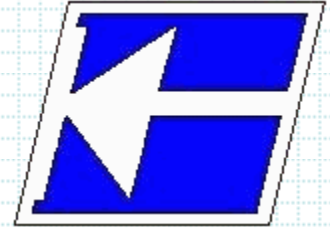


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica



Projeto de Transformadores para Alta Frequência

Prof. Joabel Moia.

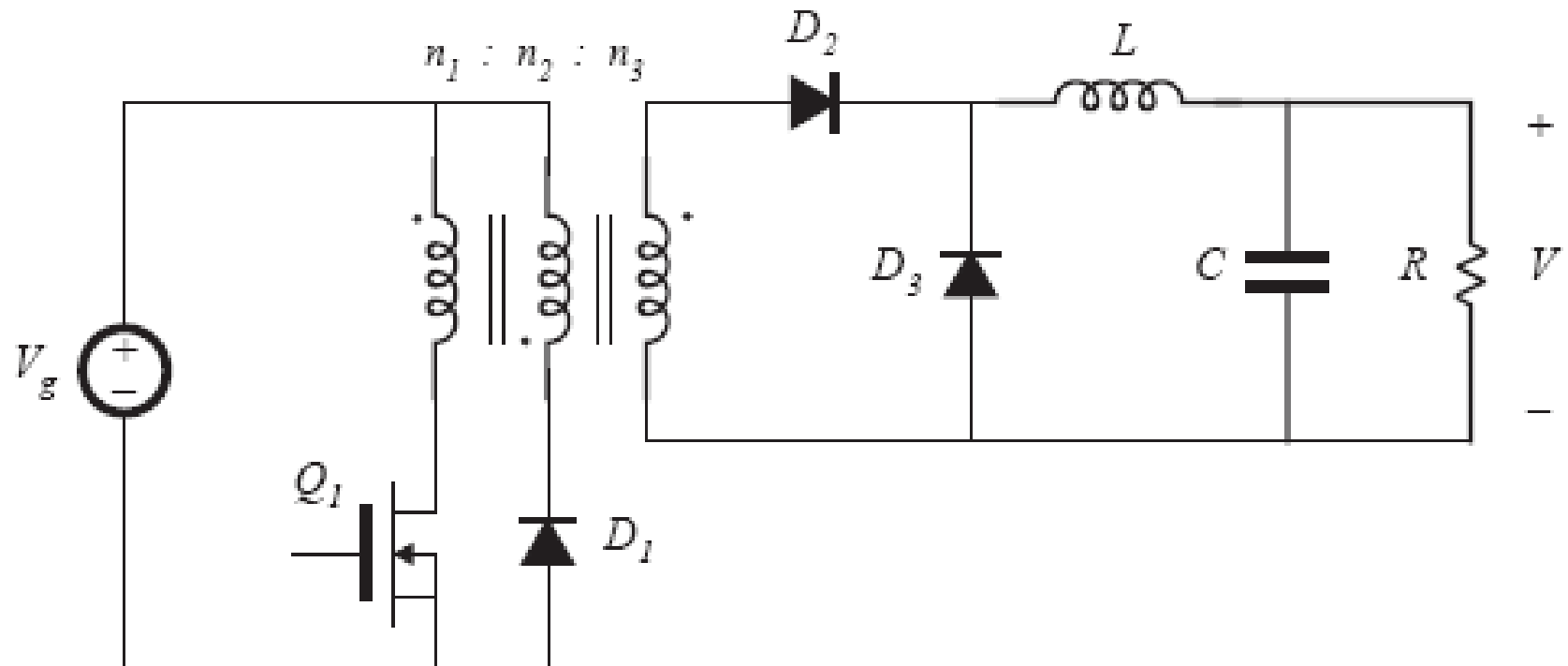
Florianópolis, março de 2019.

Introdução comparativa

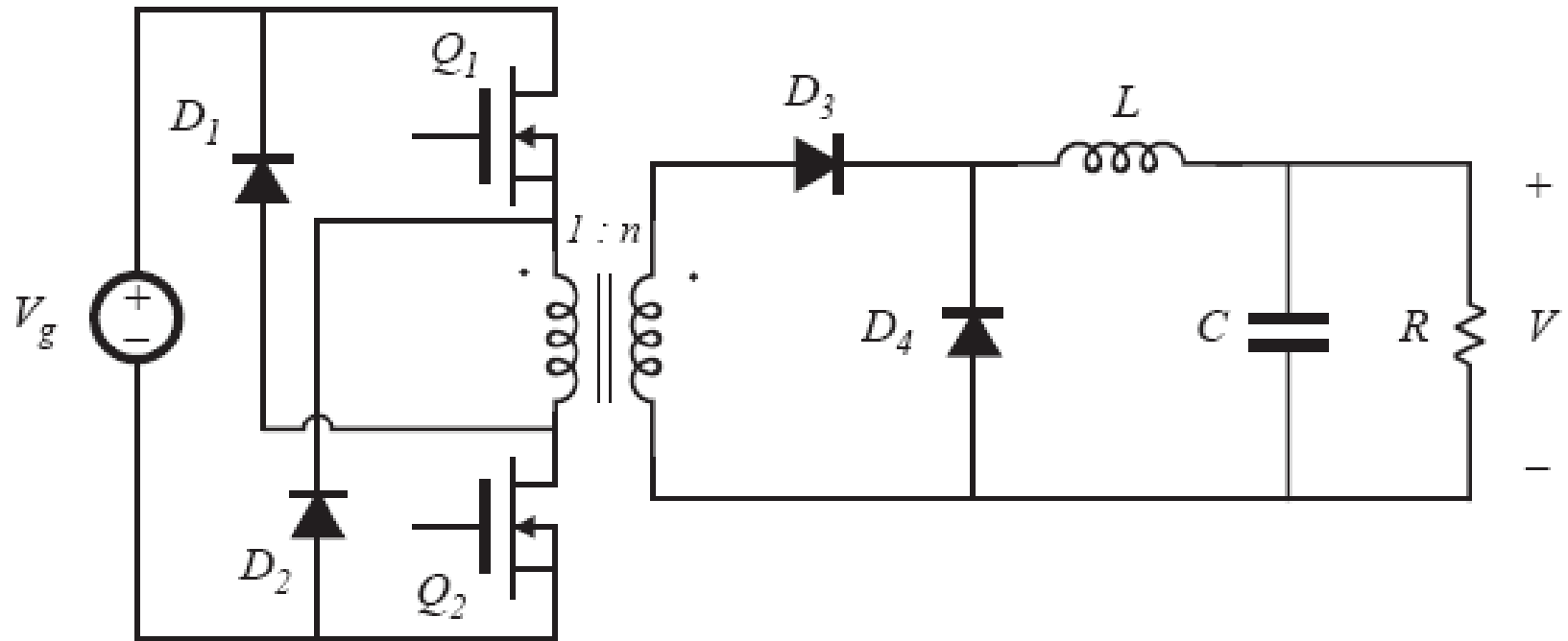
1. Conversor Forward;
2. Projeto do transformador do conversor Forward;
3. Conversor Flyback;
4. Projeto do transformador do conversor Flyback.



