

$$N_P = 7,32$$

Assim:

$$N_S = \frac{7,32 \cdot (12 + 1)(1 - 0,4)}{36 \cdot 0,4}$$

$$N_S \cong 4 \text{ espiras}$$

g) Enrolamento secundário para múltiplas saídas:

Para cada saída é empregada uma expressão do tipo:

$$N_{S_n} = N_P \frac{(V_{out_n} + V_F)(1 - D_{max})}{V_{min} D_{max}} \quad (2.112)$$

Sendo n um enrolamento qualquer secundário.

## CAPÍTULO 3

### FONTES CHAVEADAS DO TIPO FORWARD

#### 3.1 - Conversor Buck

a) Estrutura e etapas de funcionamento para condução contínua

A estrutura de um conversor Buck está representada na Fig. 3.1.

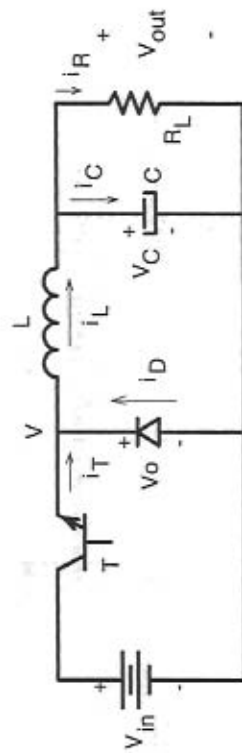


Fig. 3.1: Estrutura de um conversor do tipo Buck.

1ª Etapa: A primeira etapa de funcionamento é mostrada na Fig. 3.2.

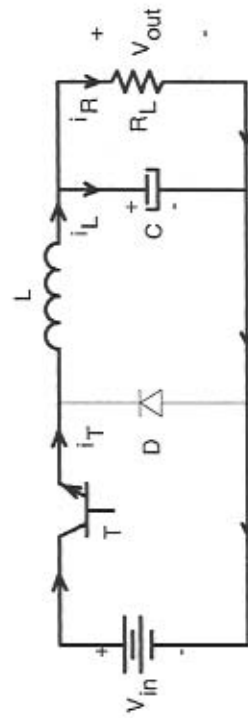


Fig. 3.2: 1ª Etapa de funcionamento.

O transistor T se encontra saturado e o diodo D bloqueado; a corrente  $i_L$  aumenta.

**2ª Etapa:** A segunda etapa de funcionamento é mostrada na Fig. 3.3.

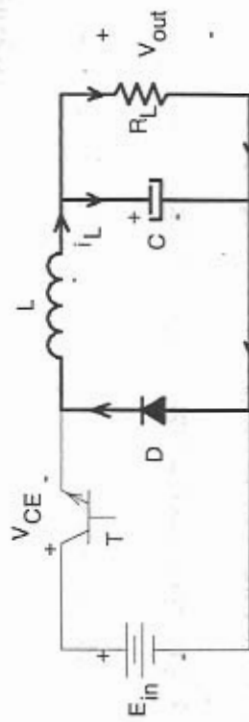


Fig. 3.3: 2ª Etapa de funcionamento.

O transistor T encontra-se bloqueado e o diodo D conduz a corrente  $i_L$ , que é decrescente.

b) Formas de onda considerando os componentes ideais

As principais formas de onda do conversor Buck são apresentadas na Fig. 3.4.

c) Análise das grandezas envolvidas

c.1) Tensão média na carga ( $V_{out}$ )

