

CAPÍTULO 10

EXEMPLO DE PROJETO DO ESTÁGIO DE POTÊNCIA DE UMA FONTE CHAVEADA BASEADO NO CONVERSOR FLYBACK

10.1 - Introdução

Neste capítulo será desenvolvida uma fonte chaveada, aplicada como fonte auxiliar, com nove saídas. As tensões de saída são: +15V, -15V e 24V. Pela potência envolvida (16W) a topologia mais adequada para a implementação é o conversor Flyback em modo de condução descontínua.

10.2 - Especificações de projeto

Sejam as seguintes especificações de projeto:

$$V_i = 125V \pm 20\%$$

Tensão de entrada;

$$V_{o1} = +15V \text{ e } I_{o1} = 100mA$$

Tensão e corrente na saída nº 01;

$$V_{o2} = -15V \text{ e } I_{o2} = 100mA$$

Tensão e corrente na saída nº 02;

$$V_{o3} = +15V \text{ e } I_{o3} = 100mA$$

Tensão e corrente na saída nº 03;

$$V_{o4} = -15V \text{ e } I_{o4} = 100mA$$

Tensão e corrente na saída nº 04;

$$V_{o5} = +24V \text{ e } I_{o5} = 100mA$$

Tensão e corrente na saída nº 05;

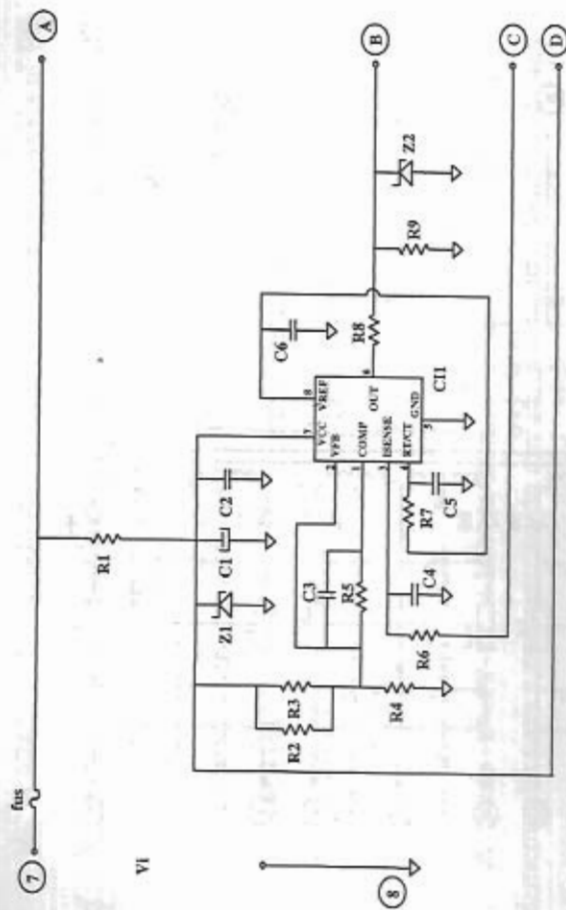


Fig. 10.2: Circuito de controle da fonte chaveada com o conversor Flyback.

- $V_{o_2} = 18V$ e $\Delta V_{o_2} = 0,9V$
- $V_{o_3} = 18V$ e $\Delta V_{o_3} = 0,9V$
- $V_{o_4} = 18V$ e $\Delta V_{o_4} = 0,9V$
- $V_{o_5} = 27V$ e $\Delta V_{o_5} = 1,35V$
- $V_{o_6} = 27V$ e $\Delta V_{o_6} = 1,35V$
- $V_{o_7} = 27V$ e $\Delta V_{o_7} = 1,35V$
- $V_{o_8} = 27V$ e $\Delta V_{o_8} = 1,35V$
- $V_{o_9} = 15V$ e $\Delta V_{o_9} = 0,7V$

A razão cíclica mínima de operação adotada será $D_{\min} = 0,25$.