Converter Forward

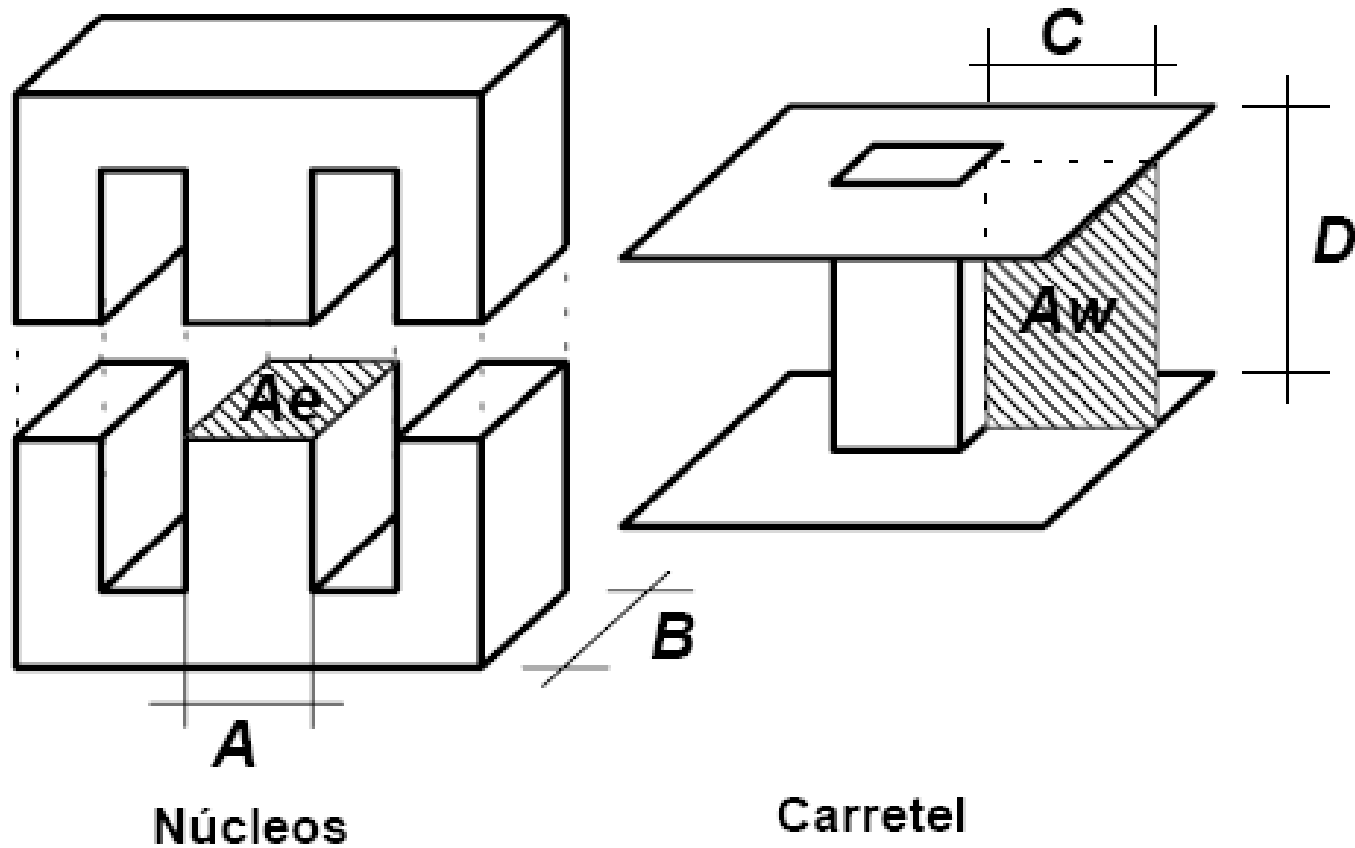


Conversor Duplo Forward



Projeto do transformador – Conversor Forward

Montagem do núcleo (com entreferro):



1) Dados de entrada:

$$F_s = 20kHz$$

Frequência de operação;

$$P_{out} = 120W$$

Potência na saída;

$$V_{out} = 12V$$

Tensão na saída;

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

Tensão na entrada;

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

Tensão mínima na entrada;

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

Densidade de corrente;

Projeto do transformador – Conversor Forward

1) Dados de entrada:

$$B=0,3T$$

Densidade de fluxo máximo;

$$k_p=0,5$$

Fator de ocupação do primário;

$$k_w=0,4$$

Fator de ocupação do secundário;

$$\eta=75\%$$

Rendimento da estrutura;

$$V_F=1V$$

Queda de tensão dos diodos;

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

Razão cíclica máxima;

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

Permeabilidade no vácuo.