Como  $V_{Lmd} = 0$ ,  $V_{out} = V_{Dmd}$

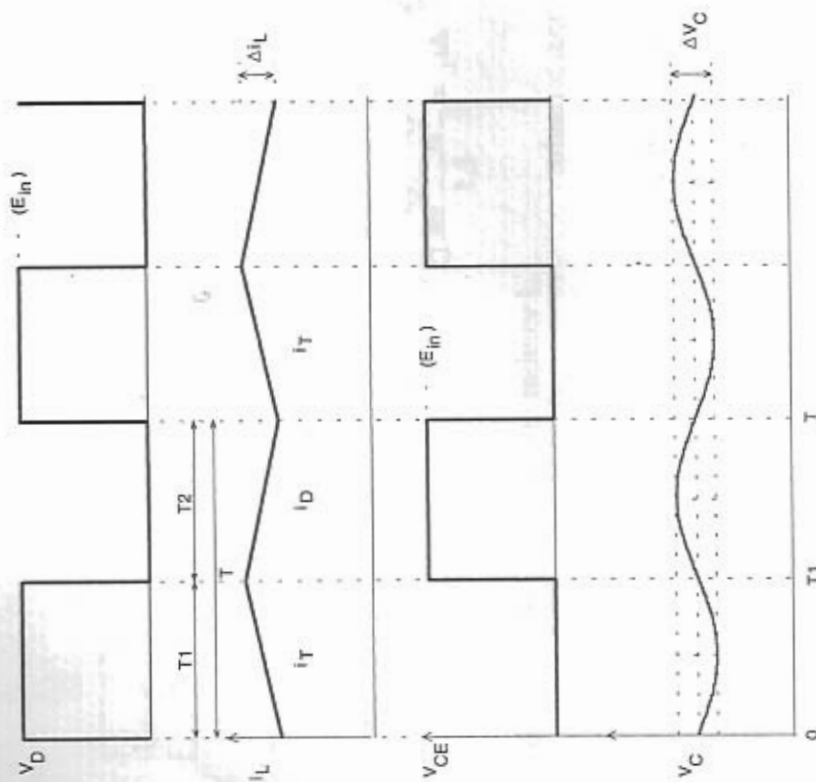


Fig. 3.4: Formas de onda para o conversor Buck.

Assim:

$$V_{out} = \frac{T_1}{T} V_{in} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{T_1}{T} \quad (3.2)$$

Assim:

$$V_{out} = DV_{in} \quad (3.3)$$

c.2) Corrente no indutor ( $\Delta i_L$ )

$$\Delta i_L = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} T_1 = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \cdot \frac{T_1}{T} \quad (3.4)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} - V_{out}}{L f} D \quad (3.5)$$

Considerando:

$$\Delta i_L \cong 0,4 I_{ind} \quad (3.6)$$

$$V_{out} = DV_{in} \quad (3.7)$$

Assim:

$$\Delta i_L = \frac{V_{in}(1-D)}{fL} D \quad (3.8)$$

$\Delta i_{Lmax}$  ocorre para  $D_{max} = 0,5$  Assim:

$$\Delta i_{Lmax} = \frac{V_{in}}{4fL} \quad (3.9)$$

ou

$$L = \frac{V_{in}}{4f \Delta i_{Lmax}} \quad (3.10)$$

$$I_P = \frac{\Delta i_L}{2} + i_R \quad (3.11)$$

$$I_P = \frac{\Delta i_L}{2} + \frac{V_{out}}{R_L} \quad (3.12)$$

Sendo  $I_P$  a corrente de pico no indutor  $L$ .

$$I_P = \frac{V_{out}}{R_L} + \frac{V_{in}(1-D)}{2fL} \quad (3.13)$$

c.3) Correntes de pico no transistor e no diodo

$$I_{TP} = I_{DP} = I_P \quad (3.14)$$

c.4) Tensão no capacitor ( $V_C$ )

No capacitor circula a componente alternada da corrente  $i_L$ , enquanto no resistor circula a componente média.

Assim:

$$i_C \cong \frac{\Delta i_L}{2} \sin(2\pi ft) \quad (3.15)$$

onde  $f \rightarrow$  frequência de chaveamento

$$V_{CA} = \frac{1}{C} i_C dt = \frac{\Delta i_L}{2C} \int \sin(2\pi ft) dt \quad (3.16)$$

$$V_{CA} = \frac{\Delta i_L}{2\pi f 2C} \cos(2\pi ft) \quad (3.17)$$

Assim:

$$\boxed{\Delta V_C = \frac{\Delta i_L}{2 \cdot 4\pi f C}} \quad (3.18)$$

Desse modo:

$$\boxed{C = \frac{\Delta i_L}{2\pi f \Delta V_C}} \quad (3.19)$$

Normalmente adota-se:

$$\Delta V_C = 0,01 V_{out} \quad (3.20)$$

c.5) Efeito da RSE do capacitor

$$V_{RSE} = RSE \cdot i_{L_{CA}} = RSE \cdot i_C \quad (3.21)$$

$$P_{RSE} = RSE \cdot i_{L_{CA}}^2 = RSE \cdot i_C^2 \quad (3.22)$$

As tensões  $V_{RSE}$  e  $\Delta V_C$  encontram-se em quadratura e a rigor devem ser adicionadas ponto a ponto para se determinar a forma e os valores exatos da tensão de carga. A experiência demonstra, porém que o valor de  $V_{RSE}$  em geral é predominante e pode ser tomada como a única responsável pela ondulação da tensão de carga.

