



Flyback MCC

72V -> 48V; 50W; 40kHz

Disciplina: Conversores Estáticos e Fonte Chaveadas

Professor: Clóvis Antônio Petry
Joabel Moia

Florianópolis - Abril 2014

Referências:

Conversores CC-CC Básicos Não Isolados, pág. 111 à 127.
Projetos de Fontes Chaveadas, pág. 311

Especificações:

$V_i := 72$	V	Tensão de entrada
$V_o := 48$	V	Tensão de saída
$P_o := 50$	W	Potência do conversor
$f_s := 40000$	Hz	Frequência de comutação
$\Delta I_{LM\%} := 0.2$		Ondulação relativa de corrente no indutor
$\Delta V_{Co} := 0.01 \cdot V_o = 0.48$		Ondulação de tensão na carga (saída)
$\eta := 0.85$		Rendimento do conversor

☒ Cálculos preliminares

Cálculos preliminares

$$R_o := \frac{V_o^2}{P_o} = 46.08 \quad \Omega \quad T_s := \frac{1}{f_s} = 2.5 \times 10^{-5} \quad s$$

$$I_o := \frac{P_o}{V_o} = 1.042 \quad A \quad \text{Corrente média de saída}$$

$$I_i := \frac{P_o}{V_i} = 0.694 \quad A \quad \text{Corrente média de entrada}$$

A razão de operação é estabelecida em 50%.

$$D := 0.5$$

Razão ciclica do conversor.

$$a := \frac{V_o}{V_i} = 0.667$$

Ganho total do conversor

$$n := \frac{V_o \cdot (1 - D)}{V_i \cdot D} = 0.667$$

Relação de transformação

$$I_{Lms} := \frac{I_o}{1 - D} = 2.083 \quad A$$

Corrente média na Indutância de magnetização referenciada ao secundário

$$\Delta I_{Lms} := \Delta I_{LM\%} \cdot I_{Lms} = 0.417 \quad A$$

Ondulação de corrente na indutância de magnetização referenciada ao secundário

$$L_{ms} := \frac{V_i \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_{Lms}} = 2.16 \times 10^{-3} \quad H$$

Indutância de magnetização referenciada ao secundário

$$L_{ms} = 2,16mH$$

$$L_{mp} := \frac{L_{ms}}{n^2} = 4.86 \times 10^{-3} \quad H$$

Indutância de magnetização referenciada ao primário

$$L_{mp} = 4,86mH$$

$$I_{Lmp} := n \cdot I_{Lms} = 1.389 \quad A$$

Corrente média na indutância de magnetização referenciada ao primário

$$I_{Lms,min} := \frac{I_o}{(1 - D)} - \frac{\Delta I_{Lms}}{2} = 1.875 \quad A$$

Corrente mínima na Indutância de magnetização referenciada ao secundário

$$I_{Lms,max} := \frac{I_o}{(1 - D)} + \frac{\Delta I_{Lms}}{2} = 2.292 \quad A$$

Corrente máxima na Indutância de magnetização referenciada ao secundário

$$I_{Lmp,min} := I_{Lms,min} \cdot n = 1.25 \quad A$$

Corrente mínima na Indutância de magnetização referenciada ao primário

$$I_{Lmp,max} := I_{Lms,max} \cdot n = 1.528 \quad A$$

Corrente máxima na Indutância de magnetização referenciada ao primário

▲ Cálculos preliminares

▼ Formas de onda

Formas de onda:

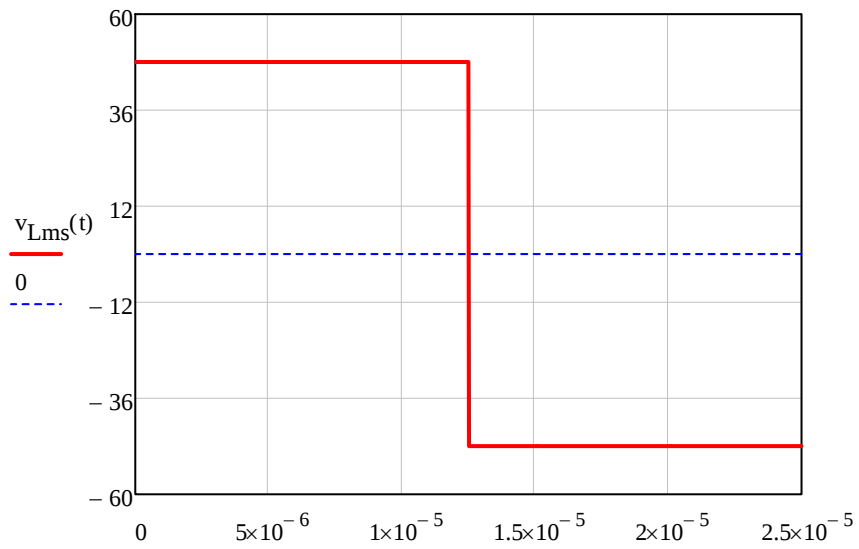
$$\text{passo} := \frac{T_s}{1000} = 2.5 \times 10^{-8} \frac{1}{s}$$

$$t := 0, \text{passo} .. T_s$$

Definindo vetor de tempo

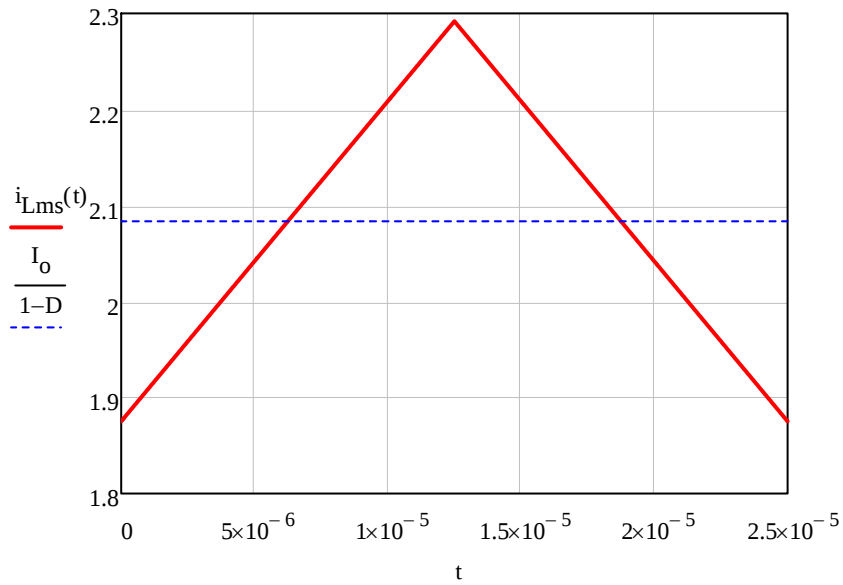
$$v_{Lms}(t) := \begin{cases} n \cdot V_i & \text{if } t \leq D \cdot T_s \\ -V_o & \text{otherwise} \end{cases}$$

Tensão na indutância de magnetização referenciada ao secundário



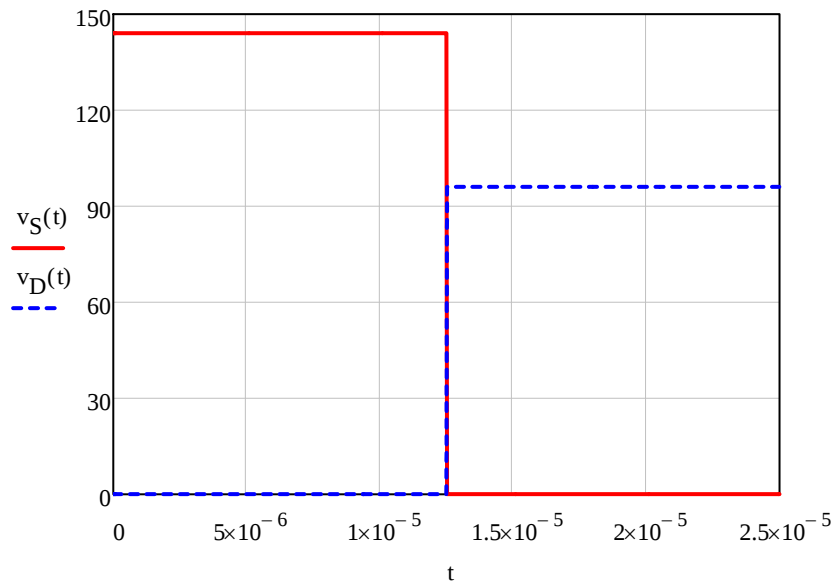
$$i_{Lms}(t) := \begin{cases} I_{Lms.min} + \frac{V_i \cdot t}{L_{ms}} & \text{if } t \leq D \cdot T_s \\ I_{Lms.max} - \frac{V_o \cdot (t - D \cdot T_s)}{n \cdot L_{ms}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Corrente na indutância de magnetização referenciada ao secundário