O rendimento esperado da estrutura é de $\eta = 0,7$. A permeabilidade magnética do ar é $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} Tm / A$.

10.4.b - Potência de entrada e saída da fonte

A potência de saída da fonte chaveada é dada por:

$$P_o = \sum_{k=1 \dots 9} V_{o_k} I_{o_k} = 18,75W$$

A potência de entrada será:

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{18,75}{0,7} = 26,79W$$

10.4.c - Projeto do transformador

Adotando-se para as variáveis de entrada os valores dados a seguir:

$$k_p = 0,5$$

$$k_w = 0,4$$

$$J = 300 A / cm^2$$

Fator de utilização do primário;

Fator de utilização da área do enrolamento;

Densidade de corrente nos condutores;

$$J_{\max} = 350 \text{ A/cm}^2$$

Densidade máxima de corrente nos condutores;

$$V_d = 1\text{V}$$

Queda de tensão nos diodos;

$$\Delta B = B = 0,18\text{T} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ G}$$

Densidade de fluxo magnético;

$$\Delta B_{\max} = 0,2\text{T}$$

Máxima variação da densidade de fluxo magnético.

O produto $A_e A_w$ é determinado por:

$$A_e A_w = \frac{1,1 P_o 10^4}{k_p k_w J f_s \Delta B} = \frac{1,1 \cdot 18,75 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot 40000 \cdot 0,18} = 0,477 \text{ cm}^4$$

Desta forma o núcleo escolhido é o E 30/14 da Thornton.

Os dados deste núcleo são:

$$A_e = 1,2 \text{ cm}^2 \quad A_w = 0,85 \text{ cm}^2 \quad A_e A_w = 1,02 \text{ cm}^4$$

O entreferro do transformador é calculado por:

$$\delta = \frac{2 \mu_o P_o 10^8}{\Delta B^2 A_e \eta f_s} = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 18,75 \cdot 10^8}{(0,18)^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,7 \cdot 40000} = 0,043 \text{ cm}$$

$$\lg = \frac{\delta}{2} = \frac{0,043}{2} = 0,022 \text{ cm}$$

A corrente do primário é dada por:

$$I_p = \frac{2 P_o}{\eta V_{\min} D_{\max}} = \frac{2 \cdot 18,75}{0,7 \cdot 100 \cdot 0,45} = 1,19 \text{ A}$$

O número de espiras do primário é calculado por:

$$N_p = \frac{B \delta}{0,4 \pi I_p} = \frac{1,8 \cdot 10^3 \cdot 0,022}{0,4 \cdot \pi \cdot 1,19} = 53 \text{ espiras}$$

O número de espiras dos secundários será:

$$N_{s_k} = N_p \frac{(V_{o_k} + V_d)(1 - D_{\max})}{V_{\min} D_{\max}}$$

Assim:

$$\begin{array}{llll} N_{s_1} = 13 \text{ espiras} & N_{s_4} = 13 \text{ espiras} & N_{s_7} = 19 \text{ espiras} \\ N_{s_2} = 13 \text{ espiras} & N_{s_5} = 19 \text{ espiras} & N_{s_8} = 19 \text{ espiras} \\ N_{s_3} = 13 \text{ espiras} & N_{s_6} = 19 \text{ espiras} & N_{s_9} = 11 \text{ espiras} \end{array}$$

10.4.d - Cálculo dos capacitores

Os capacitores de filtro de saída são calculados por:

$$C_k = \frac{I_{o_k} D_{\max}}{f_s \Delta V_{o_k}}$$

Assim:

$$\begin{array}{lll} C_{10} = 1,25\mu\text{F} & C_{11} = 1,25\mu\text{F} & C_{16} = 1,25\mu\text{F} \\ C_{17} = 1,25\mu\text{F} & C_{22} = 0,83\mu\text{F} & C_{25} = 0,83\mu\text{F} \\ C_{28} = 0,83\mu\text{F} & C_{31} = 0,8\mu\text{F} & \end{array}$$

