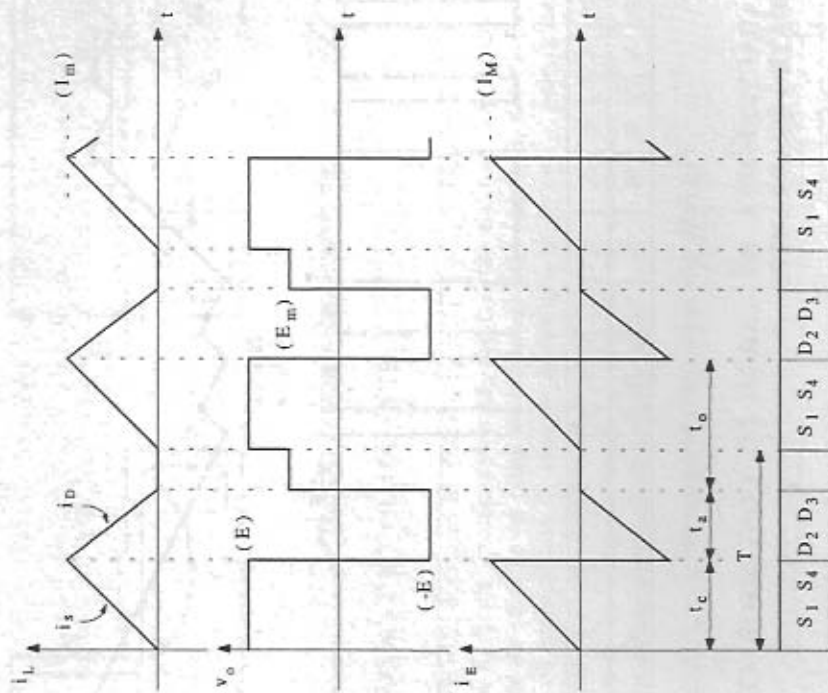


Fig.7.39: Formas de onda para condução descontínua.

O valor de i_a pode ser obtido do seguinte modo. A corrente i_D é dada por:

$$i_D = I_M - \frac{(E + E_m)}{L} \cdot t \quad (7.22)$$

Quando $t = t_a \Rightarrow i_D = 0$. Logo:

$$I_M = \frac{(E + E_m)}{L} \cdot t_a \quad (7.23)$$

Então:

$$t_a = \frac{L \cdot I_M}{(E + E_m)} \quad (7.24)$$

Substituindo o valor de I_M (Eq.7.20), obtém-se:

$$t_a = \frac{(E - E_m)}{(E + E_m)} \cdot t_c \quad (7.25)$$

Assim, levando-se a Eq.(7.25) em (7.21) tem-se que:

$$I_o = I_{L_{md}} = \frac{(E - E_m)}{2TL} \cdot t_c^2 + \frac{(E - E_m)^2}{2TL} \cdot \frac{t_c^2}{(E + E_m)} \quad (7.26)$$

$$I_{L_{md}} = \frac{(E - E_m) \cdot T \cdot t_c^2}{2T^2 L} \left[1 + \frac{(E - E_m)}{(E + E_m)} \right] \quad (7.27)$$

$$I_{L_{md}} = \frac{(E - E_m) \cdot T \cdot \left(\frac{t_c}{T} \right)^2}{2L} \left[1 + \frac{(E - E_m)}{(E + E_m)} \right] \quad (7.28)$$

Assim:

$$\frac{2 \cdot L \cdot I_{L_{md}}}{E \cdot T} = \frac{(E - E_m)}{E} \cdot D^2 \left[1 + \frac{(E - E_m)}{(E + E_m)} \right] \quad (7.29)$$

Definindo:

$$\gamma = \frac{2 \cdot L \cdot I_{L_{md}}}{E \cdot T} \quad (7.30)$$

e substituindo-o na Eq.(7.29), encontra-se a expressão:

$$\frac{\gamma}{D^2} = \left(1 - \frac{E_m}{E} \right) \cdot \left[1 + \frac{\left(1 - \frac{E_m}{E} \right)}{\left(1 + \frac{E_m}{E} \right)} \right] \quad (7.31)$$

$$\text{Seja } a = \frac{E_m}{E} \quad (7.32)$$

Então:

$$\frac{\gamma}{D^2} = (1-a) \cdot \left[1 + \frac{(1-a)}{(1+a)} \right] = 2 \cdot \frac{(1-a)}{(1+a)} \quad (7.33)$$

Desse modo:

$$(1-a) = (1+a) \cdot \frac{\gamma}{2 \cdot D^2} \quad (7.34)$$

$$a = \frac{\left(1 - \frac{\gamma}{2 \cdot D^2} \right)}{\left(1 + \frac{\gamma}{2 \cdot D^2} \right)} \quad (7.35)$$

ou seja:

$$a = \frac{2 \cdot D^2 - \gamma}{2 \cdot D^2 + \gamma} \quad (7.36)$$

A expressão (7.36) vale para a região de descontinuidade. No limite da continuidade (Eq.7.7), tem-se:

$$a = 2 \cdot D - 1 \quad (7.37)$$

$$\text{Logo: } D = \frac{a+1}{2} \quad (7.38)$$

A partir de Eq.7.34 é possível se obter γ em função de D e do parâmetro a , ou seja:

$$\gamma = 2 \cdot D^2 \cdot \frac{(1-a)}{(1+a)} \quad (7.39)$$

Levando-se a expressão (7.38) em (7.39), obtém-se:

$$\gamma = \frac{2 \cdot (1+a)^2}{4} \cdot \frac{(1-a)}{(1+a)} \quad (7.40)$$

Assim:

$$\gamma = \frac{(1+a) \cdot (1-a)}{2} \quad (7.41)$$

As expressões (7.36) e (7.41) estão representadas graficamente na Fig.7.40.

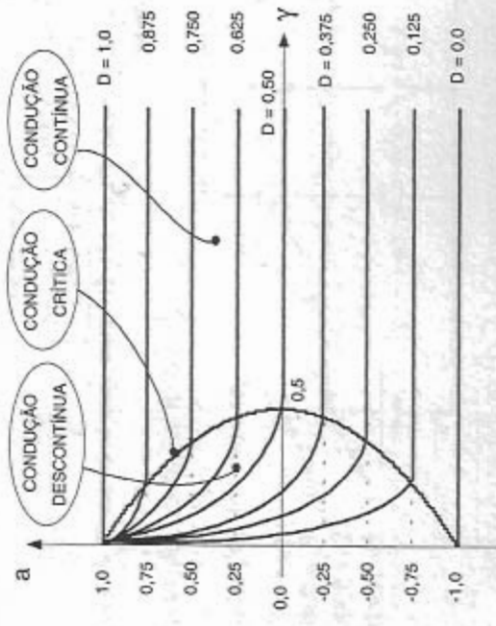


Fig.7.40: Características de carga do conversor CC-CC de quatro quadrantes.

A indutância crítica para este tipo de conversor pode ser calculada a partir da Fig.7.40.