Tensão sobre o Transistor (V_S) e sobre o Diodo (V_D):

$$v_S(t) := V_i + \frac{v_{Lms}(t)}{n} \quad v_D(t) := -v_{Lms}(t) + V_o$$



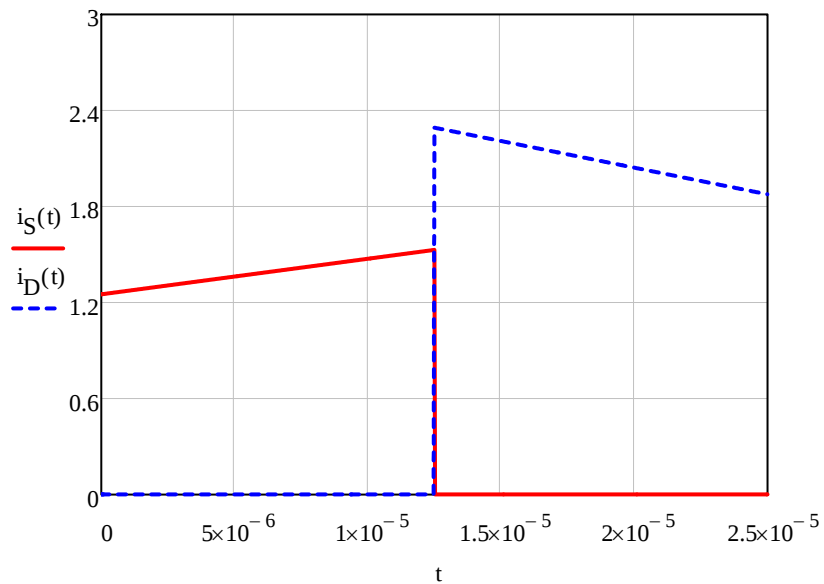
Corrente sobre o Transistor (i_S) e sobre o Diodo (i_D):

$$i_S(t) := \begin{cases} n \cdot i_{Lms}(t) & \text{if } t \leq D \cdot T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Corrente na indutância de magnetização referenciada ao secundário

$$i_D(t) := \begin{cases} i_{Lms}(t) & \text{if } t \geq D \cdot T_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Corrente na indutância de magnetização referenciada ao secundário



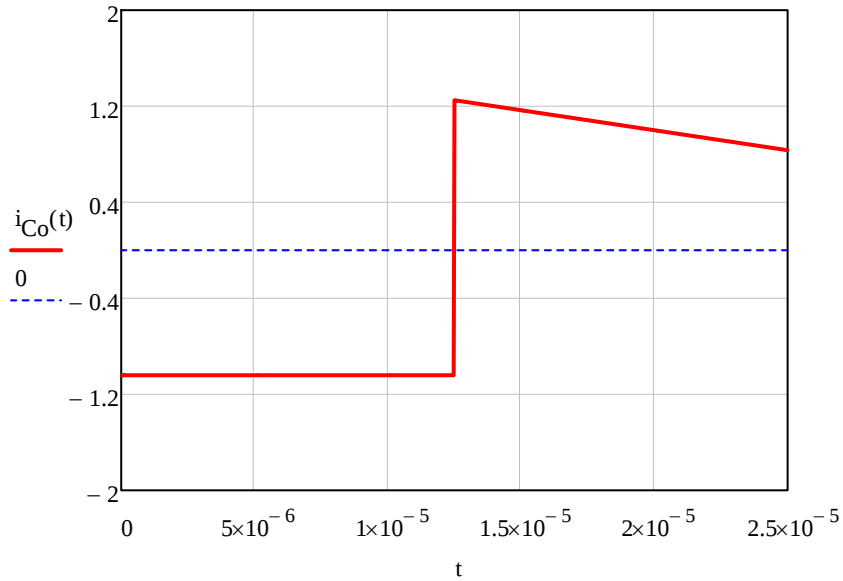
Cálculo da corrente média e eficaz sobre o Transistor e o Diodo:

$$i_{Srms} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_S(t)^2 dt} = 0.984 \quad A \quad i_{Smed} := \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_S(t) dt = 0.694 \quad A$$

$$i_{Drms} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_D(t)^2 dt} = 1.476 \text{ A} \quad i_{Dmed} := \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_D(t) dt = 1.042 \text{ A}$$

Corrente sobre o Capacitor de Saída:

$$i_{Co}(t) := i_D(t) - \frac{V_o}{R_o}$$



Cálculo da corrente eficaz sobre o capacitor:

$$i_{Crms} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_{Co}(t)^2 dt} = 1.045 \text{ A}$$

$$\Delta I_{Co} := \Delta I_{Lms} = 0.417$$

Corrente e tensão no MOSFET, referido e não ao secundário do transformador

$$v_{SS}(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq D \cdot T_s \\ -\left(V_i + \frac{V_o}{n}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad V_{SS,max} := -\left(V_i + \frac{V_o}{n}\right) = -144$$

$$v_{pri}(t) := \begin{cases} V_i & \text{if } t \leq D \cdot T_s \\ \frac{-V_o}{n} & \text{otherwise} \end{cases} \quad v_{sec}(t) := \begin{cases} n \cdot V_i & \text{if } t \leq D \cdot T_s \\ -V_o & \text{otherwise} \end{cases}$$

Tensão e Corrente nos enrolamentos dos transformadores:

Tensão Eficaz no primário e secundário:

$$V_{P_{ef}} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} v_S(t)^2 dt} = 101.823$$

$$V_{S_{ef}} := n \cdot V_{P_{ef}} = 67.882$$

Corrente Eficaz no primário e secundário:

$$i_i(t) := i_S(t)$$

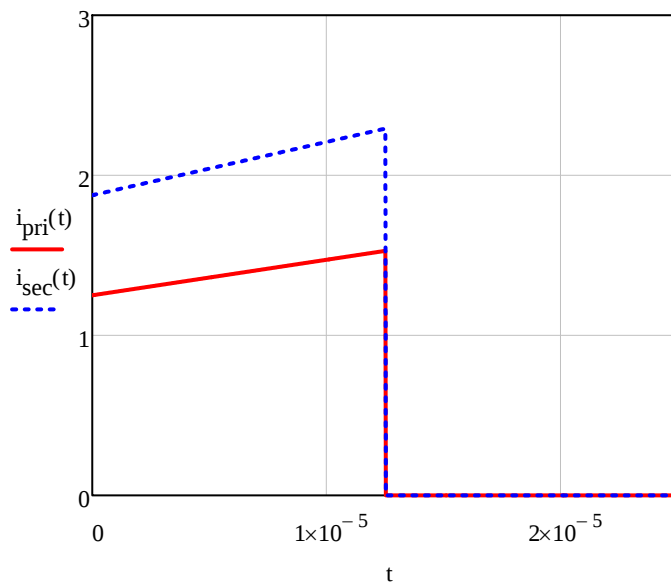
Corrente do primário é igual a corrente do transistor

$$i_{pri}(t) := i_i(t)$$

$$i_{sec}(t) := \frac{i_i(t)}{n}$$

$$I_{pri_{ef}} := i_{S_{rms}} = 0.984$$

$$I_{s_{ef}} := \frac{i_{S_{rms}}}{n} = 1.476$$



Por questão de simplificação, todos os cálculos e forma de onda foram obtidos sem levar em consideração o rendimento de conversor.