d) Exemplo de Cálculo

$$\begin{aligned} V_{out} &= 10V \\ \Delta V_{out} &= 100mV \text{ (pico-a-pico)} \\ I_R &= 10A \\ V_{in_{max}} &= 40V \\ V_{in_{min}} &= 25V \\ f_{max} &= 50kHz \end{aligned}$$

$$d.1) V_{out} = D V_{in}$$

$$D_{max} = \frac{V_{out}}{V_{in_{min}}} = \frac{10}{25} = 0,4$$

$$D_{\max} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in max}}} = \frac{10}{40} = 0,25$$

$$d.2) \quad L = \frac{V_{\text{in}}(1-D)D}{f \Delta i_L}$$

$$\Delta i_L = 0,4 I_{\text{md}} = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ A}$$

$$f = 50 \text{ kHz}$$

$$V_{\text{in}} = 40 \text{ V}$$

$$D = 0,25$$

$$L = \frac{40 \cdot 0,75 \cdot 0,25}{50 \cdot 10^3 \cdot 4} = 37,5 \mu\text{H}$$

$$d.3) \quad \Delta V_C = 0,01 V_{\text{out}} = 0,01 \cdot 10 = 0,1 \text{ V}$$

$$C = \frac{\Delta i_L}{2\pi f \Delta V_C} = \frac{4}{2\pi \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,1}$$

$$\boxed{C = 127 \mu\text{F}}$$

$$d.4) \quad \text{RSE} = \frac{\Delta V}{\Delta i_L} = \frac{0,1}{4}$$

$$\text{RSE} = 0,025 \Omega$$

Ao selecionar um capacitor que satisfaça a restrição da RSE, você verificará que ele terá uma capacidade muito maior que  $127 \mu\text{F}$ .

### 3.2 - Conversor Forward (Buck isolado)

a) Estrutura e etapas de funcionamento para condução contínua:

A estrutura do conversor Forward está representada na

Fig. 3.5.

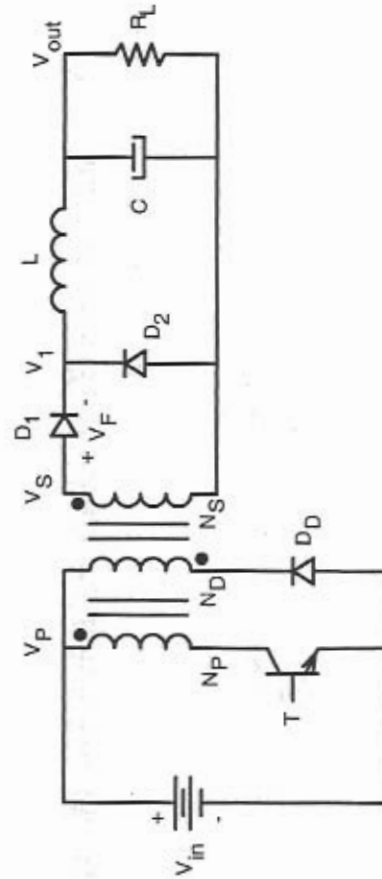


Fig. 3.5: Conversor Forward.

Onde:

$N_P$  - enrolamento primário;

$N_S$  - enrolamento secundário;

$N_D$  - enrolamento de desmagnetização.

A seguir serão descritas as etapas de funcionamento, considerando os componentes ideais e o transformador sem indutância de dispersão.

**1ª Etapa:** O transistor T encontra-se saturado; os diodos  $D_D$  e  $D_2$  encontram-se bloqueados;  $D_1$  encontra-se em condução; não há corrente no enrolamento de desmagnetização.

$$V_P = V_{in} \quad (3.23)$$

$$V_S = \frac{N_S}{N_P} V_P \quad (3.24)$$

O circuito equivalente da 1ª etapa, visto do lado primário do transformador, está representado na Fig. 3.7.

