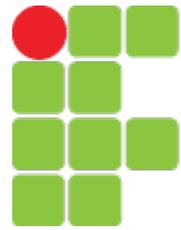


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

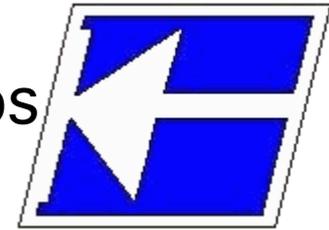


INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Pós-Graduação em Desen. de Produtos Eletrônicos

Conversores Estáticos e Fontes Chaveadas



Projeto de Transformadores para Alta Frequência

Prof. Clovis Antonio Petry.
Prof. Joabel Moia.

Florianópolis, abril de 2014.

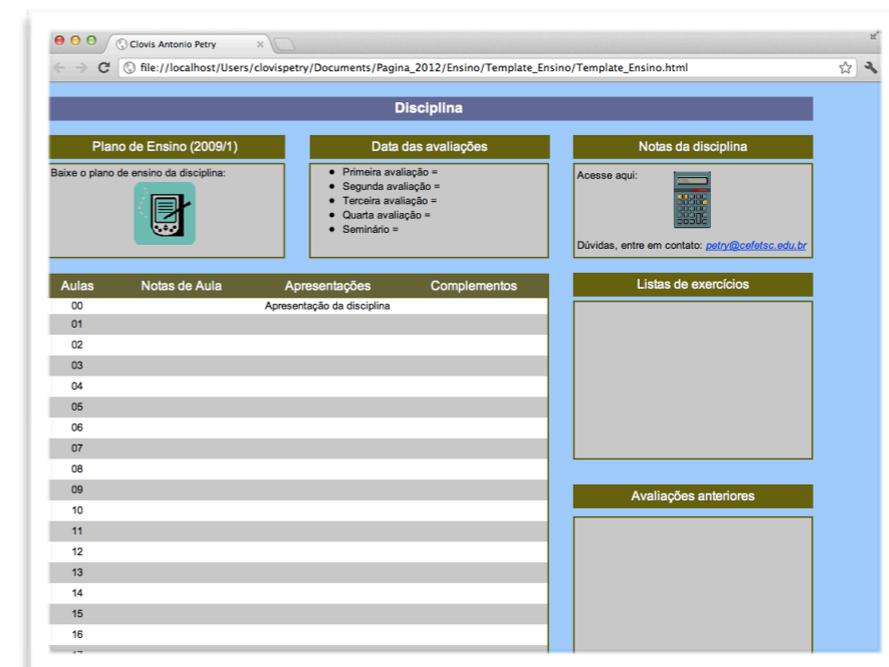
Biografia para Esta Aula

Projeto de transformadores em alta frequência:

- Conversor Forward;
- Projeto do transformador do conversor Forward;
- Conversor Flyback;
- Projeto do transformador do conversor Flyback.

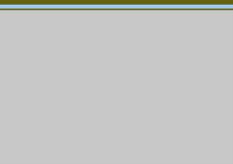


www.ProfessorPetry.com.br



The screenshot shows a web browser window with the URL `file:///localhost/Users/clovispetry/Documents/Pagina_2012/Ensino/Template_Ensino/Template_Ensino.html`. The page is titled 'Disciplina' and contains several sections:

- Plano de Ensino (2009/1)**: Baixe o plano de ensino da disciplina: 
- Data das avaliações**:
 - Primeira avaliação =
 - Segunda avaliação =
 - Terceira avaliação =
 - Quarta avaliação =
 - Seminário =
- Notas da disciplina**: Acesse aqui: 
Dúvidas, entre em contato: petry@cefetsc.edu.br
- Table with 4 columns: Aulas, Notas de Aula, Apresentações, Complementos**:

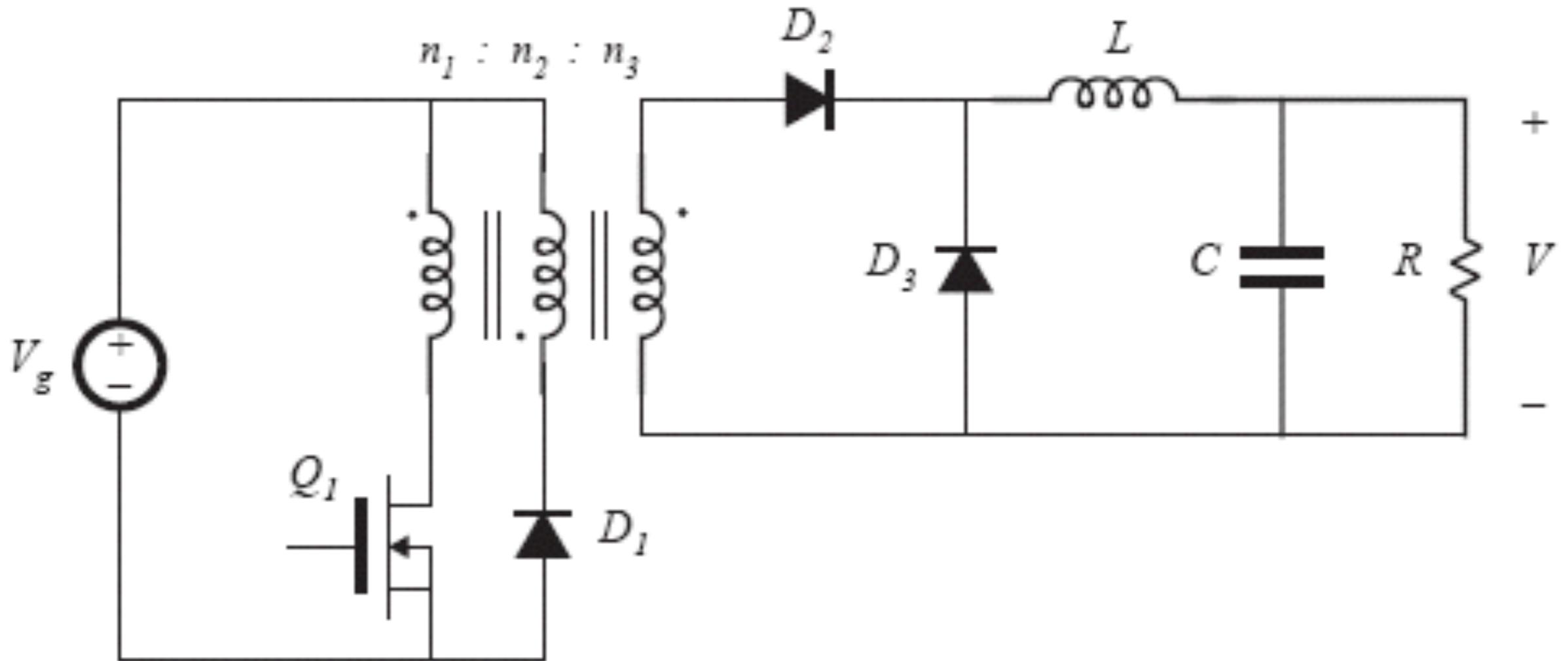
Aulas	Notas de Aula	Apresentações	Complementos
00		Apresentação da disciplina	
01			
02			
03			
04			
05			
06			
07			
08			
09			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
- Listas de exercícios**: 
- Avaliações anteriores**: 