A corrente de pico através dos enrolamentos secundários é definida por:

$$I_{s_k} = \frac{2I_{o_k}}{(1-D_{\max})}$$

Assim:

$$\begin{array}{lll} I_{s_1} = 0,364\text{A} & I_{s_2} = 0,364\text{A} & I_{s_3} = 0,364\text{A} \\ I_{s_4} = 0,364\text{A} & I_{s_5} = 0,364\text{A} & I_{s_6} = 0,364\text{A} \\ I_{s_7} = 0,364\text{A} & I_{s_8} = 0,364\text{A} & I_{s_9} = 0,182\text{A} \end{array}$$

A resistência série equivalente máxima dos capacitores será:

$$RSE_k = \frac{\Delta V_{o_k}}{I_{s_k}}$$

Assim:

$$\begin{array}{lll} RSE_1 = 2,475\Omega & RSE_2 = 2,475\Omega & RSE_3 = 2,475\Omega \\ RSE_4 = 2,475\Omega & RSE_5 = 3,713\Omega & RSE_6 = 3,713\Omega \\ RSE_7 = 3,713\Omega & RSE_8 = 3,713\Omega & RSE_9 = 3,85\Omega \end{array}$$

Desta forma, os capacitores de filtro escolhidos são:

$$\begin{array}{lll} C_{10} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} & C_{11} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} & C_{16} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} \\ C_{17} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} & C_{22} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} & C_{25} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} \\ C_{28} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} & C_{31} = 47\mu\text{F} \times 40\text{V} & \end{array}$$

10.4.e - Dimensionamento dos diodos

A corrente de pico nos diodos é dada por:

$$I_{d_{pk}} = I_{s_k}$$

Assim:

$$\begin{aligned}
 I_{d_{p1}} &= 0,364A & I_{d_{p2}} &= 0,364A & I_{d_{p3}} &= 0,364A \\
 I_{d_{p4}} &= 0,364A & I_{d_{p5}} &= 0,364A & I_{d_{p6}} &= 0,364A \\
 I_{d_{p7}} &= 0,364A & I_{d_{p8}} &= 0,364A & I_{d_{p9}} &= 0,182A
 \end{aligned}$$

A corrente média nos diodos será:

$$I_{d_{medk}} = I_{o_k}$$

Assim:

$$\begin{aligned}
 I_{d_{med1}} &= 0,1A & I_{d_{med2}} &= 0,1A & I_{d_{med3}} &= 0,1A \\
 I_{d_{med4}} &= 0,1A & I_{d_{med5}} &= 0,1A & I_{d_{med6}} &= 0,1A \\
 I_{d_{med7}} &= 0,1A & I_{d_{med8}} &= 0,1A & I_{d_{med9}} &= 0,05A
 \end{aligned}$$

A tensão de pico sobre os diodos será:

$$V_{d_{pk}} = V_{o_k} + V_{in_{max}} \frac{N_{s_k}}{N_p}$$

Assim:

$$\begin{aligned}
 V_{d_{p1}} &= 54,792V & V_{d_{p2}} &= 54,792V & V_{d_{p3}} &= 54,792V \\
 V_{d_{p4}} &= 54,792V & V_{d_{p5}} &= 80,774V & V_{d_{p6}} &= 80,774V
 \end{aligned}$$

$$V_{d_{p7}} = 80,774V \quad V_{d_{p8}} = 80,774V \quad V_{d_{p9}} = 46,132V$$

10.4.f - Seção dos condutores

A corrente eficaz no primário será:

$$I_{p_{ef_{max}}} = I_p \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} = 1,19 \sqrt{\frac{0,45}{3}} = 0,461A$$

A área do condutor necessária é:

$$S_{cu_p} = \frac{I_{p_{ef_{max}}}}{J} = \frac{0,461}{300} = 1,537 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