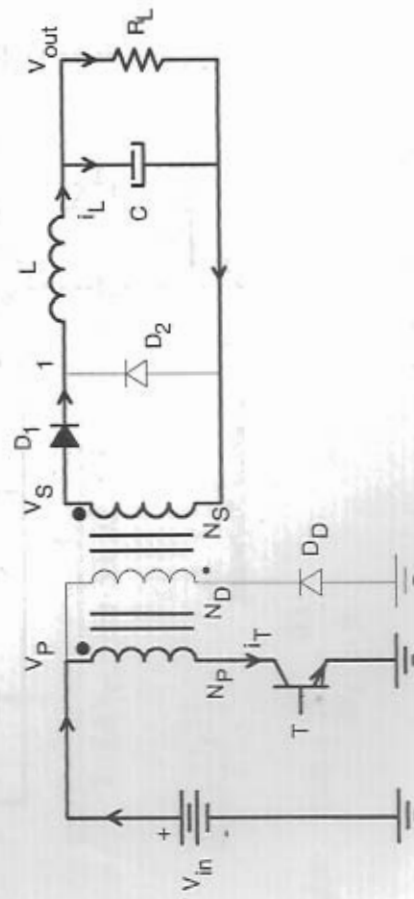


Fig. 3.6: 1ª Etapa de funcionamento.

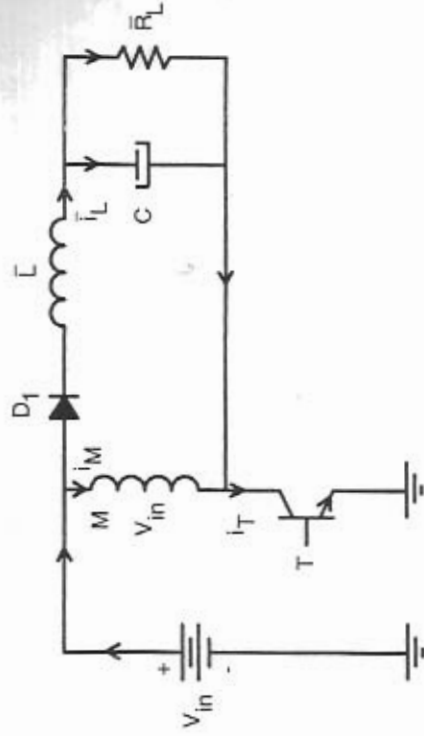


Fig. 3.7: Circuito equivalente para a 1ª etapa.

M - indutância magnetizante do transformador.

$$\bar{i}_L = i_L \frac{N_S}{N_P} \quad (3.25)$$

$$i_M = \frac{V_{in} t}{M} \quad (3.26)$$

$$i_T = i_M + \bar{i}_L = i_M + i_L \frac{N_S}{N_P} \approx i_L \frac{N_S}{N_P} \quad (3.27)$$

$$I_{in} = I_T = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{P_{out}}{\eta V_{in}} = D I_P \quad (3.28)$$

$$I_P = \frac{P_{out}}{\eta V_{in} D} \quad (3.29)$$

Seja 20% de acréscimo devido a magnetizante:

$$I_P = \frac{1,2 P_{out}}{\eta V_{in} D} \quad (3.30)$$

$$I_{Pmax} = \frac{1,2 P_{out}}{\eta V_{inmin} D_{max}} \quad (3.31)$$

Se  $D_{max} = 0,4$  e  $\eta = 0,75$  tem-se:

$$I_{Pmax} = \frac{1,2}{0,4 \cdot 0,75} \frac{P_{out}}{V_{inmin}} \equiv 4 \frac{P_{out}}{V_{inmin}} \quad (3.32)$$

**2ª Etapa:** O transistor T é mantido bloqueado;  $D_1$  se bloqueia e a corrente  $i_L$  do indutor de filtragem circula pelo diodo  $D_2$ ; a energia acumulada na indutância magnetizante é devolvida à fonte  $V_{in}$  através do diodo  $D_D$ .