A condição crítica ocorre para $D = 0,5$ e $\gamma = 0,5$; assim, através da Eq.(7.30) obtém-se:

$$\gamma = \frac{2 \cdot L_{CR} \cdot I_{L_{nd}}}{E \cdot T} = 0,5 \quad (7.42)$$

Desse modo:

$$L_{CR} = \frac{E}{4 \cdot f \cdot I_{L_{nd}}} \quad (7.43)$$

onde $I_{L_{nd}} = I_o$.

A Eq.(7.43) define o menor valor de indutância, a partir do qual tem-se condução contínua.

7.6. EXERCÍCIOS

7.6.1. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1º) O conversor CC-CC reversível em corrente apresentado na Fig. 7.41 opera no 1º modo de funcionamento (TRAÇÃO). Em função dos dados apresentados calcular:

- O valor da razão cíclica;
- A ondulação de corrente no indutor L ;
- O tempo de condução do diodo D_1 para que a corrente de carga se anule completamente.

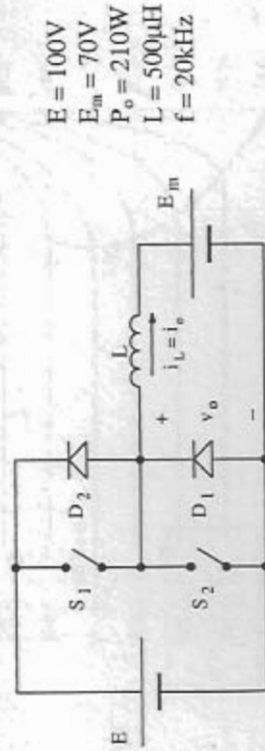


Fig. 7.41: Conversor CC-CC reversível em corrente.

SOLUÇÃO:

- Valor da razão cíclica

Como primeiro procedimento para resolver este exercício tem-se que saber se o conversor opera em condução contínua ou descontínua. A expressão a seguir fornece o valor da indutância crítica:

$$L_{CR} = \frac{E}{8 \cdot I_{L_{md}} \cdot f} \quad (7.44)$$

onde: $I_{L_{md}} = I_o = \frac{P_o}{E_m} = 3A$

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow \text{frequência de chaveamento}$$

Assim:

$$L_{CR} = \frac{100}{8 \cdot 3 \cdot 20k} = 208,33\mu H$$

Como a indutância do circuito é de $500\mu H$ então o conversor opera em condução contínua. Portanto, o valor da razão cíclica será:

$$D = \frac{t_c}{T} = \frac{V_o}{E} = \frac{E_m}{E} \quad \boxed{D = \frac{70}{100} = 0,7}$$

- Ondulação da corrente no indutor L

A corrente de saída tem a seguinte forma:



Fig. 7.42. Ondulação de corrente no indutor L .

A ondulação de corrente ΔI é dada por:

$$\Delta I = \frac{(E - E_m)}{L} \cdot t_c = \frac{(E - E_m)}{L} \cdot D \cdot T = \frac{(E - E_m)}{L \cdot f} \cdot D$$

$$\Delta I = \frac{(100 - 70)}{500\mu \cdot 20k} \cdot 0,7 \quad \therefore \quad \boxed{\Delta I = 2,1A}$$

- Tempo de condução do diodo D_1 para que a corrente de carga se anule completamente.

O tempo de condução do diodo D_1 necessário para anular a corrente i_L é apresentado na Fig. 7.43; e o circuito equivalente para esta etapa é mostrado na Fig. 7.44.



Fig. 7.43: Descarga linear do indutor L .

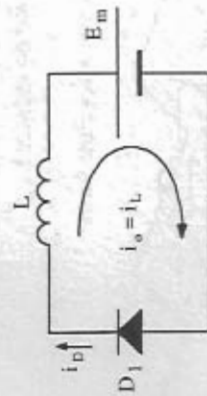


Fig. 7.44: Etapa de condução do diodo D_1 .

A expressão da corrente no diodo D_1 é apresentada a seguir:

$$i_{D(t)} = I_M - \frac{E_m}{L} \cdot t$$

$$\text{onde: } I_M = I_o + \frac{\Delta I}{2} = 3 + \frac{2,1}{2} \quad \therefore I_M = 4,05 \text{ A}$$

$$p' t = t_D \Rightarrow i_{D(t)} = 0. \text{ Logo:}$$

$$0 = I_M - \frac{E_m}{L} \cdot t_D$$

$$t_D = \frac{I_M \cdot L}{E_m} = \frac{4,05}{70} \cdot 500 \mu$$

$$\boxed{t_D = 28,93 \mu\text{s}}$$

2º) Considere o conversor descrito no exercício anterior (Fig. 7.41), operando no 2º modo de funcionamento (Frenagem Regenerativa).

a) Explique como passar do 1º modo de funcionamento para o 2º modo;

- Descreva as etapas de funcionamento para o 2º modo de funcionamento;
- Determine a corrente média e de pico na fonte E ;
- Calcule a parcela de energia entregue para a fonte E pelo indutor L .

SOLUÇÃO:

a) Passagem do 1º modo de funcionamento para o 2º modo.

A passagem do 1º modo de funcionamento para o 2º modo se realiza mantendo a chave S_1 permanentemente aberta, e deixando o diodo D_1 conduzindo até que a corrente no indutor L se anule. A partir desse momento a chave S_2 é colocada em condução por um determinado tempo. Nos instantes em que S_2 está aberta o diodo D_2 conduz, enviando energia à fonte E , caracterizando o modo de operação Boost.

b) Etapas de funcionamento para o 2º modo de funcionamento.

Conforme observado no item a), o 2º modo de funcionamento é constituído por duas etapas de operação. Na 1ª etapa a chave S_2 está fechada, e há acumulação de energia na indutância L (Fig. 7.6.a). Na 2ª etapa S_2 é aberta, provocando a imediata condução do diodo D_2 . A partir desse momento, toda a energia acumulada em L durante a 1ª etapa, somada a energia da fonte E_m , são enviadas à fonte E (Fig. 7.6.b).

c) Corrente média e de pico na fonte E

A corrente média na fonte E é definida por:

$$I_{E_{md}} = \frac{P_o}{E} = \frac{210}{100} \quad \therefore \boxed{I_{E_{md}} = 2,1 \text{ A}}$$

Antes da determinação da corrente de pico na fonte E é necessário conhecer o valor da razão cíclica, e para isso é preciso verificar se a condução é contínua ou descontínua. Para o conversor Boost o limite da descontinuidade é definido pela Eq. (3.80), ou seja:

$$\frac{E}{E_m} = a = \frac{1}{1-D} \Rightarrow D = \frac{a-1}{a} \quad (7.45)$$

Desse modo fica definida a razão cíclica crítica. Assim:

$$a = \frac{E}{E_m} = \frac{100}{70} = 1,43$$

$$D_{\text{crit}} = \frac{a-1}{a} = \frac{1,43-1}{1,43} \quad \therefore \quad \boxed{D_{\text{crit}} = 0,3}$$