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	$A_e \text{ (cm}^2\text{)}$	$A_w \text{ (cm}^2\text{)}$	$l_e \text{ (cm)}$	$l_t \text{ (cm)}$	$v_e \text{ (cm}^3\text{)}$	$A_e A_w \text{ (cm}^4\text{)}$
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



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:

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

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

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

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

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

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.

$$A_{cu22} = 0,003255 \text{ cm}^2 \qquad S_{22} = 0,004013 \text{ cm}^2$$

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

7) Escolha da seção dos condutores (secundário):

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

$$S_s = \frac{I_{sef}}{J} = \frac{7,1}{450} = 0,016 cm^2$$

Maior que a área do fio 22 AWG.

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

7) Escolha da seção dos condutores (primário):

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

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

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

7) Escolha da seção dos condutores (terciário):

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

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

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

8) Cálculo da resistência do fio:

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

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

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

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:

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

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

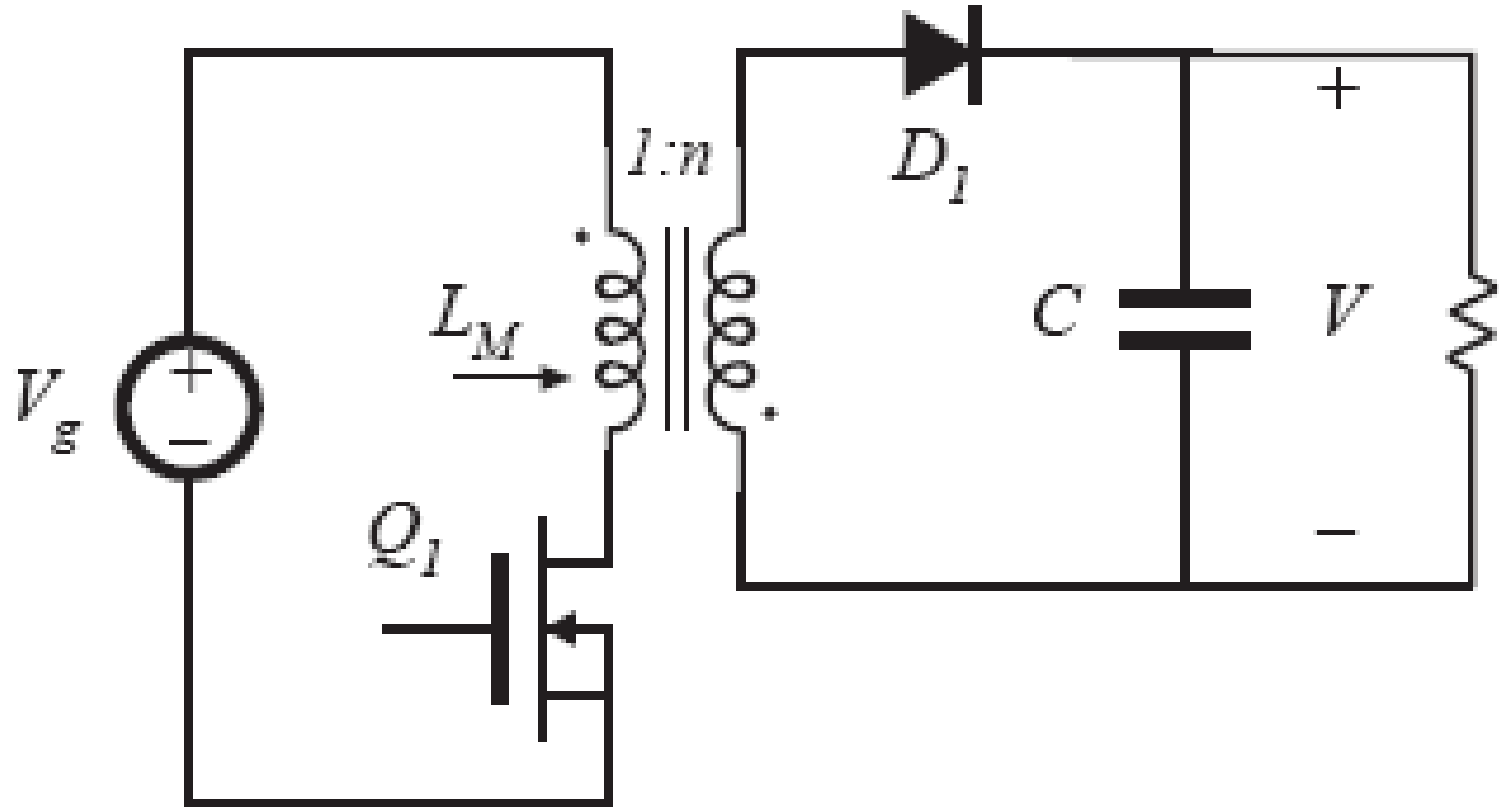
12) Cálculo do fator de ocupação:

$$Aw_{neces} = \frac{(Np \cdot N_{fios_s} + Ns \cdot N_{fios_s} + Nt \cdot N_{fios_t}) \cdot S_{22}}{0,7}$$

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

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

Conversor Flyback



Projeto do transformador – Conversor Flyback

1) Dados de entrada:

$$F_s = 20kHz$$

Frequência de operação;

$$P_{out} = 120W$$

Potência na saída;

$$V_{out} = 12V$$

Tensão na saída;

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

Tensão na entrada;

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

Tensão mínima na entrada;

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

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;

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

Permeabilidade no vácuo.