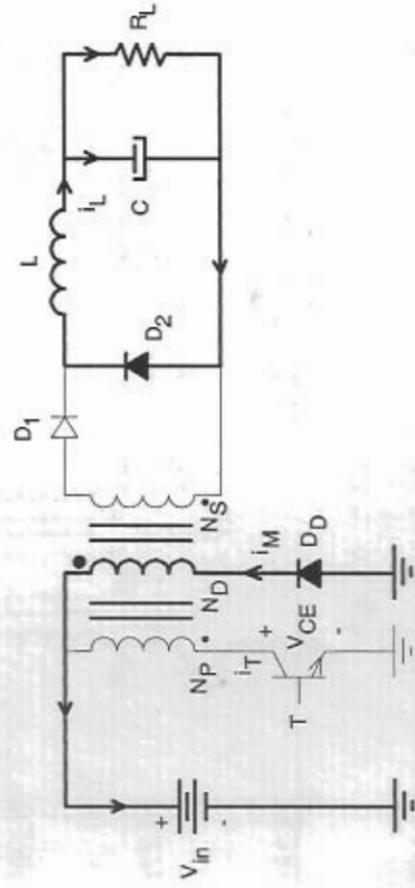


Fig. 3.8: 2ª Etapa de funcionamento.

Durante a 2ª etapa de funcionamento o transformador deve ser inteiramente desmagnetizado, caso contrário ele saturará e provocará um mau funcionamento no conversor.

b) Formas de onda considerando os componentes ideais

As formas de onda mais importantes estão representadas na Fig. 3.9.

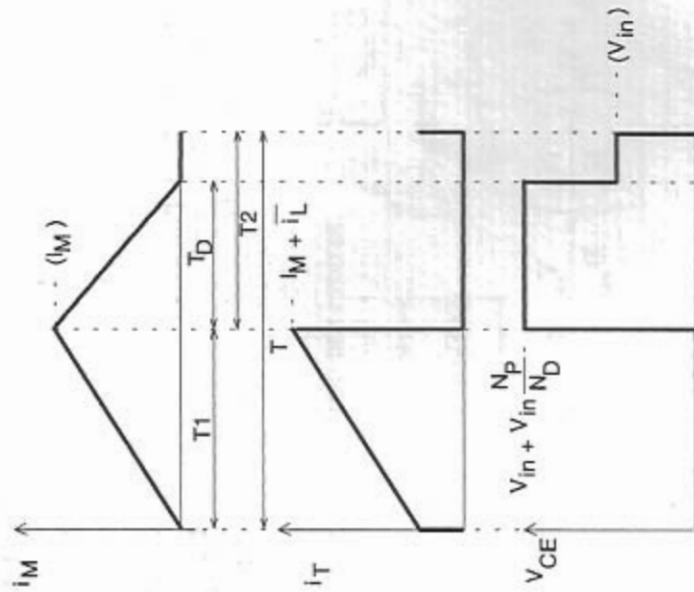


Fig. 3.9: Formas de onda para o conversor Forward.



c) Análise das grandezas envolvidas

Para que a desmagnetização seja assegurada é necessário que quando a razão cíclica for máxima,  $T_D = T_2$ . Assim:

$$N_P V_{in} T_1 = N_D T_2 V_{in} \quad (3.33)$$

Desse modo:

$$N_P T_1 = N_D T_2 \quad (3.34)$$

ou

$$\frac{N_P}{N_D} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T - T_1}{T_1} = \frac{T}{T_1} - 1 \quad (3.35)$$

$$\boxed{\frac{N_P}{N_D} = \frac{1}{D_{max}} - 1} \quad (3.36)$$

Assim:

$$V_{CEmax} = V_{in} \left( 1 + \frac{N_P}{N_D} \right) = \frac{V_{in}}{D_{max}} \quad (3.37)$$

$$\boxed{V_{CEmax} = \frac{V_{in}}{D_{max}}} \quad (3.38)$$

Normalmente toma-se  $D_{max} = 0,5$ . Assim:

$$\boxed{V_{CEmax} = 2V_{in} \quad e \quad \frac{N_P}{N_D} = 1}$$

d) Cálculo do indutor de filtragem

Seja a corrente no indutor, representada na Fig. 3.4.

$$\phi = LI = BA_c N \quad (3.40)$$

Assim:

$$N = \frac{LI}{BA_c} = \frac{LI_{pk}}{B_{max} A_c} \quad (3.41)$$

Tomando-se o resultado em espiras:

$$\boxed{N = \frac{LI_{pk}}{B_{max} A_c} \cdot 10^4 \text{ [espiras]}}$$

$$L \rightarrow [H]$$

$$I_{pk} \rightarrow [A]$$

$$B_{max} \rightarrow [\text{Teslas}]$$

$$A_c \rightarrow [cm^2]$$

$$\begin{cases} L \rightarrow H \\ B_{pk} \rightarrow T \\ A_c \rightarrow cm^2 \\ I_{pk} \rightarrow A \end{cases}$$

$$L = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{V_{inm} (1 - D_{max}) D_{max}}{f_s \Delta I_L}$$

$$\Delta I_L = 0,2 I_o \text{ (ARBITRÁRIO)}$$

$$I_{pk} = I_o + \Delta I_L$$



A expressão (3.42) define o valor de  $L$  em função do número de espiras ( $N$ ).