As correntes nos enrolamentos secundários serão:

$$I_{s_{ef_{maxk}}} = I_{s_k} \sqrt{\frac{1-D_{max}}{3}}$$

Assim:

$$\begin{aligned}
 I_{s_{ef_{max1}}} &= 0,156A & I_{s_{ef_{max2}}} &= 0,156A & I_{s_{ef_{max3}}} &= 0,156A \\
 I_{s_{ef_{max4}}} &= 0,156A & I_{s_{ef_{max5}}} &= 0,156A & I_{s_{ef_{max6}}} &= 0,156A
 \end{aligned}$$

$$I_{s_{ef_{max7}}} = 0,156A \quad I_{s_{ef_{max8}}} = 0,156A \quad I_{s_{ef_{max9}}} = 0,078A$$

A área dos condutores será:

$$S_{cu_{s_k}} = \frac{I_{s_{ef_{max_k}}}}{J}$$

Assim:

$$S_{cu_{s_1}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \quad S_{cu_{s_2}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$S_{cu_{s_3}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \quad S_{cu_{s_4}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$S_{cu_{s_5}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \quad S_{cu_{s_6}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$S_{cu_{s_7}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \quad S_{cu_{s_8}} = 5,19 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$S_{cu_{s_9}} = 2,595 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

A profundidade de penetração devido ao efeito pelicular pode ser determinada por:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} = \frac{7,5}{\sqrt{40000}} = 0,0375 \text{ cm}$$

O diâmetro máximo será:

$$d_{\max} = 2\Delta = 2 \cdot 0,0375 = 0,075 \text{ cm}$$

Portanto, a seção dos condutores do transformador será:

$$\text{Primário: Fio 24 AWG} \quad S_{cu_{24 \text{ AWG}}} = 0,002047 \text{ cm}^2$$

$$\text{Secundário: Fio 29 AWG} \quad S_{cu_{29 \text{ AWG}}} = 0,000642 \text{ cm}^2$$

O número de condutores em paralelo no primário será:

$$N_{\text{fios}_p} = \frac{S_{cu_p}}{S_{cu_{24 \text{ AWG}}}} = \frac{0,001537}{0,002047} \approx 1$$

Já para os enrolamentos do secundário o número de condutores em paralelo é dado por:

$$N_{\text{fios}_{s_k}} = \frac{S_{cu_{s_k}}}{S_{cu_{29 \text{ AWG}}}} \approx 1$$

Portanto, os enrolamentos do transformador são:

- Primário: 53 espiras com 1 fio 24 AWG;
- Secundário 01: 13 espiras com 1 fio 29 AWG;
- Secundário 02: 13 espiras com 1 fio 29 AWG;
- Secundário 03: 13 espiras com 1 fio 29 AWG;
- Secundário 04: 13 espiras com 1 fio 29 AWG;
- Secundário 05: 19 espiras com 1 fio 29 AWG;

- Secundário 06: 19 espiras com 1 fio 29 AWG;
- Secundário 07: 19 espiras com 1 fio 29 AWG;
- Secundário 08: 19 espiras com 1 fio 29 AWG;
- Secundário 09: 11 espiras com 1 fio 29 AWG.

A possibilidade de execução do transformador é calculada por:

$$S_{\text{cu24AWG}_{\text{isol}}} = 0,002586 \text{cm}^2 \text{ e } S_{\text{cu29AWG}_{\text{isol}}} = 0,000872 \text{cm}^2$$

$$S_{\text{cu}_{\text{isol}}} = S_{\text{cu}_p} N_p + \sum_{k=1}^n (S_{\text{cu}_{s_k}} N_{s_k})$$

Portanto:

$$k_u = \frac{S_{\text{cu}_{\text{isol}}}}{A_w} = 0,304$$

Pode-se concluir que é possível construir o transformador, pois $k_u > 0,3$.