2) Cálculo da corrente de pico no primário:

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

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	$A_e \text{ (cm}^2\text{)}$	$A_w \text{ (cm}^2\text{)}$	$l_e \text{ (cm)}$	$l_t \text{ (cm)}$	$v_e \text{ (cm}^3\text{)}$	$A_e A_w \text{ (cm}^4\text{)}$
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:

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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.

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

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

8) Escolha da seção dos condutores (primário):

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

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

9) Escolha da seção dos condutores (secundário):

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

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

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

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

10) Cálculo da resistência do fio:

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

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

11) Perdas no cobre:

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

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

12) Perdas totais:

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

13) Elevação de temperatura:

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

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

14) Cálculo do fator de ocupação:

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

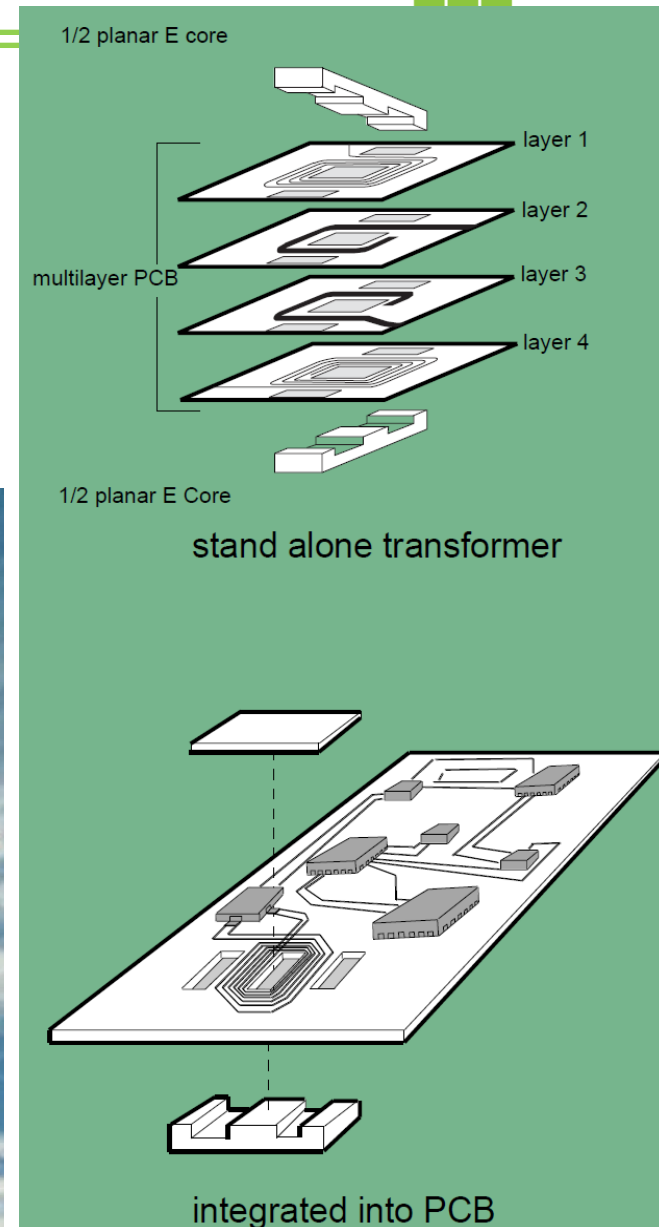
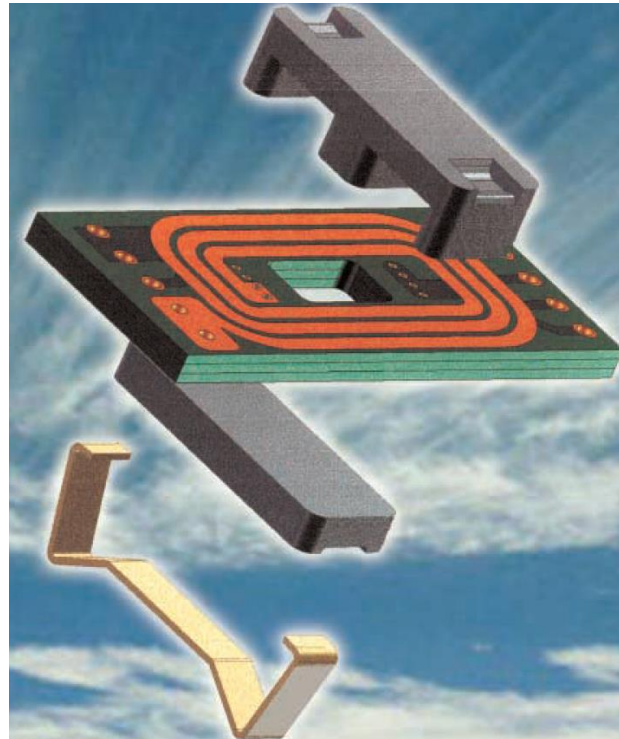
$$Aw_{neces} = \frac{47 \cdot 1 \cdot 0,003221 + 4 \cdot 12 \cdot 0,004013}{0,7} = 0,49 cm^2$$