Seja a relação (3.43):

$$NI = JA_p = JA_w k_w \quad (3.43)$$

Assim:

$$N = \frac{A_w JK_w}{I} = \frac{A_w k_w J_{\max}}{I_{ef}} \quad (3.44)$$

$$\frac{LI_{pk}}{B_{\max} A_e} = \frac{A_w k_w J_{\max}}{I_{ef}} \quad (3.45)$$

Desse modo:

$$A_e A_w = \frac{LI_{pk} I_{ef}}{k B_{\max} J_{\max}} \quad (3.46)$$

onde:

$A_e$  - área efetiva da perna central do núcleo;

$A_w$  - área da janela (onde é situado o enrolamento);

$K_w$  - fator de enrolamento;

$B_{\max}$  - máxima densidade de fluxo magnético;

$J_{\max}$  - máxima densidade de corrente elétrica.

$$C \geq \frac{\Delta V_L}{\Delta V_C} \quad \Delta V_C = \text{dado (de 1\%, 10\% de } V_C \text{ (tensão de saída))}$$

Se a ondulação da corrente for pequena pode-se adotar:

$$I_{ef} = I_{pk} \quad (3.47)$$

$$A_e A_w = \frac{LI_{pk}^2}{k B_{\max} J_{\max}} \quad (3.48)$$

Tomando todas as dimensões em cm:

$$A_e A_w = \frac{LI_{pk}^2}{k B_{\max} J_{\max}} 10^{-4} [\text{cm}^4]$$

Porém,  $N$  para núcleo toroidal tem duas bobinas



$$\begin{aligned} B_{\max} &\approx 0,3 \text{ Teslas;} \\ J_{\max} &\approx 450 \text{ A/cm}^2; \\ k_w &\approx 0,7; \\ L [H]; \\ I [A]. \end{aligned}$$

O cálculo do entreferro é realizado como segue.

Depois de determinar  $N$  o  $g$  se encontra o  $N^\circ$  de espiras ( $N$ ) usando a eq 3.51 Se  $N$  for inteiro

$$L = \frac{N^2}{R_0} = \frac{N^2 \mu_0 A_e}{\ell g}$$

$$(3.50)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (ar)}$$

$$\ell g = \frac{N^2 \mu_0 A_e}{L} 10^{-2} \text{ [cm]} \quad (3.51)$$

e) Exemplo de cálculo de indutor

Dando continuidade ao exemplo do item d:

$$L = 37,5 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

$$I_{pk} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = 10 + 2 = 12 \text{ A}$$

$$\text{e.1) } A_e A_w = \frac{37,5 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,3 \cdot 450}$$

$$A_e A_w \approx 0,57 \text{ cm}^4$$

Escolhendo-se o núcleo E-30/14

$$A_w = 0,85 \text{ cm}^2;$$

$$A_e = 1,20 \text{ cm}^2.$$

$A_w A_e = 1,02 \text{ cm}^4$ . Desse modo este núcleo pode ser adotado como primeira tentativa.

$$\text{e.2) } N = \frac{L I_{pk}}{B A_e} 10^4 = \frac{37,5 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 10^4}{0,3 \cdot 1,20}$$

$N \approx 13$  espiras. Bitola do fio = 13 AWG ou 12 AWG.

$$\text{e.3) } \ell g = \frac{N^2 \mu_0 A_e}{L} 10^{-2} = \frac{13^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,20}{37,5 \cdot 10^{-6}} 10^{-2}$$

$$\boxed{\ell g = 0,068 \text{ cm}} \quad \ell g - \text{entreferro do núcleo.}$$

f) Cálculo do Transformador

Seja um transformador para um conversor Forward, com vários enrolamentos, onde:

AM - área ocupada pelos condutores do enrolamento M. Assim:

$$A_w k_w = A_1 + A_2 + \dots + A_M \quad (3.52)$$

$A_w$  - área da janela do núcleo;

$k_w$  - fator de enrolamento, igual a 0,4 para os transformadores, devido ao material isolante que separa os enrolamentos;

$A_w k_w$  - área total ocupada pelo cobre;

$A_p$  - área do enrolamento primário;

$A_s$  - área do enrolamento secundário.

$$A_p = A_w k_w k_p \quad (k_p = 0,5) \quad (3.53)$$

Admite-se que o cobre do enrolamento primário ocupe a metade da área total de cobre.