Nesta Aula

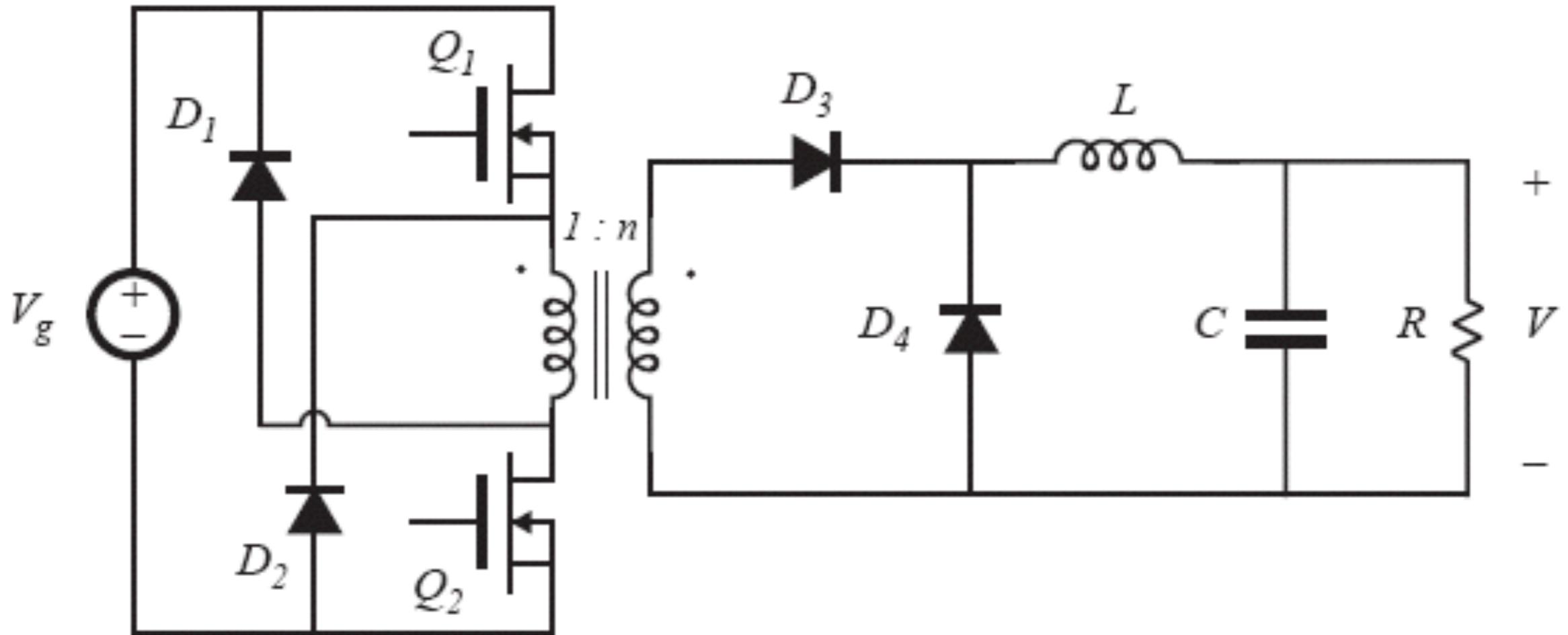
Projeto de transformadores em alta frequência:

- Conversor Forward;
- Projeto do transformador do conversor Forward;
- Conversor Flyback;
- Projeto do transformador do conversor Flyback.