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

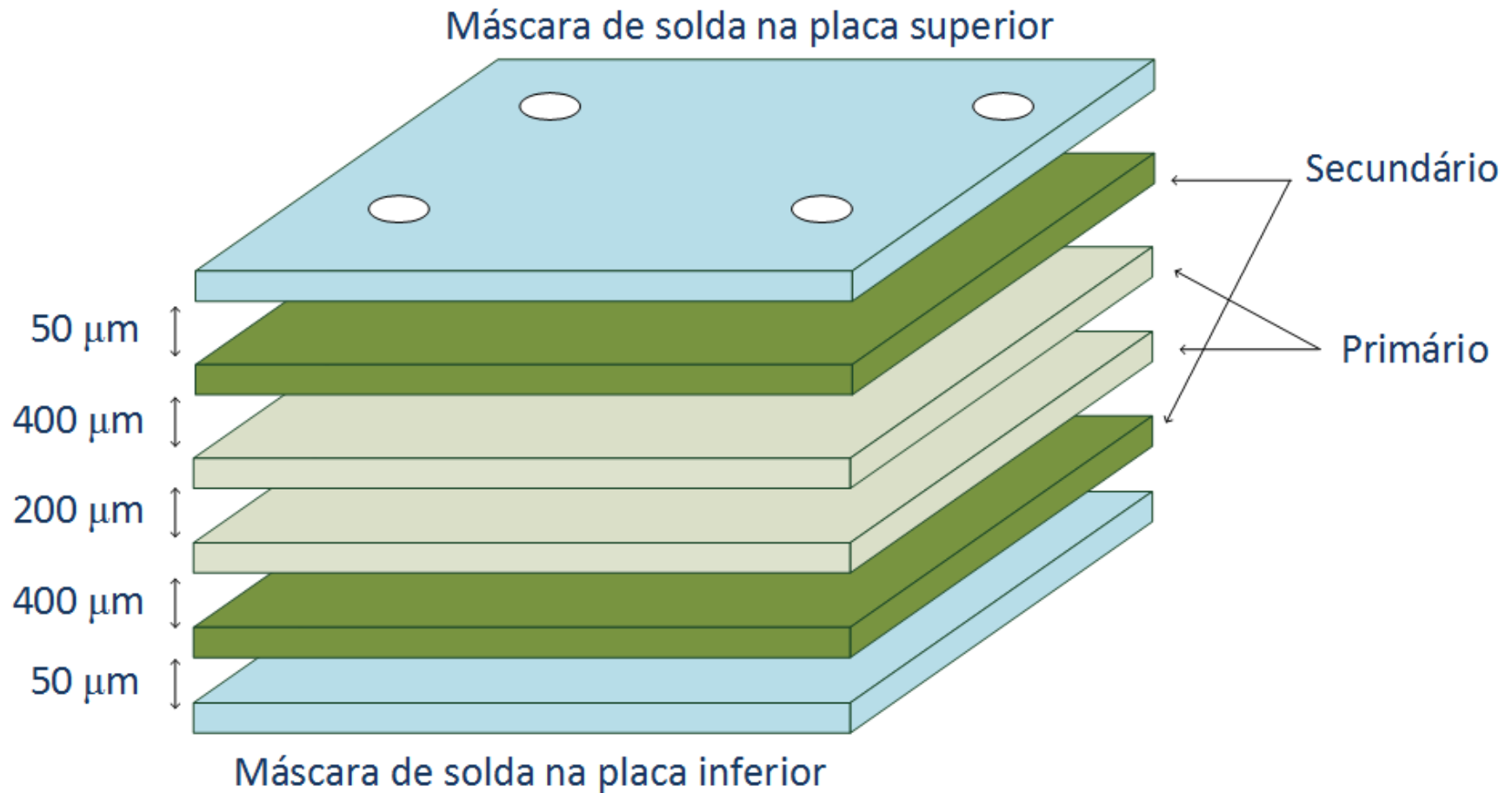
Transformador Planar

Vantagens

- Excelente característica térmica (R_{th} 50% menor)
- Baixo Perfil
- Baixa impedância de dispersão
- Fácil fabricação