Desse modo:

$$A_s = A_p \quad (3.54)$$

Consideremos as relações:

$$N_p I_p = A_p J = k_w k_p A_w J \quad (3.55)$$

$$N_p = \frac{k_w k_p A_w J}{I_p} \quad (3.56)$$

$$I_p = \frac{4P_{out}}{V_{in,min}} \quad (3.57)$$

Assim:

$$N_p = \frac{k_w k_p A_w J V_{in,min}}{4P_{out}} \quad (3.58)$$

$$A_w = \frac{4P_{out} N_p}{k_w k_p J V_{in,min}} \quad (3.59)$$

Seja a Lei de Faraday:

$$Edt = Nd\phi \quad (3.60)$$

$$V_{in} T_1 = N_p \Delta B A_e \quad (3.61)$$

$$A_e = \frac{V_{in,min} T_{1,max}}{N_p \Delta B} \quad (3.62)$$

$$T_{1,max} = D_{max} T = \frac{D_{max}}{f} \quad (3.63)$$

$$A_e = \frac{V_{in,min} D_{max}}{N_p \Delta B f} \quad (3.64)$$

$$A_e A_w = \frac{V_{in,min} D_{max}}{N_p \Delta B f} \frac{4P_{out} N_p}{k_w k_p J V_{in,min}} \quad (3.65)$$

$$A_e A_w = \frac{4P_{out} D_{max}}{k_w k_p J f \Delta B} \quad (3.66)$$

Seja  $D_{max} = 0,5$ . Assim, considerando-se também o rendimento tem-se:

$$A_e A_w = \frac{2P_{out}}{k_w k_p J f \Delta B \eta} \quad (3.67)$$

Tomando todas as dimensões em cm, obtém-se:

$$A_c A_w = \frac{2P_{out}}{k_w k_p J f \Delta B \eta} 10^4 \text{ [cm}^4\text{]} \quad (3.68)$$

onde:

$$J = 450 \text{ A/cm}^2;$$

$$\Delta B = 0,3 \text{ Teslas.}$$

Com a expressão deduzida escolhe-se o tamanho do núcleo a ser empregado.

Após o núcleo ter sido escolhido, determina-se o número de espiras do primário:

$$N_p = \frac{V_{in_{min}} T_{I_{max}}}{A_c \Delta B} \quad (3.69)$$

$$N_p = \frac{V_{in_{min}} D_{max}}{A_c \Delta B f} \quad (3.70)$$

$$N_p = \frac{V_{in_{min}}}{2 A_c \Delta B f} \quad (3.71)$$

O passo seguinte é o cálculo do número de espiras do enrolamento secundário. A partir do estágio de saída do conversor representado na

Fig. 3.5, obtém-se a relação (3.72):

$$V_{out} = V_i D = (V_s - V_F) D \quad (3.72)$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{N_s}{N_p} D - V_F D \quad (3.73)$$

$$V_{in} \frac{N_s}{N_p} D = V_{out} + V_F D \quad (3.74)$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_{out} + V_F D}{V_{in} D} \quad (3.75)$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_{out} + V_F D_{max}}{V_{in_{min}} D_{max}} \quad (3.76)$$

Considerando a redução de tensão provocada pelos tempos de comutação do transistor, recomenda-se o emprego da seguinte expressão:

$$\frac{N_s}{N_p} = n = 1,1 \frac{(V_{out} + V_F D_{max})}{V_{in_{min}} D_{max}} \quad (3.77)$$

Caso existam vários secundários, deve-se calcular em primeiro lugar o número de espiras do enrolamento que corresponde à menor tensão de saída; deve-se tomar um número inteiro, para facilitar a fabricação do transformador, no valor mais próximo acima do calculado.