Conversor Forward

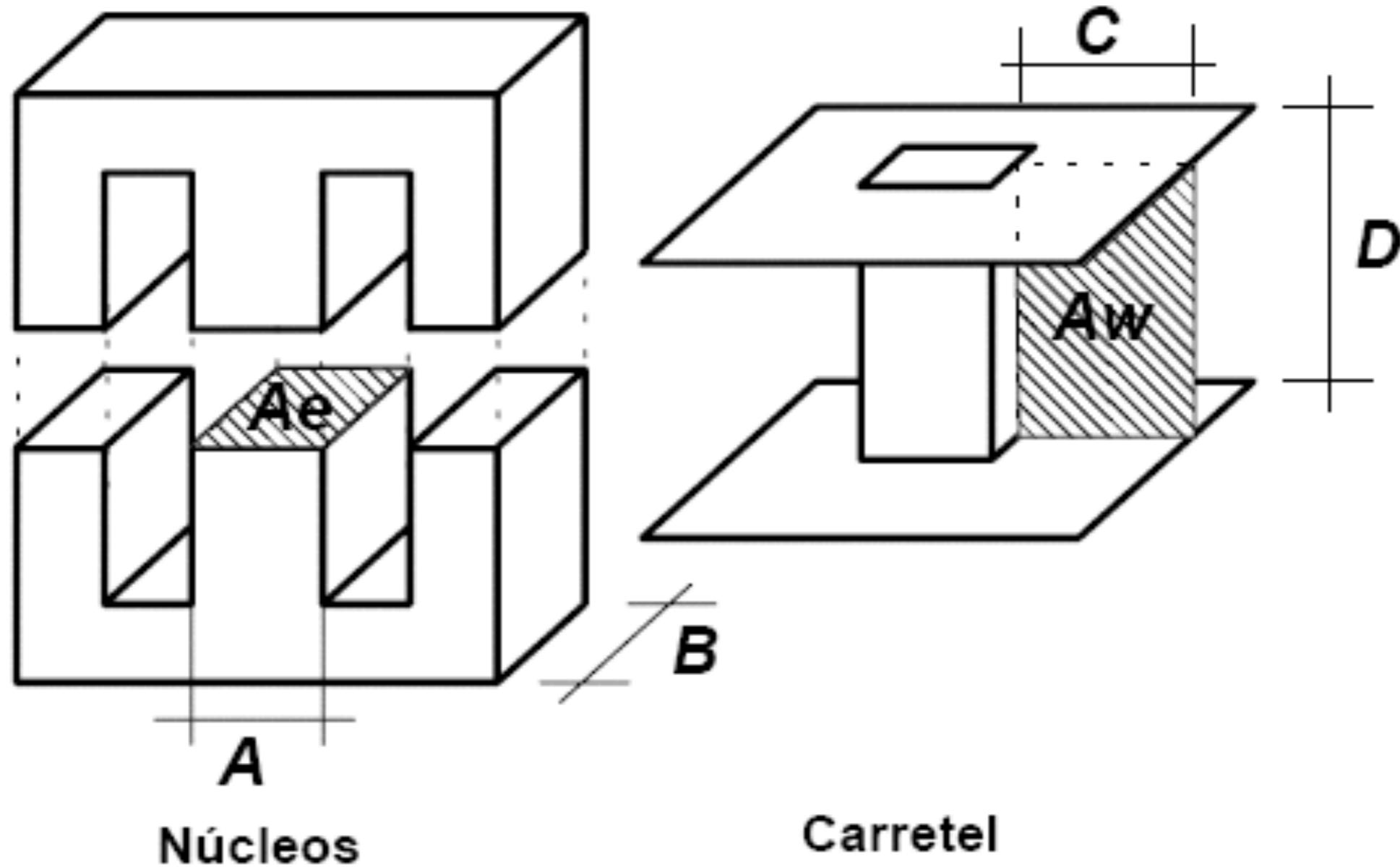


Conversor Forward



Projeto do Transformador: Conversor Forward

Montagem do núcleo (com entreferro):



Projeto do Transformador: Conversor Forward

1) Dados de entrada:

$$F_s = 20 \text{ kHz}$$

Frequência de operação;

$$P_{out} = 120 \text{ W}$$

Potência na saída;

$$V_{out} = 12 \text{ V}$$

Tensão na saída;

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

Tensão na entrada;

$$V_{in \text{ min}} = 249 \text{ V}$$

Tensão mínima na entrada;

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

Densidade de corrente;

Projeto do Transformador: Conversor Forward

1) Dados de entrada:

$$B=0,3T$$

$$k_p=0,5$$

$$k_w=0,4$$

$$\eta=75\%$$

$$V_F=1V$$

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

$$\mu_o=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb} / \text{A} / \text{m}$$

Densidade de fluxo máximo;

Fator de ocupação do primário;

Fator de ocupação do primário;

Rendimento da estrutura;

Queda de tensão dos diodos;

Razão cíclica máxima;

Permeabilidade no vácuo.

Projeto do Transformador: Conversor Forward

2) Escolha do núcleo:

$$A_e A_w = \frac{2 \cdot P_{out} \cdot 10^4}{k_w \cdot k_p \cdot J \cdot F_s \cdot \Delta B \cdot \eta} = \frac{2 \cdot 120 \cdot 10^4}{0,4 \cdot 0,5 \cdot 450 \cdot 20k \cdot 0,3 \cdot 0,75} = 5,9 \text{ cm}^4$$

Núcleo	A_e (cm ²)	A_w (cm ²)	l_e (cm)	l_t (cm)	v_e (cm ³)	$A_e A_w$ (cm ⁴)
E-20	0,312	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	1,2	11,6	42,50	8,85