10.4.g - Dimensionamento do interruptor

A tensão máxima sobre o interruptor é dada por:

$$V_{S_{\text{max}}} = V_{\text{in}_{\text{max}}} \frac{1}{1 - D_{\text{max}}} = 150 \frac{1}{1 - 0,45} = 272,73 \text{V}$$

A corrente média no interruptor é:

$$I_{S_{\text{med}}} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{N_{s_k} I_{o_k}}{N_p} \right) = 0,252 \text{A}$$

A corrente eficaz do interruptor é dada por:

$$I_{S_{\text{ef}}} = \frac{V_{\text{in}_{\text{max}}}}{V_{\text{in}_{\text{min}}}} \frac{I_p}{D_{\text{max}}} \sqrt{\frac{D_{\text{max}}^3}{3}} = \frac{150 \cdot 1,19}{100 \cdot 0,45} \sqrt{\frac{(0,45)^3}{3}} = 0,692 \text{A}$$

O interruptor disponível para implementação é o IRF 740. As principais características deste componente são:

$$V_{\text{DS}_{\text{max}}} = 400 \text{V} \quad I_D = 6,3 \text{A} @ T = 100^\circ \text{C}$$

$$R_{\text{DS}_{\text{on}}} = 1,1 \Omega @ T = 100^\circ \text{C} \quad R_{\text{th}_{\text{je}}} = 1^\circ \text{C/W}$$

$$t_r = 120 \text{ns} \quad t_f = 140 \text{ns}$$

As perdas em condução são dadas por:

$$P_{\text{perd}_{\text{cond}}} = R_{\text{DS}_{\text{on}}} I_{S_{\text{ef}}}^2 = 1,1 \cdot 0,692 = 0,526 \text{W}$$

Já as perdas na comutação são:

$$P_{\text{perd}_{\text{com}}} = \frac{f_s}{2} (t_r + t_f) I_p V_{S_{\text{max}}} = \frac{40000}{2} (120 + 140) \cdot 10^{-9} \cdot 1,19 \cdot 272,73 = 1,688 \text{W}$$

As perdas totais no interruptor serão:

$$P_{\text{perd}_{\text{total}}} = P_{\text{perd}_{\text{cond}}} + P_{\text{perd}_{\text{com}}} = 0,526 + 1,688 = 2,214 \text{ W}$$

Considerando a temperatura ambiente como $T_{\text{amb}} = 50^{\circ}\text{C}$ e a temperatura máxima na junção de $T_{\text{jmax}} = 100^{\circ}\text{C}$ e a resistividade térmica entre cápsula e dissipador de $R_{\text{th}_{\text{cd}}} = 0,25^{\circ}\text{C/W}$ tem-se:

$$R_{\text{th}_{\text{da}}} = \frac{T_{\text{jmax}} - T_{\text{amb}} - P_{\text{perd}_{\text{total}}} R_{\text{th}_{\text{jc}}}}{P_{\text{perd}_{\text{total}}}} = \frac{100 - 50 - 2,214 \cdot 1}{2,214} = 21,58^{\circ}\text{C/W}$$

10.4.h - Dimensionamento dos dissipadores de calor dos reguladores lineares

As características térmicas dos dissipadores lineares da série 7815 são:

$$R_{\text{jc}} = 4^{\circ}\text{C/W} \quad T_{\text{jmax}} = 100^{\circ}\text{C} \quad T_{\text{amb}} = 50^{\circ}\text{C} \quad R_{\text{cd}} = 0,25^{\circ}\text{C/W}$$

A potência perdida sobre cada regulador é:

$$P_{\text{perd}_{\text{cond}}} = 0,4 \text{ W}$$

Portanto:

$$R_{\text{da}} = \frac{T_{\text{jmax}} - T_{\text{amb}} - P_{\text{perd}_{\text{cond}}} (R_{\text{jc}} + R_{\text{cd}})}{P_{\text{perd}_{\text{cond}}}} = \frac{100 - 50 - 0,4(4 + 0,25)}{0,4} = 120,75^{\circ}\text{C/W}$$

Conclui-se que não são necessários dissipadores de calor nos reguladores lineares.