Como passo seguinte, deve-se recalcular o valor de  $N_p$ , com o emprego da relação:

$$N_p = \frac{N_s}{n} \quad (3.78)$$

Se o novo valor for diferente do primeiro  $N_p$  calculado, deve-se verificar o novo valor de  $\Delta B$ . Se não for satisfatório deve-se escolher um novo núcleo e repetir todos os passos de cálculo.

g) Exemplo de cálculo do transformador

$$V_{out} = 12V$$

$$P_{out} = 120W$$

$$f = 20kHz$$

$$V_{in} = 311 \pm 20\%V$$

$$V_{Imin} \approx 249V$$

$$\eta = 75\%$$

$$\text{Tomando: } k_w = 0,4$$

$$V_F = 1,0$$

$$k_p = 0,5$$

$$D_{max} = 0,4$$

$$J = 450A/cm^2$$

$$\Delta B = 0,3T$$

$$g.1) A_e A_w = \frac{2 \cdot 120 \cdot 10^4}{0,3 \cdot 0,5 \cdot 450 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \cdot 0,75} = 7,9cm^4$$

Tomando o núcleo E 55 obtém-se:

$$A_e = 3,54cm^2$$

$$A_w = 2,50cm^2$$

$$A_e A_w = 8,85cm^4$$

Portanto o núcleo escolhido deve ser inicialmente adotado.

$$g.2) N_p = \frac{V_{Imin}}{2 A_e \Delta B f} = \frac{249}{2 \cdot 3,54 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3 \cdot 20 \cdot 10^3}$$

$N_p \approx 59$  espiras.

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_{out}}{V_{inmin}} = \frac{12}{249} = 0,048$$

$$\frac{N_s}{N_p} = n = 1,1 \frac{249 \cdot 0,4}{(12 + 1,0 \cdot 0,4)} = 0,137$$

$$N_s = n N_p = 0,137 \cdot 59 = 8 \text{ espiras}$$

g.3) Enrolamento de desmagnetização: possuirá 59 espiras ( igual ao enrolamento primário ) com 20% da corrente primária.

g.4) Corrente eficaz secundária

$$I_{s_d} \approx \frac{I_{out}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{1,41} \approx 7,1A$$

Será adotado o fio 15 AWG.



g.5) Corrente no enrolamento primário

$$I_p = \frac{4P_{out}}{V_{min}} = \frac{4 \cdot 120}{249} \approx 1,93A$$

$$I_{ef} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \approx 1,4A$$

Será empregado o fio 22 AWG.

$$I_{p1} = 20\% I_p = 0,39A$$

$$I_{T1} = 20\% I_{p1}$$

FILTRO DE SAÍDA:

$$\Delta i_L = 0,2 I_o = 2A$$

$$I_{pk} = I_o + \frac{\Delta i_L}{2} = 11A$$

$$L = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{V_{min} (1 - D_{max}) D_{max}}{f_s \cdot \Delta i_L} = 204 \mu H$$

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{pk}^2 \cdot 10^4}{k_v \cdot B_{max} \cdot f_s} = 3,93 cm^4$$

$$A_e = 3,93$$

## CAPÍTULO 4

### CONVERSORES BRIDGE, HALF-BRIDGE E

#### PUSH-PULL

#### 4.1 - Conversor em meia-ponte (Half-Bridge)

a) Estrutura e etapas de funcionamento

A estrutura básica do conversor em meia-ponte está representada na Fig. 4.1.

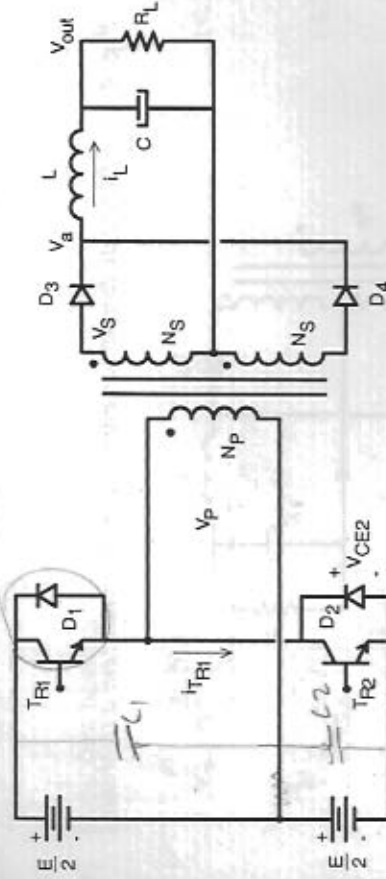


Fig. 4.1: Conversor meia-ponte.

Definições:

$$D = \frac{T_1}{T} = \text{razão cíclica;}$$