Projeto do Transformador: Conversor Forward

3) Cálculo do número de espiras:

$$N_p = \frac{V_{in\ min}}{2 \cdot A_e \cdot \Delta B \cdot F_s} = \frac{249}{2 \cdot 3,54 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3 \cdot 20k} = 59 \text{ espiras}$$

$$\frac{N_s}{N_p} = n = 1,1 \cdot \frac{V_{out} + V_F \cdot D_{max}}{V_{in\ min} \cdot D_{max}} = 1,1 \cdot \frac{12 + 1 \cdot 0,4}{249 \cdot 0,4} = 0,137$$

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

$$N_t = N_p = 59 \text{ espiras}$$

4) Perdas no núcleo:

$$K_H = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$K_E = 4 \cdot 10^{-10}$$

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot \left(K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2 \right) \cdot V_e$$

$$P_{nucleo} = 0,3^{2,4} \cdot \left(4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 + 4 \cdot 10^{-10} \cdot 20000^2 \right) \cdot 42,5$$

$$P_{nucleo} = 2,26W$$

5) Profundidade de penetração:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} = \frac{7,5}{\sqrt{20000}} = 0,053 \text{ cm}$$

$$D_{\text{fio}_{max}} = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot 0,053 = 0,106 \text{ cm}$$

Não poderá ser utilizado condutor com diâmetro maior que 0,106 cm.
Portanto, podem ser utilizados condutores mais finos que o fio 18 AWG.
Escolheu-se o condutor 22 AWG.

$$A_{cu22} = 0,003255 \text{ cm}^2$$

$$S_{22} = 0,004013 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{22} = 0,000530 \Omega / \text{cm}$$

Projeto do Transformador: Conversor Forward

7) Escolha da seção dos condutores (secundário):

$$I_{sef} = \frac{I_{out}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,1 A$$

$$S_s = \frac{I_{sef}}{J} = \frac{7,1}{450} = 0,016 cm^2 \quad \text{Maior que a área do fio 22 AWG.}$$

$$N_{fios_s} = \frac{S_s}{A_{cu22}} = \frac{0,016}{0,003255} = 5 \text{ fios}$$

Projeto do Transformador: Conversor Forward

7) Escolha da seção dos condutores (primário):

$$I_{pef} = \frac{4 \cdot P_{out}}{V_{i\min}} = \frac{4 \cdot 120}{249} = 1,93 \text{ A}$$

$$S_p = \frac{I_{pef}}{J} = \frac{1,93}{450} = 0,0043 \text{ cm}^2 \quad \text{Maior que a área do fio 22 AWG.}$$

$$N_{fios_p} = \frac{S_p}{A_{cu22}} = \frac{0,0043}{0,003255} = 2 \text{ fios}$$

Projeto do Transformador: Conversor Forward

7) Escolha da seção dos condutores (terciário):

$$I_{tef} = 0,2 \cdot I_{pef} = 0,2 \cdot 1,93 = 0,4 \text{ A}$$

$$S_t = \frac{I_{tef}}{J} = \frac{0,4}{450} = 0,00086 \text{ cm}^2 \quad \text{Menor que a área do fio 22 AWG.}$$

$$N_{fios_t} = \frac{S_t}{A_{cu22}} = \frac{0,00086}{0,003255} = 0,26 = 1 \text{ fio}$$

Projeto do Transformador: Conversor Forward

8) Cálculo da resistência do fio:

$$R_{fiop} = N_p \cdot \frac{\rho_{22}}{N_{fios_p}} \cdot lt = 59 \cdot \frac{0,000530}{2} \cdot 11,6 = 0,18 \Omega$$

$$R_{fios} = N_s \cdot \frac{\rho_{22}}{N_{fios_s}} \cdot lt = 8 \cdot \frac{0,000530}{5} \cdot 11,6 = 0,0098 \Omega$$

$$R_{fiot} = N_t \cdot \frac{\rho_{22}}{N_{fios_t}} \cdot lt = 59 \cdot \frac{0,000530}{1} \cdot 11,6 = 0,36 \Omega$$