10.5 - Especificações dos componentes

Todos os componentes utilizados para o desenvolvimento do conversor são especificados na Tabela 1.

Tabela 10.1 – Especificações dos Componentes.

Quant.	Referência	Descrição	Tipo	Valor
1	C ₁	Capacitor eletrolítico		100µF, 40V
10	C ₂ , C ₇ , C ₁₄ , C ₁₅ , C ₂₀ , C ₂₁ , C ₂₄ , C ₂₇ , C ₃₀ , C ₃₃	Capacitores multicamada		100nF
1	C ₃	Capacitor multicamada		1nF
1	C ₄	Capacitor multicamada		470pF
1	C ₅	Capacitor multicamada		2,2nF
1	C ₆	Capacitor multicamada		10nF
17	C ₈ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₂ , C ₁₃ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉ , C ₂₂ , C ₂₃ , C ₂₅ , C ₂₆ , C ₂₈ , C ₂₉ , C ₃₁ , C ₃₂	Capacitores eletrolíticos		47µF/40V
1	C ₉	Capacitor polipropileno		220nF/400V
10	D ₁ , D ₂ , D ₄ , D ₅	Diodos ultra-	MUR120	1A, 200V

CONSIDERAÇÕES SOBRE O EMPREGO DE CAPACITORES

a) Circuito Equivalente do Capacitor

Um capacitor tem o seguinte circuito equivalente (Fig. A1.1).



Fig. A1.1: Circuito equivalente série do capacitor.

Onde: C - capacitância.

RSE - resistência série equivalente.

LSE - indutância série equivalente.

Nas frequências usuais em eletrônica de potência ($f < 100$ kHz), o efeito da LSE pode ser ignorado.

A componente alternada da corrente que circula pelo capacitor produz dois efeitos:

- Perdas, que podem provocar excessivo aquecimento e danificar o capacitor, que são calculadas pela seguinte expressão:

$$P = RSE \cdot I_{ef}^2$$

	$D_6, D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}$	rápidos		
1	D_3	Diodo ultra-rápido	MUR140	1A, 400V
2	L_1, L_3	Reguladores lineares	LM7815	1A, +15V
2	L_2, L_4	Reguladores lineares	LM7915	1A, -15V
4	L_5, L_6, L_7, L_8	Reguladores lineares	LM7824	1A, +24V
1	M_1	Transistor MOSFET	IRF740	6,3A, 400V
1	R_1	Resistor		47k Ω , 2W
1	R_2	Resistor		220k Ω , 1/3W
1	R_3	Resistor		22k Ω , 1/3W
1	R_4	Resistor		3,9k Ω , 1/3W
1	R_5	Resistor		150k Ω , 1/3W
2	R_6, R_9	Resistores		1k Ω , 1/3W
1	R_7	Resistor		10k Ω , 1/3W
1	R_8	Resistor		10 Ω , 1/3W
1	R_{10}	Resistor		330 Ω , 1W
1	R_{11}	Resistor		0,5 Ω (2 resistores em paralelo de 1 Ω /1W)
1	R_{12}	Resistor		33k Ω , 2W
1	T_r	Transformador Flyback	E-30/14 Thornton	$N_p = 53$ esp, 1 fio 24AWG $N_{s_1} = N_{s_2} = N_{s_3} = N_{s_4} = N_{s_5} = 13$ esp, 1 fio 29AWG $N_{s_6} = N_{s_7} = N_{s_8} = N_{s_9} = 19$ esp, 1 fio 29AWG $N_{s_{10}} = 1$ esp 1 fio 29AWG $l_g = 0,3$ mm (entreferro do núcleo)
1	Z_1	Zener		18V, 1W
1	Z_2	Zener		16V, 0,5W
1	CI_1	Circuito integrado	UC2844 ou UC3844	
1	Fus	Fusível		2A