▲ Formas de onda

▼ Projeto dos Indutores

Projeto do Indutor acoplado:

Especificação do Material

Densidade de Fluxo

$$B_{max} := 0.3$$

T

Densidade de Fluxo

$$\Delta B := 0.25$$

T

Densidade de Corrente

$$J_{\max} := 450 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Fator de utilização da área do enrolamento

$$k_w := 0.7$$

kw => valores
definidos pág. 323
livro Projeto de
Fonte Chaveadas

Indutância Magnetizante referenciada ao primário

$$L_{\text{mp}} = 4.86 \times 10^{-3} \text{ H}$$

Rendimento do conversor:

$$\eta = 0.85$$

Cálculos Preliminares

Cálculo da Corrente de Pico do Primário

$$I_{p_{\max}} := n \cdot \frac{I_{L_{\text{ms}}.\text{max}}}{\eta} = 1.797 \text{ A}$$

Cálculo da Corrente de Pico do Secundário

$$I_{s_{\max}} := I_{L_{\text{ms}}.\text{max}} = 2.292 \text{ A}$$

$$I_{p_{\text{ef}}} := \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} \left(\frac{i_{\text{pri}}(t)}{\eta} \right)^2 dt} = 1.157$$

Corrente Eficaz do Primário

$$I_{p_{\text{ef}}} = 1.157 \text{ A}$$

Corrente Eficaz do Secundário

$$I_{s_{\text{ef}}} = 1.476 \text{ A}$$

Cálculo do Transformador

$$A_e A_w := \frac{L_{\text{mp}} \cdot I_{p_{\max}} \cdot I_{p_{\text{ef}}} + L_{\text{ms}} \cdot I_{s_{\max}} \cdot I_{s_{\text{ef}}}}{B_{\max} \cdot J_{\max} \cdot k_w} = 1.843 \times 10^{-4} \quad \text{ou } 1,843 \text{ cm}^2$$

Núcleo escolhido:

NEE42/15 da Thornton

O $A_e A_w$ do núcleo escolhido é de 2,84 cm²

Dados do núcleo:

Área da secção transversal do núcleo:

$$A_e := 1.81 \text{ cm}^2$$

Área da janela:

$$A_w := 1.57 \text{ cm}^2$$

Volume do núcleo:

$$V_{\text{nucleo}} := 17.10 \text{ cm}^3$$

Coeficiente de perdas por correntes Parasitas:

$$K_f := 4 \cdot 10^{-10} \quad \text{kf e kh => valores definidos pág. 311}$$

Coeficiente de perdas por Histerese:

$$K_h := 4 \cdot 10^{-5} \quad \text{livro Projeto de Fonte Chaveadas}$$

Comprimento médio de uma espira:

$$MLT := 8.0 \quad \text{cm}$$

Valor baseado nos dimensionais do núcleo NEE 42/15 da Thornton

Numero de espiras:

$$N_p := \text{ceil} \left(\frac{L_{mp} \cdot I_{pmax}}{B_{max} \cdot Ae \cdot 10^{-4}} \right) = 161$$

Exponente 10^{-4} para Ae ficar em cm^2

$$N_s := \text{ceil}(n \cdot N_p) = 108$$

Entreferro:

$$\mu := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$l_g := \frac{N_p^2 \cdot \mu \cdot Ae \cdot 10^{-4}}{L_{mp}} \quad l_g = 1.213 \times 10^{-3} \quad \text{m} \quad \text{ou } 1,213\text{mm}$$

$$l_{\text{entreferro}} := \frac{l_g}{2} \quad l_{\text{entreferro}} = 6.066 \times 10^{-4} \quad \text{m} \quad \text{ou } 0,6066\text{mm}$$

Cálculo da bitola dos condutores:

Penetração máxima:

$$\Delta := \frac{7.5}{\sqrt{f_s}} \quad D_{\text{cond}} := 2 \cdot \Delta = 0.075$$

Área do cobre:

$$A_{\text{cobrep}} := \frac{I_{p\text{ef}}}{J_{\text{max}}} \quad A_{\text{cobrep}} = 2.572 \times 10^{-3} \quad \text{cm}^2 \quad \text{ou } A_{\text{cobrep}} = 0,002572 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{cobres}} := \frac{I_{s\text{ef}}}{J_{\text{max}}} \quad A_{\text{cobres}} = 3.279 \times 10^{-3} \quad \text{cm}^2 \quad \text{ou } A_{\text{cobres}} = 0,003279 \text{ cm}^2$$