Projeto do Transformador: Conversor Forward

9) Perdas no cobre:

$$P_{cobre} = R_{fiop} \cdot I_{pef}^2 + R_{fios} \cdot I_{sef}^2 + R_{fiot} \cdot I_{tef}^2$$

$$P_{cobre} = 0,18 \cdot 1,93^2 + 0,0098 \cdot 7,1^2 + 0,36 \cdot 0,38^2 = 1,22W$$

10) Perdas totais:

$$P_{totais} = P_{nucleo} + P_{cobre} = 2,26 + 1,22 = 3,48W$$

11) Elevação de temperatura:

$$Rt = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} = 23 \cdot (8,85)^{-0,37} = 10,26 \text{ } ^\circ\text{C} / W$$

$$\Delta T = Rt \cdot P_{total} = 10,26 \cdot 3,48 = 35,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

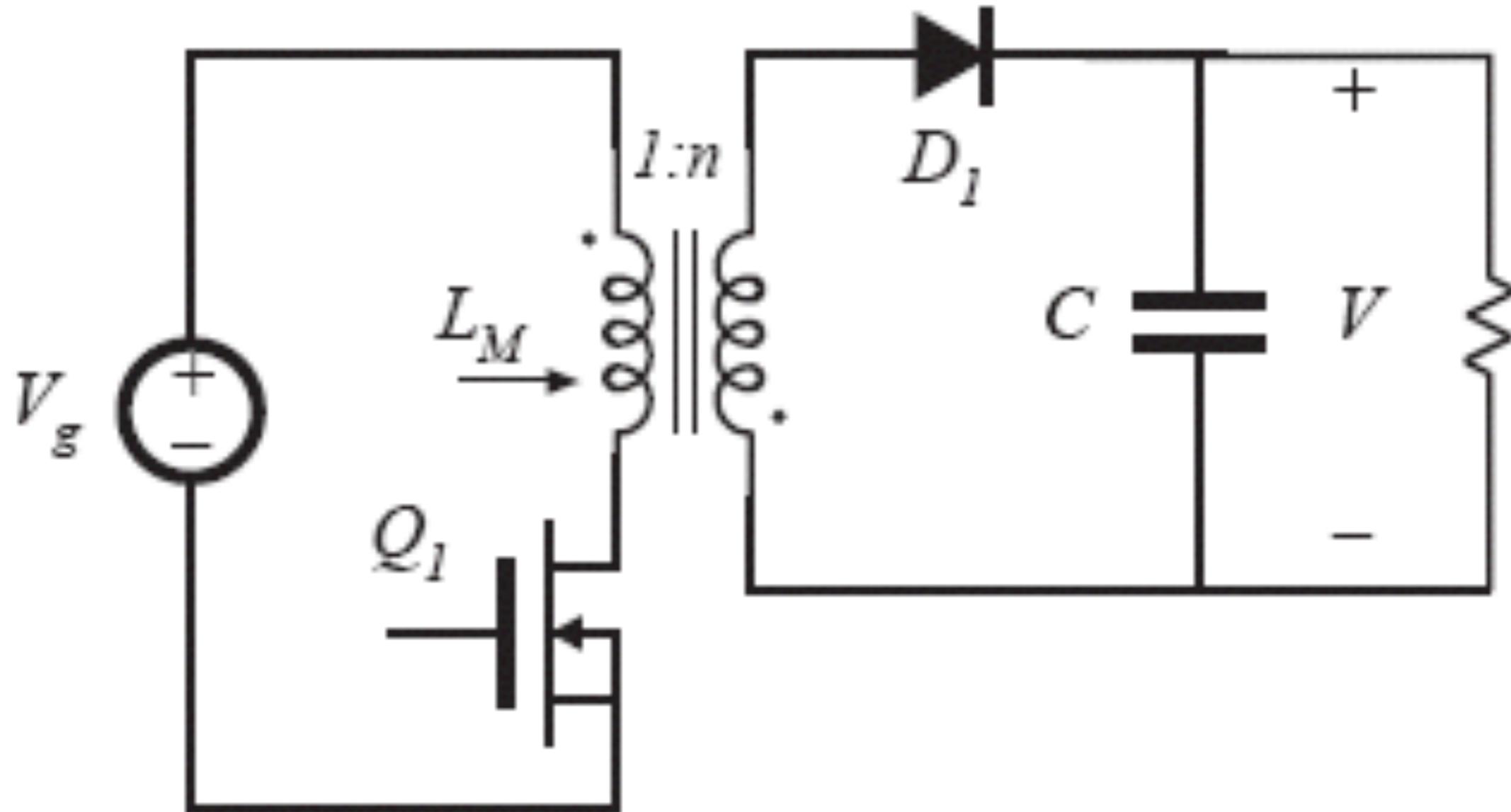
12) Cálculo do fator de ocupação:

$$Aw_{neces} = \frac{(N_p \cdot N_{fios_s} + N_s \cdot N_{fios_s} + N_t \cdot N_{fios_t}) \cdot S_{22}}{0,7}$$

$$Aw_{neces} = \frac{(59 \cdot 2 + 8 \cdot 5 + 59 \cdot 1) \cdot 0,004013}{0,7} = 1,244 \text{ cm}^2$$

$$K_{ocup} = \frac{Aw_{neces}}{Aw} = \frac{1,244}{2,5} = 0,5$$

Conversor Flyback



Projeto do Transformador: Conversor Flyback

1) Dados de entrada:

$$F_s = 20 \text{ kHz}$$

Frequência de operação;

$$P_{out} = 120 \text{ W}$$

Potência na saída;

$$V_{out} = 12 \text{ V}$$

Tensão na saída;

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

Tensão na entrada;

$$V_{in \text{ min}} = 249 \text{ V}$$

Tensão mínima na entrada;

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

Densidade de corrente;

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

1) Dados de entrada:

$$B=0,3T$$

Densidade de fluxo máximo;

$$k_p=0,3$$

Fator de ocupação do primário;

$$k_w=0,4$$

Fator de ocupação do primário;

$$\eta=75\%$$

Rendimento da estrutura;

$$V_F=1V$$

Queda de tensão dos diodos;

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

Razão cíclica máxima;

$$\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb} / \text{A} / \text{m}$$

Permeabilidade no vácuo.

2) Cálculo da corrente de pico no primário:

$$I_p = \frac{2 \cdot P_{out}}{\eta \cdot V_{in \min} \cdot D_{\max}} = \frac{2 \cdot 120}{0,75 \cdot 249 \cdot 0,4} = 3,213 \text{ A}$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

3) Escolha do núcleo:

$$A_e A_w = \frac{1,1 \cdot P_{out} \cdot 10^4}{k_w \cdot k_p \cdot J \cdot F_s \cdot \Delta B} = \frac{1,1 \cdot 120 \cdot 10^4}{0,4 \cdot 0,3 \cdot 450 \cdot 20k \cdot 0,3} = 4,0 \text{ cm}^4$$

Núcleo	A_e (cm ²)	A_w (cm ²)	l_e (cm)	l_t (cm)	v_e (cm ³)	$A_e A_w$ (cm ⁴)
E-20	0,312	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	1,2	11,6	42,50	8,85



4) Cálculo do entreferro:

$$\Delta W = \frac{P_{out}}{\eta \cdot F_s} = \frac{120}{0,75 \cdot 20k} = 8mJ$$

$$\delta = \frac{2 \cdot \mu_o \cdot \Delta W}{\Delta B^2 \cdot A_e} = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8m}{0,3^2 \cdot 3,54 \cdot 10^{-4}} = 0,631mm$$

$$lg = \frac{\delta}{2} = \frac{0,631mm}{1} = 0,316mm$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

5) Cálculo do número de espiras:

$$N_p = \frac{\Delta B \cdot \delta}{\mu_o \cdot I_p} = \frac{0,3 \cdot 0,631 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3,213} = 47 \text{ espiras}$$

$$\frac{N_s}{N_p} = n = \frac{V_{out} + V_D}{V_{in \min}} \cdot \frac{1 - D_{\max}}{D_{\max}} = \frac{12 + 1}{249} \cdot \frac{1 - 0,4}{0,4} = 0,078$$

$$N_s = n \cdot N_p = 0,078 \cdot 47 \cong 4 \text{ espiras}$$

6) Perdas no núcleo:

$$K_H = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$K_E = 4 \cdot 10^{-10}$$