A partir de D_{crit} é possível se obter o valor da indutância crítica através da Eq.(3.61):

$$L_{\text{CR}} = \frac{E_m}{2 \cdot f \cdot I_{E_{\text{md}}}} \cdot D_{\text{crit}} (1 - D_{\text{crit}}) \quad (7.46)$$

Então:

$$L_{\text{CR}} = \frac{70}{2 \cdot 20\text{k} \cdot 2,1} \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,3) \quad \therefore \quad \boxed{L_{\text{CR}} = 175\mu\text{H}}$$

Verifica-se que:

$$L > L_{\text{CR}} \Rightarrow \text{condução contínua}$$

Se a condução é contínua então:

$$\frac{E}{E_m} = \frac{1}{(1-D)} \Rightarrow D = 1 - \frac{E_m}{E} \quad (7.47)$$

$$D = 1 - \frac{70}{100} \Rightarrow \boxed{D = 0,3}$$

A corrente de pico na fonte E é a própria corrente de pico no diodo D_2 . Desse modo:

$$I_{E_p} = I_{D_{2p}} = I_{L_p} = I_{E_{\text{md}}} + \frac{\Delta I}{2}$$

$$\text{onde:} \quad I_{E_{\text{md}}} = \frac{P_o}{E_m} = \frac{210}{70} = 3 \text{ A}$$

O valor de ΔI é obtido através da Eq.(3.18):

$$\Delta I = \frac{E_m \cdot T}{L} \cdot D = \frac{70 \cdot 50\mu}{500\mu} \cdot 0,3$$

$$\boxed{\Delta I = 2,1 \text{ A}}$$

Logo:

$$I_{E_p} = 3 + \frac{2,1}{2} \quad \therefore \quad \boxed{I_{E_p} = 4,05 \text{ A}}$$

d) Parcela de energia entregue para a fonte E pelo indutor L

A forma de onda da corrente no indutor L é apresentada na Fig.7.45.

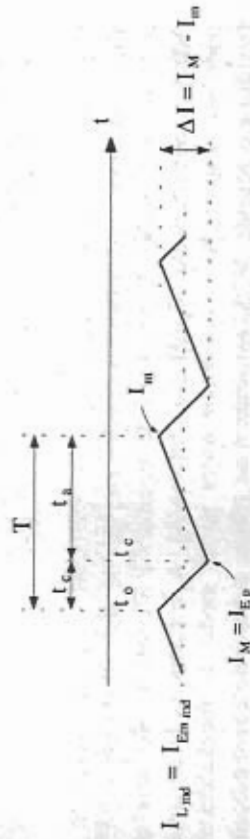


Fig.7.45: Corrente no indutor L.

A energia armazenada no indutor L durante o intervalo de tempo t_c é expressa pela integral da potência nesse intervalo, conforme mostrado na Eq.(7.49):

$$p(t) = v(t) \cdot i_L(t) = L \cdot i_L(t) \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (7.48)$$

$$W_L = \int_{t_0}^{t_c} p(t) dt = L \int_{t_0}^{t_c} i_L(t) \frac{di_L(t)}{dt} dt = L \int_{i_{L(t_0)}}^{i_{L(t_c)}} i_L(t) di_L(t) = \frac{1}{2} L [i_{L(t_c)}^2 - i_{L(t_0)}^2] \quad (7.49)$$

A equação de $i_{L(t_0)}$ é a equação de uma reta, logo:

$$i_{L(t_c)} = I_M \quad \text{e} \quad i_{L(t_0)} = I_m$$

Assim:

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot [I_M^2 - I_m^2] \quad (7.50)$$

onde: $I_M = I_{Ep} = 4,05$ e $I_m = I_{L_{ind}} = \frac{\Delta I}{2}$

Desse modo:

$$I_m = 3 - \frac{2,1}{2} = 1,95A$$

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot 500\mu \cdot [(4,05)^2 - (1,95)^2]$$

$$W_L = 3,15mJ$$

3º) Um motor de corrente contínua com excitação separada constante é alimentado por uma fonte de 240V, através de um conversor CC-CC reversível em tensão. A indutância de armadura e a constante de armadura valem respectivamente 730μH e 1,2/π[N.m/A]. A resistência de armadura pode ser desprezada. O conversor opera no 2º modo de funcionamento (tração) e o período de chaveamento é de 100μs. Admitindo que a máquina trabalha com 1750 rpm e com torque de carga de 27,28 Nm, determinar:

- A razão cíclica do conversor;
- O tempo de condução das chaves S1 e S2;
- A ondulação de corrente na armadura da máquina;
- A corrente média na armadura da máquina;
- Os valores máximos e mínimos de corrente nas chaves.

SOLUÇÃO:

- Razão cíclica do conversor (D)

O conversor em questão apresenta o seguinte circuito de potência:

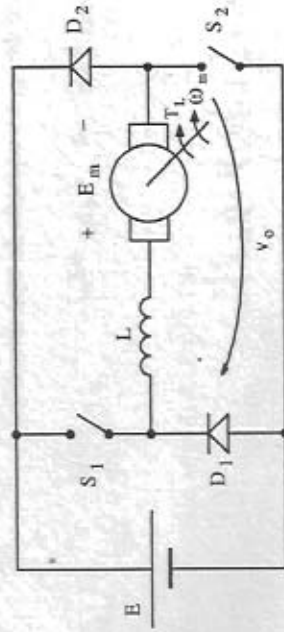


Fig.7.46: Conversor CC-CC reversível em tensão.

Para o conversor reversível em tensão a característica de transferência estática é dada por:

$$\frac{V_o}{E} = 2 \cdot D - 1 \quad (7.51)$$

Como o valor médio da tensão no indutor L é nulo então:

$$E_m = V_o \quad (7.52)$$

Da teoria da máquina de corrente contínua sabe-se que a f.c.e.m. E_m é dada por:

$$E_m = k_a \cdot \omega_m \quad (7.53)$$

onde: $k_a \rightarrow$ constante de armadura em [Nm/A]
 $\omega_m \rightarrow$ velocidade mecânica da máquina em [rad/s]

Assim:

$$\omega_m = 1750 \cdot \frac{\pi}{30} \text{ rad/s} \quad (7.54)$$

Então:

$$E_m = \frac{1,2}{\pi} \cdot 1750 \cdot \frac{\pi}{30} \quad \therefore E_m = V_o = 70V$$

Aplicando a Eq.(7.51) é possível determinar a razão cíclica:

$$2D = \frac{V_o}{E} + 1 \Rightarrow D = \left(\frac{V_o}{E} + 1 \right) / 2$$

$$D = \left(\frac{70}{240} + 1 \right) / 2 \quad \therefore D = 0,65$$

$$D = 0,65$$

- Tempo de condução das chaves S1 e S2 (tc)

A definição de razão cíclica é dada por:

$$D = \frac{t_c}{T} \quad \therefore \quad t_c = D \cdot T$$

(7.55)

Assim: $t_c = 0,65 \cdot 100\mu s \quad \therefore \quad t_c = 65\mu s$

c) Ondulação de corrente na armadura da máquina (ΔI)

A partir da Eq. (7.12) tem-se que:

$$\Delta I = \frac{2E}{L} \cdot T \cdot D \cdot (1 - D) = \frac{2 \cdot 240}{730\mu} \cdot 100\mu \cdot 0,65 \cdot (1 - 0,65)$$

$$\Delta I = 15A$$

d) Corrente média na armadura da máquina (I_o)

O torque eletromagnético da máquina de corrente contínua é dado por:

$$T_{\text{elet}} = k_a \cdot I_o \quad (7.56)$$

onde I_o é a corrente média na armadura da máquina.