A bitola do condutor primario é:

$$\text{AWG23}$$

Seção do condutor nu:

$$S_{\text{condutor_nup}} := 0.002582 \quad \text{cm}^2$$

Seção do condutor Isolado:

$$S_{\text{condutor_isoladop}} := 0.003221 \text{ cm}^2$$

Resistividade do Condutor:

$$\rho_{\text{pfio}} := 0.000892 \frac{\Omega}{\text{cm}}$$

A bitola do condutor secundario é:

$$\text{AWG22}$$

Seção do condutor nu:

$$S_{\text{condutor_nus}} := 0.003255 \text{ cm}^2$$

Seção do condutor Isolado:

$$S_{\text{condutor_isolados}} := 0.004013 \text{ cm}^2$$

Resistividade do Condutor:

$$\rho_{\text{sfio}} := 0.000708 \frac{\Omega}{\text{cm}}$$

Número de condutores:

$$N_{\text{condp}} := \text{ceil} \left(\frac{A_{\text{cobrep}}}{S_{\text{condutor_nup}}} \right)$$

$$N_{\text{condp}} = 1$$

$$N_{\text{conds}} := \text{round} \left(\frac{A_{\text{cobres}}}{S_{\text{condutor_nus}}} \right)$$

$$N_{\text{conds}} = 1$$

Possibilidade de Execução:

$$A_{\text{wminp}} := \left(\frac{N_{\text{p}} \cdot N_{\text{condp}} \cdot S_{\text{condutor_isoladop}}}{k_{\text{w}}} \right)$$

$$A_{\text{wminp}} = 0.741 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{wmins}} := \left(\frac{N_{\text{s}} \cdot N_{\text{conds}} \cdot S_{\text{condutor_isolados}}}{k_{\text{w}}} \right)$$

$$A_{\text{wmins}} = 0.619 \text{ cm}^2$$

$$\frac{A_{\text{wminp}} + A_{\text{wmins}}}{A_{\text{w}}} = 0.866$$

Ok!, Pode ser executado: $(A_{\text{wmin}}/A_{\text{w}} < 1)$

Comprimento do chicote:

$$L_{\text{pchicote}} := \text{MLT} \cdot N_{\text{p}}$$

$$L_{\text{pchicote}} = 1.288 \times 10^3 \text{ cm}$$

$$L_{schicote} := MLT \cdot N_s$$

$$L_{schicote} = 864 \quad \text{cm}$$

Cálculo térmico:

Resistência de condução:

$$R_{pcobre} := \frac{\rho_{pfio} \cdot L_{pchicote}}{N_{condp}}$$

$$R_{pcobre} = 1.149 \quad \Omega$$

$$R_{scobre} := \frac{\rho_{sfio} \cdot L_{schicote}}{N_{conds}}$$

$$R_{scobre} = 0.612 \quad \Omega$$

Potência Dissipada no cobre:

$$P_{pcobre} := R_{pcobre} \cdot (I_{p_{ef}})^2$$

$$P_{pcobre} = 1.539 \quad \text{W}$$

$$P_{scobre} := R_{scobre} \cdot (I_{s_{ef}})^2$$

$$P_{scobre} = 1.332 \quad \text{W}$$

$$P_{cobre} := P_{pcobre} + P_{scobre} = 2.871 \quad \text{W}$$

Perdas Núcleo:

$$P_{nucleo} := \Delta B^{2.4} \cdot (K_h \cdot f_s + K_f \cdot f_s^2) \cdot V_{nucleo}$$

$$P_{nucleo} = 1.375 \quad \text{W}$$

Resistencia térmica do nucleo:

$$A_e A_{w_{lo}} := A_e \cdot A_w$$

$$A_e A_{w_{lo}} = 2.842$$

$$R_{nucleo} := 23 A_e A_{w_{lo}}^{-0.37}$$

$$R_{nucleo} = 15.628 \quad \frac{\Delta^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Elevação de temperatura:

$$\Delta T := (P_{cobre} + P_{nucleo}) \cdot R_{nucleo}$$

$$\Delta T = 66.353$$

▲ Projeto dos Indutores

▼ Parametros de Projeto

Parametros das Indutancias:

$$R_{dp} := R_{pcobre} \quad R_{dp} = 1.149 \quad \Omega$$

$$R_{ds} := R_{scobre} \quad R_{ds} = 0.612 \quad \Omega$$

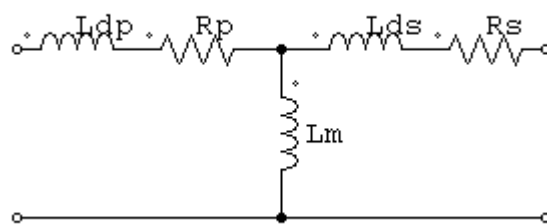
$L_{dp} := 35 \times 10^{-6} \text{ H}$ Valor estimado. Necessita ser medido após a construção do transformador.

$$L_{ds} := L_{dp} \cdot n^2 \quad L_{ds} = 1.556 \times 10^{-5} \text{ H}$$

Projeto dos Componentes:

Transformador:

Modelo real:



Circuito equivalente do transformador

Indutância de Dispersão Real do Transformador:

$$L_{dp} = 3.5 \times 10^{-5} \text{ H} \quad \text{Referida ao primário}$$

$$L_{ds} = 1.556 \times 10^{-5} \text{ H} \quad \text{Referida ao secundário}$$

Escolha do Transistor e do Diodo:

Transistor:

$$I_{\text{tran_ef}} := i_{S\text{rms}} = 0.984 \text{ A} \quad \text{Corrente eficaz no MOSFET}$$

$$I_{\text{tran_med}} := i_{S\text{med}} = 0.694 \text{ A} \quad \text{Corrente média no MOSFET}$$

$$V_{\text{tran_max}} := V_i + \frac{V_o}{n} = 144 \text{ V} \quad \text{Tensão máxima sobre o MOSFET}$$

$$I_{\text{tran_max}} := n \cdot I_{L\text{ms,max}} = 1.528 \text{ A} \quad \text{Corrente máxima no MOSFET}$$

$$V_{DS} := 400 \text{ V} \quad \text{Tensão Drain-Gate}$$

$$V_{GS} := 15 \text{ V} \quad \text{Tensão Gate-Source}$$

MOSFET escolhido:

IRF740A

$$R_{DS} := 0.43 \quad \Omega$$

Resistência Drain-Source

$$T_{jmax.Mos} := 150 + 273.15 = 423.15 \quad K$$

Temperatura máxima de operação

$$R_{thj_case.Mos} := 1 \quad \frac{K}{W}$$

Resistência térmica entre junção e cápsula

$$R_{thc_sink.Mos} := 0.5 \quad \frac{K}{W}$$

Resistência térmica entre cápsula e dissipador

$$t_r := 35 \cdot 10^{-9} \quad s$$

Tempo de subida do Mosfet (rise time)

$$t_f := 22 \cdot 10^{-9}$$

Tempo de descida do Mosfet (fall time)

Diodo:

$$i_{Drms} = 1.476 \quad A$$

Corrente rms no diodo

$$i_{Dmed} = 1.042 \quad A$$

Corrente média no diodo

$$i_{Dmax} := I_{smax} = 2.292 \quad A$$

Corrente de pico no diodo

Diodo escolhido:

MUR820

$$R_{thj_case.D} := 3 \quad \frac{K}{W}$$

Resistência térmica junção cápsula

$$T_{jmax.D} := 175 + 273.15 = 448.15 \quad K$$

Temperatura máxima de operação

Cálculo do Dissipador:

$$T_a := 25 + 273.15 = 298.15 \quad K$$

Temperatura ambiente

$$P_{MOSFET.cond} := R_{DS} \cdot I_{tran_ef}^2 = 0.416 \quad W \quad \text{Perdas por condução no Mosfet}$$

$$P_{MOSFET.cmt} := \frac{f_s}{2} (t_r + t_f) \cdot I_{tran_max} \cdot V_{tran_max} = 0.251 \quad W \quad \text{Perdas por comutação no Mosfet}$$

$$P_{MOSFET} := P_{MOSFET.cmt} + P_{MOSFET.cond} = 0.667 \quad W \quad \text{Perdas totais no Mosfet}$$

$$R_{thj_a.MOS.max} := \frac{T_{jmax.Mos} - T_a}{P_{MOSFET}} = 187.429 \quad \frac{K}{W} \quad \text{Resistência térmica máxima permitida entre junção e ambiente}$$