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2) \cdot V_e$$

$$P_{nucleo} = 0,3^{2,4} \cdot (4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 + 4 \cdot 10^{-10} \cdot 20000^2) \cdot 42,5$$

$$P_{nucleo} = 2,26W$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

7) Profundidade de penetração:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} = \frac{7,5}{\sqrt{20000}} = 0,053 \text{ cm}$$

$$D_{\text{fio}}_{\text{max}} = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot 0,053 = 0,106 \text{ cm}$$

Não poderá ser utilizado condutor com diâmetro maior que 0,106 cm.
Portanto, podem ser utilizados condutores mais finos que o fio 18 AWG.
Escolheu-se o condutor 22 AWG.

$$A_{\text{cu}22} = 0,003255 \text{ cm}^2$$

$$S_{22} = 0,004013 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{22} = 0,000530 \Omega / \text{cm}$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

8) Escolha da seção dos condutores (primário):

$$I_{pef} = I_p \cdot \sqrt{\frac{D_{\max}}{3}} = 3,213 \cdot \sqrt{\frac{D_{\max}}{3}} = 1,173 A$$

$$S_p = \frac{I_{pef}}{J} = \frac{1,173}{450} = 0,0026 cm^2 \text{ Pode ser usado o fio 23 AWG.}$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

9) Escolha da seção dos condutores (secundário):

$$I_s = I_p \cdot \frac{N_p}{N_2} = 3,213 \cdot \frac{47}{4} = 37,75 A$$

$$I_{sef} = I_s \cdot \sqrt{\frac{1 - D_{\max}}{3}} = 37,75 \cdot \sqrt{\frac{1 - 0,4}{3}} = 16,9 A$$

$$S_s = \frac{I_{sef}}{J} = \frac{16,9}{450} = 0,037 cm^2 \quad \text{Maior que a área do fio 22 AWG.}$$

$$N_{fios_s} = \frac{S_s}{A_{cu22}} = \frac{0,037}{0,003255} = 12 \text{ fios}$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

10) Cálculo da resistência do fio:

$$R_{fiop} = N_p \cdot \frac{\rho_{23}}{N_{fios_p}} \cdot lt = 47 \cdot \frac{0,000668}{1} \cdot 11,6 = 0,36 \Omega$$

$$R_{fios} = N_s \cdot \frac{\rho_{22}}{N_{fios_s}} \cdot lt = 4 \cdot \frac{0,000530}{12} \cdot 11,6 = 0,00205 \Omega$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

11) Perdas no cobre:

$$P_{cobre} = R_{fiop} \cdot I_{pef}^2 + R_{fios} \cdot I_{sef}^2$$

$$P_{cobre} = 0,36 \cdot 1,173^2 + 0,00205 \cdot 16,9^2 = 1,08 W$$

12) Perdas totais:

$$P_{totais} = P_{nucleo} + P_{cobre} = 2,26 + 1,08 = 3,34 W$$

13) Elevação de temperatura:

$$Rt = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} = 23 \cdot (8,85)^{-0,37} = 10,26 \text{ } ^\circ C / W$$

$$\Delta T = Rt \cdot P_{total} = 10,26 \cdot 3,34 = 34,28 \text{ } ^\circ C$$

Projeto do Transformador: Conversor Flyback

14) Cálculo do fator de ocupação:

$$Aw_{neces} = \frac{Np \cdot N_{fios_s} \cdot S_{23} + Ns \cdot N_{fios_s} \cdot S_{22}}{0,7}$$

$$Aw_{neces} = \frac{47 \cdot 1 \cdot 0,003221 + 4 \cdot 12 \cdot 0,004013}{0,7} = 0,49 \text{ cm}^2$$

$$K_{ocup} = \frac{Aw_{neces}}{Aw} = \frac{0,49}{2,5} = 0,2$$

Próxima Aula

Conversores cc-cc:

- Projeto do estágio de potência do conversor.