Supondo que o torque de carga é igual ao torque eletromagnético:

$$T_L = T_{\text{elet}} = k_a \cdot I_o$$

Desse modo:

$$I_o = \frac{T_L}{k_a} = \frac{27,28}{1,2/\pi}$$

$$I_o = 71,42A$$

e) Valores máximos e mínimos de corrente nas chaves (I_M e I_m)

A corrente de pico nas chaves é obtida a partir da seguinte expressão:

$$I_M = I_o + \frac{\Delta I}{2} = 71,42 + \frac{15}{2} \quad \therefore \quad \text{Assim:}$$

$$I_M = 78,92A$$

A mínima corrente nas chaves é dada por:

$$I_m = I_o - \frac{\Delta I}{2} = 71,42 - \frac{15}{2} \quad \therefore \quad \text{Assim:}$$

$$I_m = 63,92A$$

4º)

Um conversor CC-CC reversível em tensão e corrente (quatro quadrantes), operando com frequência de chaveamento de 3kHz, alimenta um motor de corrente contínua com excitação separada a partir de uma fonte de 530V, conforme mostrado na Fig. 7.47. A corrente de campo I_f da máquina é mantida constante de forma que a constante de armadura $k_a = k \cdot \phi = 1,42[Nm/A]$. O motor opera a vazio em regime permanente, com velocidade de 3000 rpm, e deseja-se inverter sua velocidade o mais rapidamente possível, até atingir a velocidade de 1000 rpm no sentido inverso. As perdas da máquina serão desprezadas e a corrente máxima permissível de armadura é de 350A. Apresente a lógica de comando dos transistores, mostrando os quadrantes de operação, para as seguintes condições:

- Velocidade direta constante de 3000 rpm;
- Imediatamente após iniciar a desaceleração;
- Velocidade nula;
- Imediatamente antes de finalizar a aceleração reversa;
- Velocidade reversa constante de 1000 rpm.

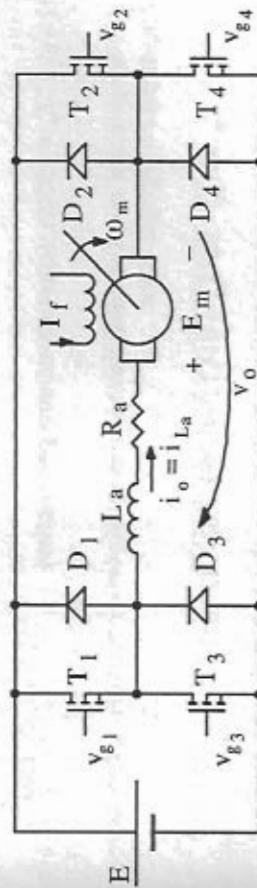


Fig. 7.47: Conversor CC-CC reversível em tensão e corrente (quatro quadrantes).

SOLUÇÃO:

- Velocidade direta constante de 3000 rpm.

Como as perdas da máquina foram desprezadas e o torque de carga é zero, então durante a fase de regime permanente à velocidade constante, a corrente solicitada pela máquina será considerada nula. Desse modo:

$$E_m = V_o = k \cdot \phi \cdot \omega_m = k_a \cdot \omega_m = 1,42 \cdot 3000 \cdot \frac{2\pi}{60}$$

$$E_m = V_o = 446,11V$$

Na operação com velocidade direta constante a máquina trabalha no 1º quadrante (tração-operação Buck). Assim tem-se:

$$D = \frac{V_o}{E} = \frac{t_c}{T} \quad \therefore \quad t_c = \frac{V_o}{E} \cdot T = \frac{446,11}{530 \cdot 3000}$$

$$\boxed{t_c = 280,57 \mu s} \quad \Rightarrow \quad D = \frac{280,57 \mu s}{1/3000} = 0,84$$

$$T = 333,33 \mu s$$

Como o funcionamento do sistema se efetua no 1º quadrante então o transistor T_4 deve ser mantido permanentemente saturado (Fig.7.28), enquanto que os transistores T_2 e T_3 permanecem bloqueados (sem corrente de base). O transistor T_1 abre e fecha ciclicamente com uma razão cíclica de 84%, conforme Fig.7.48.a.

b) Imediatamente após iniciar a desaceleração

Durante o período de desaceleração tem-se:

$$I_o = -350A \quad (\text{corrente máxima permissível})$$

Para produzir esta corrente, a tensão média nos terminais da armadura deve ser reduzida para o seguinte valor:

$$V_o = E_m - R_a \cdot I_o = 446,11 - 0,050 \cdot 350 = 428,61V$$

Devido ao fato de $V_o > 0$ e $I_o < 0$ o conversor CC-CC passa a operar no 2º quadrante (Frenagem regenerativa - operação Boost). Então, quando a desaceleração inicia, tem-se:

$$\frac{E}{V_o} = \frac{1}{(1-D)} \quad \therefore \quad D = 1 - \frac{V_o}{E} = 1 - \frac{428,61}{530}$$

$$D = 0,19 \quad \Rightarrow \quad D = 19\%$$

Logo:

$$t_c = D \cdot T = 0,19 \cdot \frac{1}{3000} \quad \therefore \quad \boxed{t_c = 63,33 \mu s}$$

Durante esta fase os transistores T_1 , T_2 e T_4 permanecem bloqueados e o transistor T_3 abre e fecha ciclicamente com uma razão cíclica de 19%. Os sinais de comando de base são mostrados na Fig.7.48.b.

c) Velocidade nula ($\omega_m = 0$)

Neste caso $E_m = 0$ e

$$V_o = R_a \cdot I_o = -0,050 \cdot 350 = -17,50V$$

Sendo $V_o < 0$ e $I_o < 0$, o conversor opera no 3º quadrante (tração no sentido inverso). Para operação neste quadrante o transistor T_3 é mantido permanentemente saturado e os transistores T_1 e T_4 se mantêm sempre bloqueados, enquanto que o transistor T_2 abre e fecha ciclicamente. O tempo de condução de T_2 é dado por:

$$t_c = D \cdot T = \frac{V_o}{E} \cdot T = \frac{17,50}{530} \cdot \frac{1}{3000}$$

$$\boxed{t_c = 11,0 \mu s}$$

A razão cíclica é de:

$$D = \frac{V_o}{E} = \frac{17,50}{530} = 0,033 \quad \Rightarrow \quad D = 3,33\%$$

Portanto o transistor T_2 permanece conduzindo somente por 3,3% do período de chaveamento.