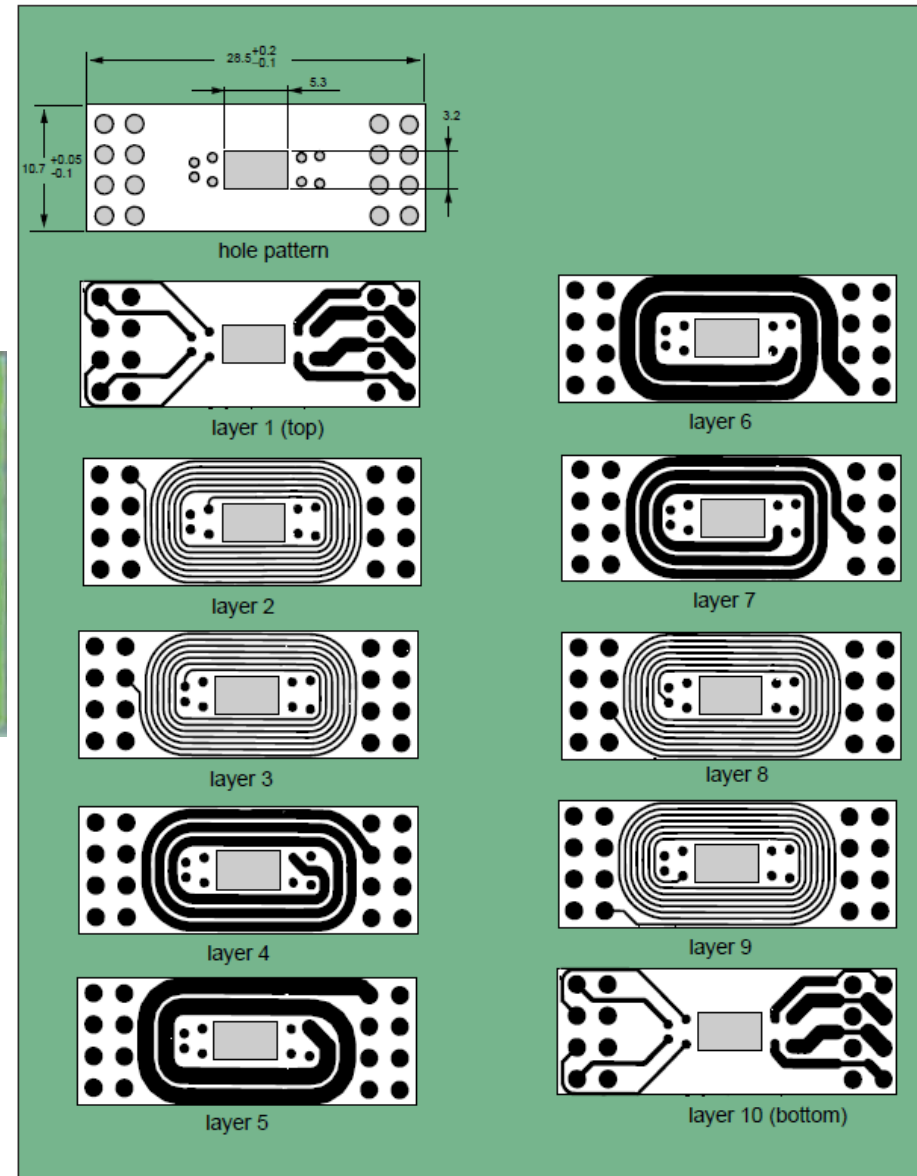
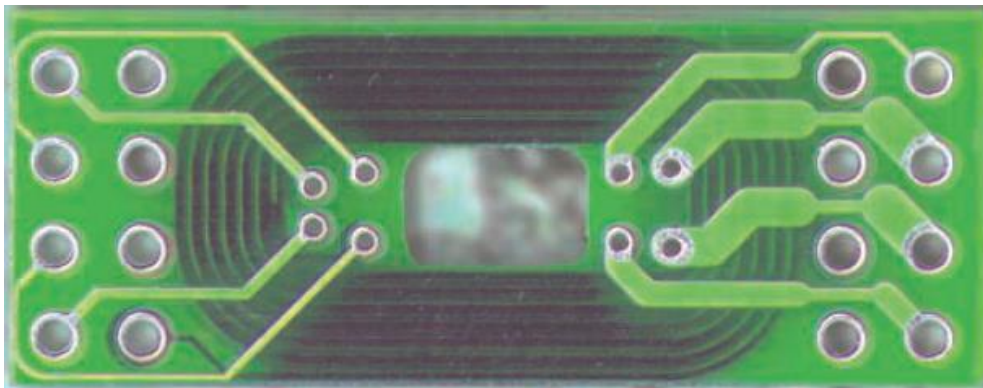


Transformador Planar



Transformador Planar

Appendix 2: Layer design for the planar E 14 forward transformer



Transformador Planar

Conversores Compactos
Baixo Volume por W.



Exemplo: Fabricante SynQor



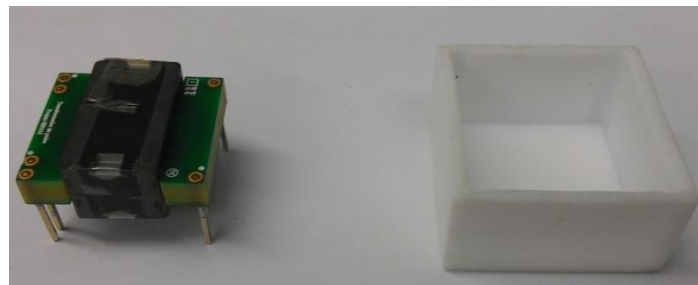
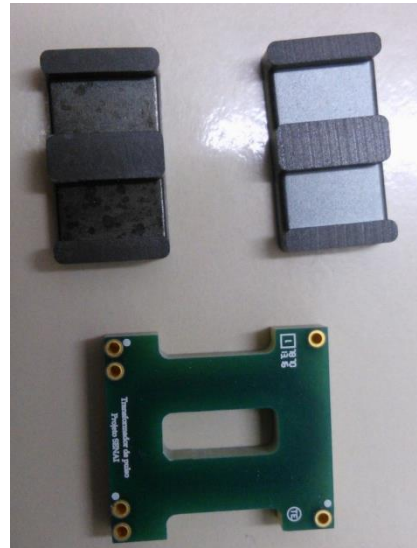
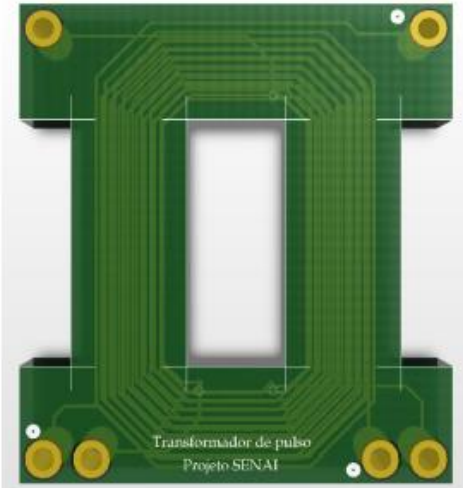
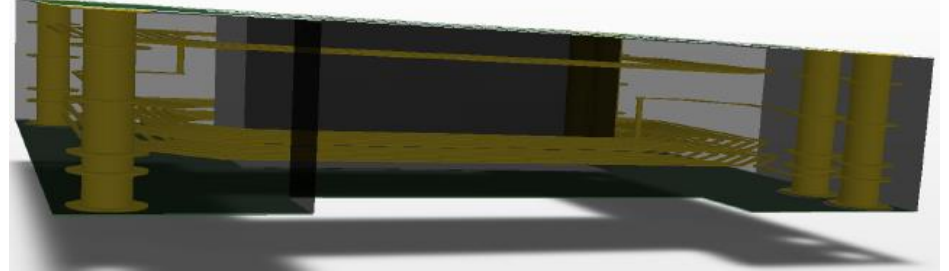
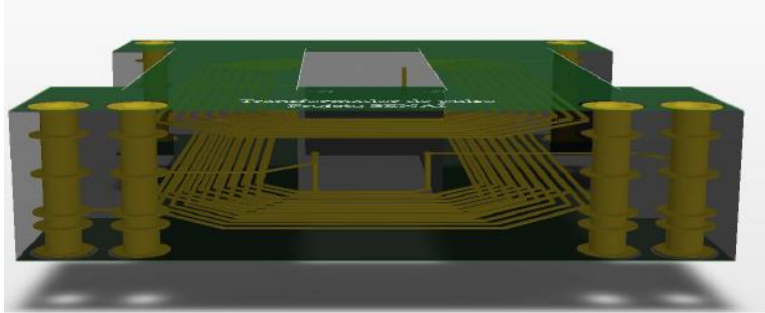
Transformador Planar