Na Fig.7.48.c é apresentado os comandos de base dos transistores de conversor CC-CC reversível em tensão e corrente para esta etapa de funcionamento.

d) Imediatamente antes de finalizar a aceleração reversa

Até o final da operação com aceleração reversa o conversor é mantido no 3º quadrante. A máquina é desacelerada com corrente inversa máxima de 350A. Desse modo:

$$E_m = K_a \cdot \omega_m = 1,42 \cdot \left(-1000 \cdot \frac{2\pi}{60} \right) = -148,70V$$

$$V_o = E_m + R_a \cdot I_o = -148,70 - 0,050 \cdot 350 = -166,20V$$

Como no 3º quadrante o conversor trabalha no modo Buck (tração no sentido inverso), então:

$$D = \frac{V_o}{E} = \frac{166,20}{530} \quad \therefore \quad D = 0,31$$

$$D = 31\%$$

e o tempo de condução do transistor T_2 é dado por:

$$D = \frac{t_c}{T} \quad \therefore \quad t_c = D \cdot T = 0,31 \cdot \frac{1}{3000}$$

$$t_c = 103,33\mu s$$

Os comandos de base são mostrados na Fig.7.48.d.

e) Velocidade reversa constante de 1000 rpm

Para o acionamento do motor em regime permanente, à velocidade constante e no sentido reverso será novamente considerado corrente nula na máquina, tendo em vista que as perdas na mesma são desprezadas. Assim:

$$V_o = E_m = K_a \cdot \omega_m = 1,42 \cdot \left(-1000 \cdot \frac{2\pi}{60} \right) = -148,70V$$

$$D = \frac{V_o}{E} = \frac{148,70}{530} = 0,28$$

$$t_c = D \cdot T = 0,28 \cdot \frac{1}{3000}$$

$$t_c = 93,33\mu s$$

Como pode ser observado o conversor continua operando no 3º quadrante (tração). Na Fig.7.48 e são apresentados os sinais de comando dos transistores.

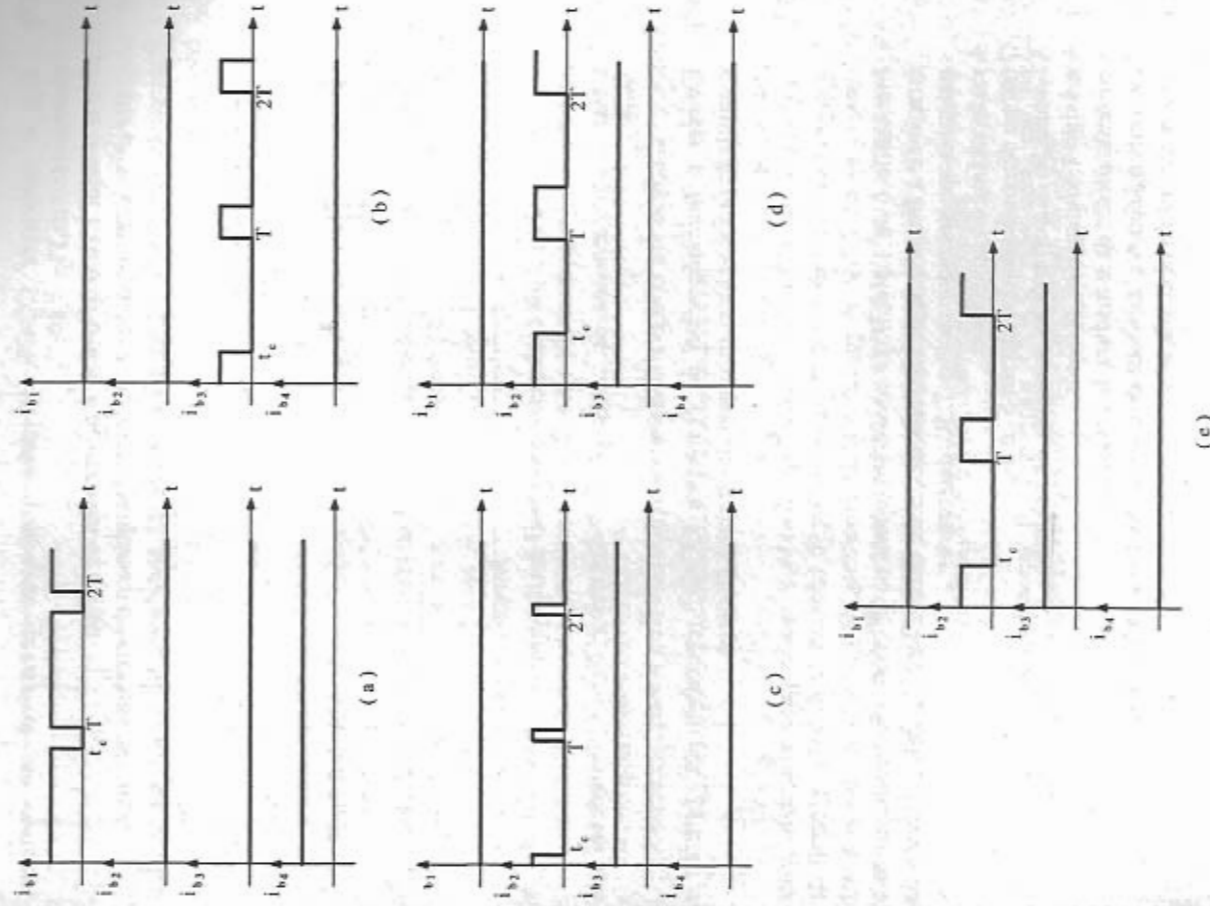


Fig.7.48: Sinais de comando de base.

7.6.2. EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1º) Qual a importância da reversibilidade nos conversores CC-CC?

2^o) Seja o conversor CC-CC de dois quadrantes reversível em corrente, representado na Fig. 7.49;

- Calcular o valor médio da tensão e da corrente de carga;
- Calcular os valores máximos e mínimos instantâneos da corrente de carga;
- Representar em função do tempo as seguintes grandezas: v_o ; i_o ; i_{D1} ; i_{D2} ; i_{S1} ; i_{S2} ; i_E .

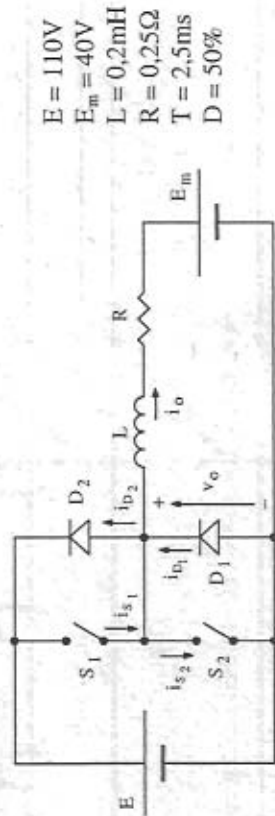


Fig. 7.49: Conversor reversível em corrente.

3^o) Obter a característica de carga para o conversor CC-CC reversível em corrente.

4^o) Estudar o funcionamento do conversor CC-CC reversível em corrente e controlado pelos valores extremos da corrente de carga.

5^o) Um conversor CC-CC reversível em tensão é usado para alimentar uma máquina de corrente contínua com excitação separada constante, a partir de uma fonte de 230V. A resistência de armadura da máquina é nula e a sua indutância é de 1,46mH. O conversor opera no 2^o modo de funcionamento (tração) e a frequência de chaveamento é de 7kHz. Considerando os dados da máquina apresentados na Fig. 7.50, determinar:

- A razão cíclica do conversor;
- O tempo de condução das chaves S_1 e S_2 ;
- A ondulação da corrente na armadura da máquina;
- A máxima ondulação de corrente;
- A corrente média na armadura da máquina;
- Os valores máximos e mínimos de corrente na armadura da máquina;
- Potência absorvida pela máquina.

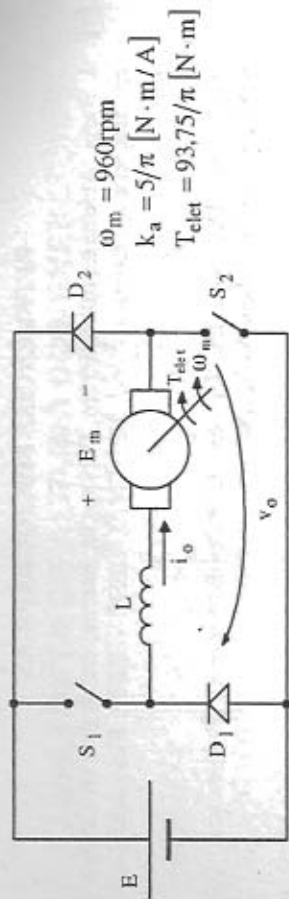


Fig. 7.50: Conversor CC-CC reversível em tensão.

6^o) O conversor apresentado na Fig. 7.51 opera em condução descontínua, onde as chaves S_1 e S_4 abrem e fecham ciclicamente, enquanto as chaves S_2 e S_3 permanecem bloqueadas. A partir desses dados determinar:

- As etapas de funcionamento;
- As formas de onda de $i_o(t)$; $v_o(t)$ e $i_E(t)$;
- O tempo de condução das chaves S_1 e S_4 e a corrente de pico nas mesmas;
- O tempo de condução dos diodos D_2 e D_3 ;
- A corrente média na carga;
- A condição para a qual este conversor passará a operar em condução contínua.

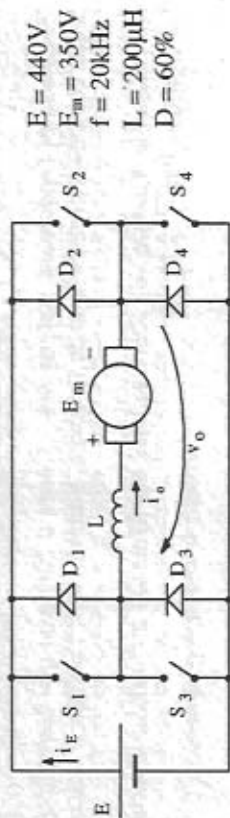


Fig. 7.51: Conversor CC-CC quatro quadrantes.

7^o) Estudar o funcionamento do conversor CC-CC reversível em tensão e corrente, controlado pelos valores extremos da corrente de carga.

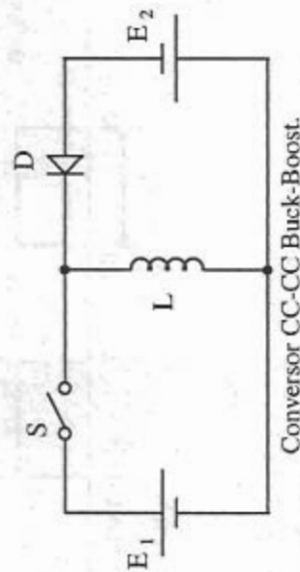
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Barbi. **Açãoamento Elétrico**. Publicação Interna, curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - cod. EEL 3410, UFSC - INEP, Florianópolis-SC, 1988.
- [2] P. C. Sen. **Thyristor DC Drives**. A Wiley-Interscience Publications, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1981.
- [3] S. B. Dewan, G. R. Slemon & A. Straughen. **Power Semiconductor Drives**. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1984.
- [4] T. Kenjo. **Power Electronics For the Microprocessor Age**. Oxford University Press, New York, 1990.
- [5] A. J. Perin. **Pulsadores a Transistor de Potência Para o Controle de Corrente Contínua**. Dissertação de Mestrado. Orientador Prof. Ivo Barbi, INEP/UFSC, Florianópolis, SC, Junho/1980.
- [6] M. H. Rashid. **Power Electronics - Circuits, Devices, and Applications**. Prentice-Hall International Editions, Inc. New Jersey, 1988.
- [7] Hacheurs et Onduleurs Autonomes - Cours d'Electronique Industrielle - Institut National Polytechnique de Toulouse, Edition 1983, Toulouse/França.
- [8] R. Chaudrade. **Comande Électronique des Moteurs a Courant Continue**. Ed. Eyrolles, Paris, 1975.

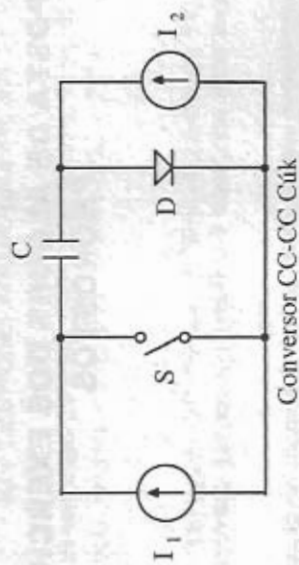
RESPOSTA DE ALGUNS DOS EXERCÍCIOS PROPOSTOS

CAPÍTULO 1

- 1^o) O conversor mais adequado é o Buck, por ser um conversor abaixador de tensão.
- 2^o) Controlar o fluxo de energia entre fontes de CC.
- 3^o) Os conversores CC-CC chaveados são basicamente formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos (indutores e capacitores). Do ponto de vista teórico os elementos passivos não dissipam potência, e os interruptores sendo ideais apresentam tensão nula quando abertos. Assim, em ambos os casos o produto tensão x corrente é zero, e portanto a potência dissipada é nula. Desse modo, toda a energia cedida pela fonte de entrada é entregue à carga, e obviamente o rendimento é de 100%.
- 4^o) Conversor Buck-Boost, Cúk, Sepic e Zeta.
- 5^o) A reversibilidade dos conversores CC-CC permite a troca de energia entre a fonte de entrada e a carga e vice-versa. Essa propriedade faz com que, em algumas aplicações, haja um melhor aproveitamento da energia envolvida no processo de conversão, e em outras aplicações permite a alimentação de sistemas por fontes alternativas.
- 6^o) Para a Fig. 1.9 deve ser empregado o conversor Buck-Boost, e a fonte E_2 deve ter sua polaridade invertida.