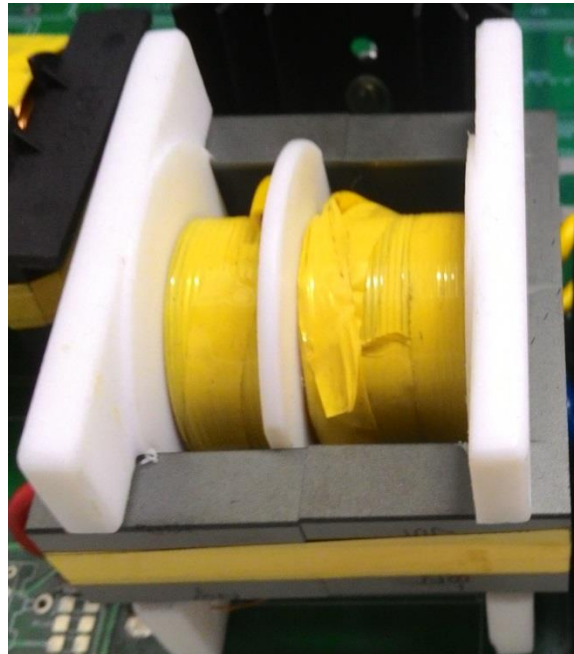
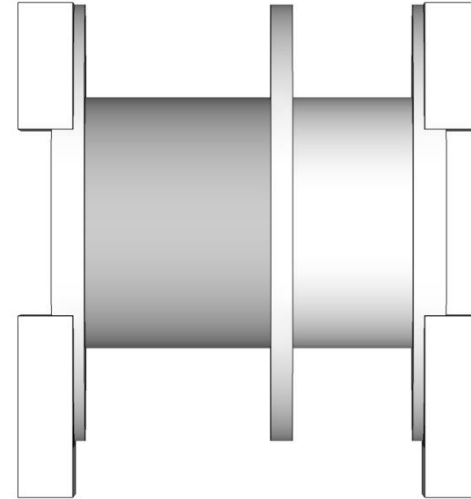
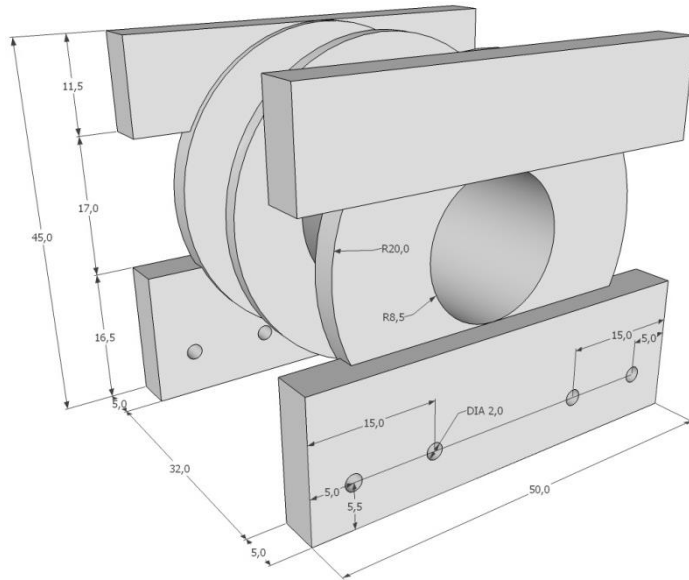
Conversores Compactos
Baixo Volume por W.