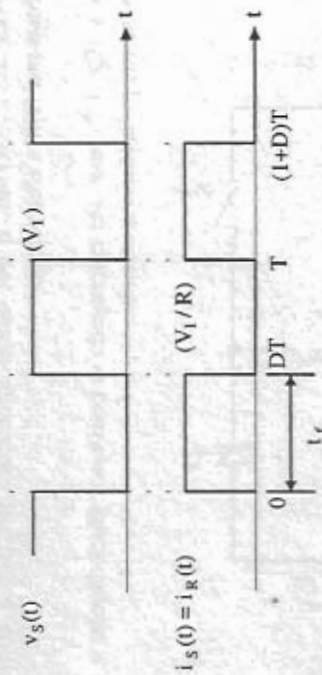
Na Fig. 1.10 deve ser utilizado o conversor Cúk.



- 70) a) $D = 0,4$
 b) $I_{R_{med}} = 1,2A$
 c) $I_{S_{max}} = 3,0A$
 d) $V_{R_{ef}} = 94,87V$
 e) $P_R = 180W$

- 80) a) $I_{S_{med}} = I_{R_{med}} = 1,2A$
 $I_{S_{ef}} = 1,9A$
 b) $V_{S_{max}} = 150V$
 $V_{S_{med}} = 90V$

c)



- d) $t_r = 8\mu s$

CAPÍTULO 2

- 10) $L = 10mH$
 20) a) $I_M = 205A$
 $I_m \rightarrow$ condução descontinua
 b) $V_{C_{md}} = 63,71V$
 $I_{C_{md}} = 96,45A$
 c) $t_0 = 0,7ms$
 e) $D_{CRIT} = 0,7$
 30) a) $L_E = 390\mu H$; $C_E = 83,33\mu F$
 b) $L_o = 75mH$; $C_o = 860nF$
 40) a) $I_M = 10,31A$; $I_m = 9,69A$
 b) $V_{D_{RL_{pico}}} = 100V$
 c) $I_{D_{RL_{ef}}} = 7,07A$; $I_{D_{RL_{md}}} = 5A$
 d) $P_C = 500W$
 e) $P_R = 100W$
 f) $P_{E_C} = 400W$
 g) $I_{E_{md}} = 5A$; $I_{E_{ef}} = 7,07A$; $I_{E_{pico}} = I_M = 10,31A$
 h) $I_{T_{pico}} = 10,31A$
 i) $\Delta I = 0,62A$; $\Delta I(\%) = 6,2\%$
 j) $40V \leq V_{C_{md}} \leq 90V$
 50) a) $V_{C_{md}} = 109V$
 b) $\eta = 99,1\%$
 c) $R_E = 20,18\Omega$
 d) $V_{I_{ef}} = 99,03V$
 70) a) $D = 1/3$; $t_C = 6,67\mu s$
 b) $I_{R_{md}} = 50A$
 d) $I_{D_{RL_{ef}}} = 39,84A$; $I_{D_{RL_{md}}} = 33,33A$
 $I_{S_{ef}} = 28,97A$; $I_{S_{md}} = 16,68A$

e) $I_{C_{ef}} = 3,87A$

CAPÍTULO 3

1º) a) $I_M = 9,6A$; $I_M = 3,2A$
 b) $t_0 = 46,15\mu s$
 c) $P_{E_2} = 221W$; $P_{E_2} = 74W$

2º) a) $P_C = 110W$
 b) $I_{L_{md}} = 2,3A$
 c) $D = 0,47$
 d) $I_{C_{ef}} = 1,67A$
 e) $I_{S_{pico}} = 5,64A$; $I_{S_{md}} = 1,32A$; $I_{S_{ef}} = 2,23A$
 f) $I_{D_{pico}} = 5,64A$; $I_{D_{md}} = 1,0A$; $I_{D_{ef}} = 1,96A$
 g) $V_{D_{max}} = V_{S_{max}} = 110V$
 i) $\Delta V_C = 51,32mV$ (variação pico a pico)

3º) $C \approx 3\mu F$

4º) a) $f = 6,66kHz$
 b) $I_{E_{md}} = 45A$
 $I_o = 30A$
 c) $I_M = 50A$
 $I_m = 40A$
 d) $I_{C_{ef}} = 21,3A$

5º) a) $D = 0,667$
 b) $\Delta I = 0,889A$
 c) $I_M = 1,945A$
 d) $\Delta V_C = 60,64mV$

6º) $L = 9\mu H$ (ligeiramente menor)

9º) a) $D = 0,75$
 b) $t_a = 2,5\mu s$
 $t_c = 7,5\mu s$
 c) $V_o = 600V$
 d) $\Delta I_L = 0,56A$
 e) $I_{D_{md}} = 1,5A$
 f) $P_o = 900W$
 g) $I_{E_{md}} = 6A$
 h) $I_m = 5,72A$
 $I_M = 6,28A$
 i) $\beta = 0,047$
 j) $C = 375nF$

CAPÍTULO 4

1º) a) $V_o = 4,0V$
 b) $\Delta V_o = 56,8mV$
 c) $\Delta I = 0,8A$
 d) $I_{S_{max}} = 2,067A$
 e) $P_o = 5W$
 f) $R = 3,2\Omega$

4º) a) $L = 586\mu H$
 b) $D = 0,265$

5º) a) $V_o = 30V$
 $I_o = 3A$
 b) $P_o = P_E = 90W$
 c) $I_{D_{md}} = 3A$
 $I_{D_{ef}} = 4,83A$
 d) $I_{T_{md}} = 4,5A$
 $I_{T_{ef}} = 5,92A$
 e) $I_{L_{md}} = 7,5A$
 $I_{L_{ef}} = 7,63A$
 f) $\Delta V_C = 38,30mV$

g) $\Delta I_L = 5A$

7^o)

- a) $V_o = 4V$
- b) $I_{E_{md}} = 0,42A$
- c) $\Delta I_E = 0,60A$
- d) $\Delta V_c = 63mV$
- e) $\Delta I_o = 0,80A$
- f) $\Delta V_o = 18,18mV$
- g) $I_{T_M} = 2,37A$

8^o)

- a) $V_o = 30V$
- b) $R_o = 2\Omega$
- c) $E = 22,5V$
- d) $t_c = 30\mu s$
- e) $t_a = 20\mu s$
- f) $t_o = 26,67\mu s$
- g) $t_{desc} = 3,33\mu s$
- h) $C = 3,55\mu F$
- i) $V_{CM} = 112,69V$

10^o)

- a) $V_o = 50V$
- b) $R_o = 5\Omega$
- c) $E = 25V$
- d) $b = 0,5$
- e) $D = 0,67$
- f) $t_c = 26,8\mu s$
- g) $t_a = 13,2\mu s$
- h) $t_o = 13,2\mu s$
- i) condução crítica
- j) $C = 1,78\mu F$
- k) $V_{CM} = 148,31V$
- l) $V_{S_{max}} = 148,31V$
- $I_{S_{max}} = 30A$

CAPÍTULO 5

1^o)

- a) $V_o = 82,96V$
- b) $P_o = 45,88W$
- c) $I_o = 0,55A$
- d) $I_{L_{md}} = 0,82A$
- e) $\Delta V_o = 39,73mV$

2^o)

- a) $L_E = 56,47\mu H$
- b) $I_{E_{md}} = 2,5A$
- c) $I_{L_{md}} = 1,75A$
- d) $L_m = 66,95A$
- e) $I_o = 1,75A$
- f) $V_o = 68,57V$
- g) $C_o = 3,68\mu F$
- h) $I_{S_{max}} = 12,54A$
- $I_{S_{md}} = 2,51A$
- i) $I_{L_{m_{max}}} = 5,54A$
- j) $R_o = 39,18\Omega$
- k) $C = 4,45\mu F$
- l) $D_2 T = 6,4\mu s$

4^o)

- a) $V_o = 226,67V$
- b) $I_o = 1,03A$
- c) $P_o = 233,47W$
- d) $I_{L_{md}} = 5,84A$
- e) $I_{L_{m_{md}}} = 1,03A$
- f) $I_{F_{max}} = 8,20A$
- g) $\Delta I_E = 4,72A$
- h) $\Delta I_{L_m} = 3,86A$
- i) $G = 5,67$
- j) $\Delta V_c = 313mV$
- k) $\Delta V_o = 219mV$
- l) $I_{S_{md}} = 5,84A$
- $I_{S_{max}} = 10,83A$

$$m) V_{S_{nd}} = 40V$$

$$V_{S_{max}} = 266,67V$$

$$n) D_{CRIT} = 0,81$$

$$a) R_o = 96\Omega$$

$$b) I_o = 1,25A$$

$$c) L_E = 960\mu H$$

$$d) L_m = 640\mu H$$

$$e) C = 8,33\mu F$$

$$f) C_o = 16,67\mu F$$

$$g) E = 30V$$

$$h) R_{o_{critico}} = 960\Omega$$

$$i) I_{S_{nd}} = 5A$$

$$I_{S_{ef}} = 5,60A$$

$$I_{S_{max}} = 6,87A$$

$$9^o) a) D_{max} = 0,42$$

$$b) V_o = 42V$$

$$c) P_o = 147W$$

$$d) I_o = 3,5A$$

$$e) I_{E_{nd}} = 2,53A$$

$$f) I_{E_{max}} = 5,57A$$

CAPÍTULO 6

$$1^o) a) V_o = 336,16V$$

$$b) G = 1,345$$

$$c) P_o = 37,67W$$

$$d) I_o = 112mA$$

$$e) I_{E_{nd}} = 150mA$$

$$f) I_{L_{m_{nd}}} = 150mA$$

$$g) I_{L_{m(0)}} = 71,83mA$$

$$h) I_{L_{m_{max}}} = 273mA$$

$$I_{L_{o_{max}}} = 397mA$$

$$i) \Delta I_{L_m} = 200mA$$

$$\Delta I_{L_o} = 470mA$$

$$j) I_{D_{max}} = 670mA$$

$$k) I_{S_{nd}} = 151mA$$

$$I_{S_{max}} = 670mA$$

$$l) V_{S_{max}} = 586,08V = V_{D_{max}}$$

$$m) \Delta V_c = 2,40V$$

$$n) \Delta V_{C_o} = 26,36V$$

3^o)

$$a) I_{E_{nd}} = 2,08A$$

$$b) V_o = 96V$$

$$c) I_o = 1,04A$$

$$d) R_o = 92,16\Omega$$

$$e) L_o = 92,15\mu H$$

$$f) \Delta I_{L_o} = 4,16A$$

$$g) L_m = 61,43\mu H$$

$$h) \Delta I_{L_m} = 6,24A$$

$$i) C = 13,89\mu F$$

$$j) \Delta V_c = 960mV$$

$$k) C_o = 3,47\mu F$$

$$l) \Delta V_o = 9,6V$$

5^o)

$$a) G = 4$$

$$b) V_o = 1244V$$

$$I_o = 3,0A$$

$$c) P_o = 3732W$$

$$d) I_{E_{nd}} = 12A$$

$$e) I_{L_{m_{nd}}} = 12A$$

$$I_{L_{m_{max}}} = 12,12A$$

$$I_{L_{m_{min}}} = 11,87A$$

$$f) \Delta I_{L_m} = 0,25A$$

$$g) I_{L_{o_{nd}}} = I_o = 3A$$

$$I_{L_{o_{max}}} = 3,25A$$

- $I_{L_{o\min}} = 2,75A$
 h) $\Delta I_{L_o} = 0,5A$
 i) $I_{S_{\min}} = 12A$; $I_{S_{\max}} = 15,37A$; $I_{S_{ef}} = 13,75A$
 $I_{D_{\min}} = 3A$; $I_{D_{\max}} = 15,37A$; $I_{D_{ef}} = 6,87A$
 j) $V_{C_{\min}} = 1222V$
 $V_{C_{\max}} = 1266V$
 k) $\Delta V_C = 44V$
 l) $V_{O_{\min}} = 1240V$
 $V_{O_{\max}} = 1247V$
 m) $\Delta V_O = 7V$
 n) $V_{S_{\min}} = 311V$; $V_{S_{\max}} = 1555V$
 $V_{D_{\min}} = 1244V$; $V_{D_{\max}} = 1555V$
 o) $I_{C_{ef}} = 6A$
 $I_{C_{of}} = 144mA$
- $7^o)$ $R_o = 55\Omega$; $L_o = 825\mu H$; $C_o = 303\mu F$
 $C = 5,09\mu F$; $L_m = 1237,5\mu F$; $I_{S_{\min}} = 4,58A$
 $I_{S_{\max}} = 7,0A$; $I_{S_{ef}} = 5,86A$; $I_{D_{\min}} = 2,0A$
 $I_{D_{\max}} = 7,0A$; $I_{D_{ef}} = 3,87A$; $V_{S_{\max}} = V_{D_{\max}} = 158V$
- $8^o)$ a) $D_{CRIT} = 0,46$
 b) $V_o = 47,7V$
 c) $P_o = 11,38W$
 d) $I_o = 0,24A$
 e) $\Delta I_{L_o} = 0,61A$
 f) $\Delta I_{L_m} = 0,28A$
 g) $I_{S_{\max}} = 0,89A$

CAPÍTULO 7

- $2^o)$ a) $V_o = 55V$
 $I_o = 60A$
 b) $I_M = 203,75A$

$I_m = ?$ (condução descontínua)

- $5^o)$ a) $D = 0,85$
 b) $t_c = 121,43\mu s$
 c) $\Delta I = 5,74A$
 d) $\Delta I_{\max} = 11,25A$
 e) $I_o = 18,75A$
 f) $I_M = 21,62A$
 $I_m = 15,88A$
 g) $P_o = 3000W$
- $6^o)$ c) $t_c = 30\mu s$
 $I_M = 13,5A$
 d) $t_a = 3,42A$
 e) $I_o = 4,51A$
 f) $D > 0,9$