Exemplo: Conversores Fabricante SynQor

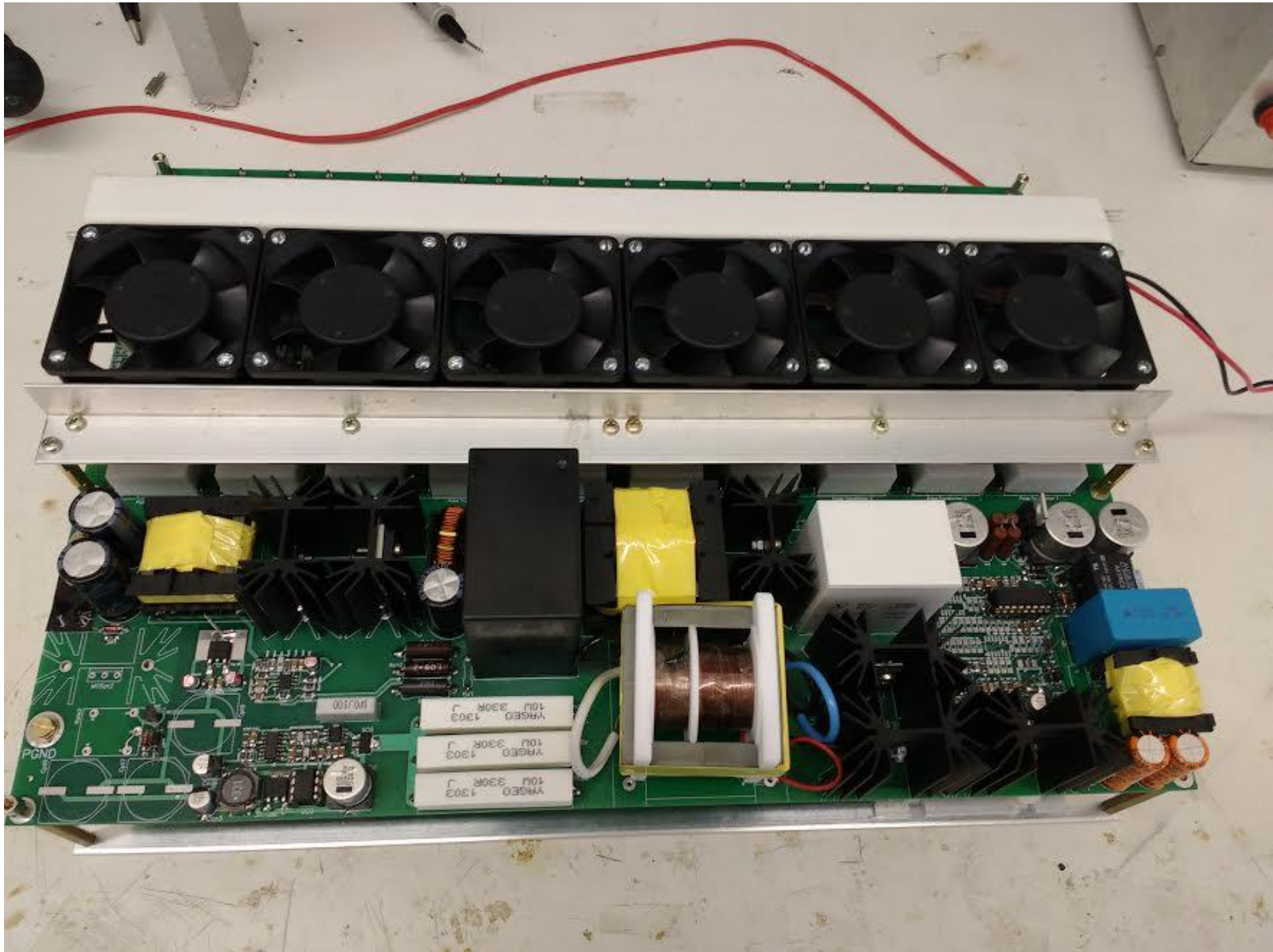
Transformador Planar



Transformador com Isolação

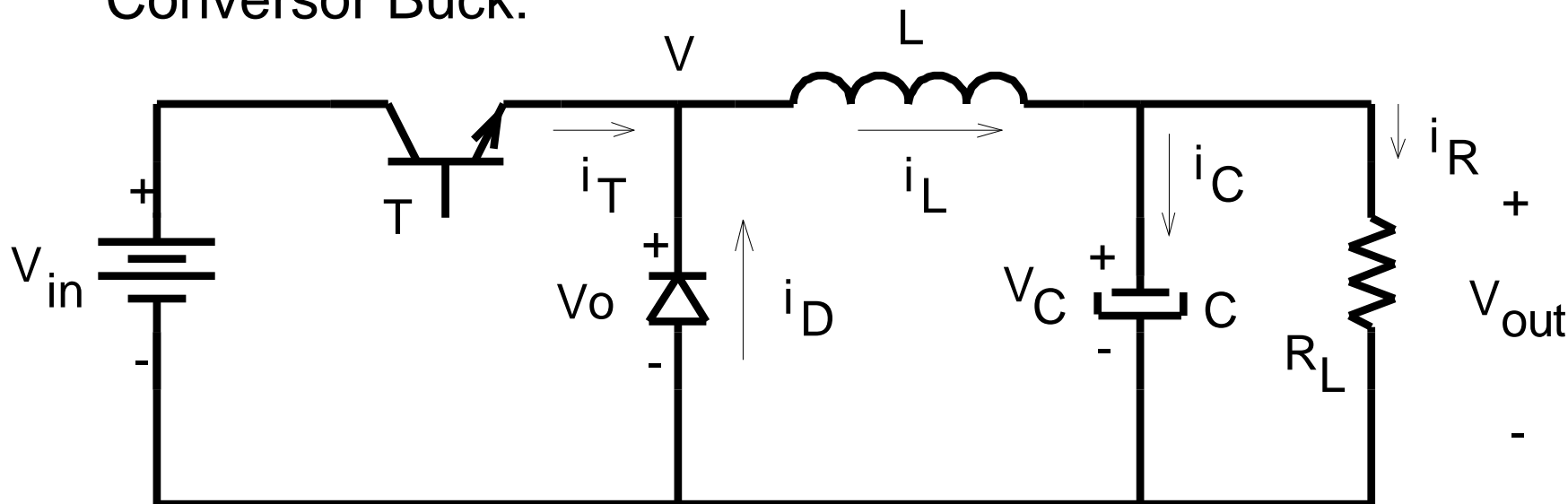


Transformador com Isolação



Tarefa 3 para entregar até a próxima aula

Conversor Buck:



Especificação:

Tensão de Entrada: 36 V

Tensão de Saída: 12 V

Frequência de comutação: 100 kHz;

Indutância L: $\Delta I = 10\%$ da corrente média

Capacitância C: 100 μF ;

Potência: 100 W;

Apresentar:

- Projetar o Indutor L:
 - Utilizar a planilha desenvolvida no Smath e as aulas e definir um núcleo da Thornton;
 - Utilizar a planilha da Magnetics e definir um núcleo de tal fabricante