Não precisa de dissipador, pois R_{thja} do MOSFET é 62.5 K/W, ou seja, menor que a resistência térmica máxima permitida

$v_f := 0.65 \text{ V}$ Queda de tensão do diodo em condução, segundo datasheet

$$P_{\text{Diodo}} := i_{Dmed} \cdot v_f = 0.677 \text{ W}$$

Perdas por condução no diodo.

$$R_{thj_a.D.max} := \frac{T_{jmax.D} - T_a}{P_{\text{Diodo}}} = 221.538$$

Não precisa de dissipador, pois R_{thja} do Diodo é 73 K/W, ou seja, menor que a resistência térmica máxima permitida

▲ Parametros de Projeto

▼ Grampeador

Projeto do Grampeador:

Indutância de dispersão equivalente:

Circuido do Grampeador:

$$L_{eq} := 2 \cdot L_{dp} = 7 \times 10^{-5} \text{ H}$$

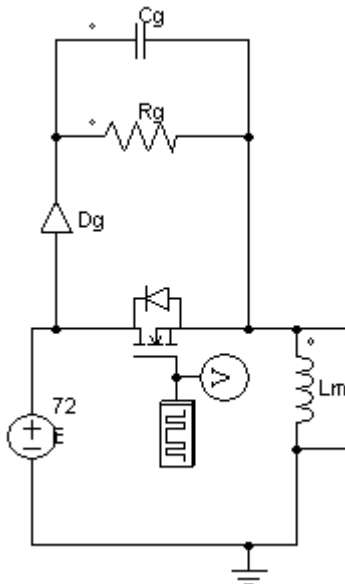
Corrente no primário:

$$I_{Lmp.max} = 1.528 \text{ A}$$

Tensão de grampeamento:

$$V_g := 350 \text{ V}$$

$$V_{tran_max} = 144 \text{ V}$$



Apostila Professor Ivo:

$$\Delta V_g := 0.05 \cdot V_g = 17.5 \text{ V}$$

$$V_{o_pri} := \frac{V_o}{n} = 72 \text{ V}$$

$$\Delta t := \frac{L_{eq} \cdot I_{Lmp.max}}{V_g - V_i - V_{o_pri}} = 5.191 \times 10^{-7} \text{ s}$$

Duração do grampeamento

$$\frac{\Delta t}{T_s} \cdot 100 = 2.077$$

$$P_g := \frac{L_{eq} \cdot I_{Lmp.max}^2 \cdot f_s}{2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{V_i + V_{o_pri}}{V_g}\right)} = 5.552 \text{ W} \quad \text{Potência dissipada no circuito grampeador}$$

Resistor:

$$R_g := \frac{V_g^2}{P_g} = 2.206 \times 10^4 \text{ } \Omega$$

Resistência do circuito grampeador

$$R_g = 22k\Omega$$

$$C_g := \frac{P_g}{f_s \cdot V_g \cdot \Delta V_g}$$

$$C_g = 2.266 \times 10^{-8} \text{ F}$$

Capacitor do circuito grampeador

$$C_g = 22nF/630V$$

Segundo o application note AN-4147

$$V_{sn} := V_g$$

$$R_{sn} := \frac{V_{sn}^2}{\frac{1}{2} L_{eq} \cdot I_{Lmp.max}^2 \cdot f_s \cdot \frac{V_{sn}}{V_{sn} - V_{o_pri}}}$$

$$R_{sn} = 2.978 \times 10^4 \text{ } \Omega$$

Resistor Escolhido

$$R_{sn} := 33000 \text{ } \Omega$$

$$P_{sn} := \frac{V_{sn}^2}{R_{sn}} \quad P_{sn} = 3.712 \text{ W} \quad \text{Perdas no resistor}$$

$$C_{sn} := \frac{V_{sn}}{\frac{5}{100} \cdot V_{sn} \cdot R_{sn} \cdot f_s} \quad C_{sn} = 1.515 \times 10^{-8}$$

$$C_{sn} = 15nF/630V$$

☐ Grampeador

☒ Capacitor de Saída

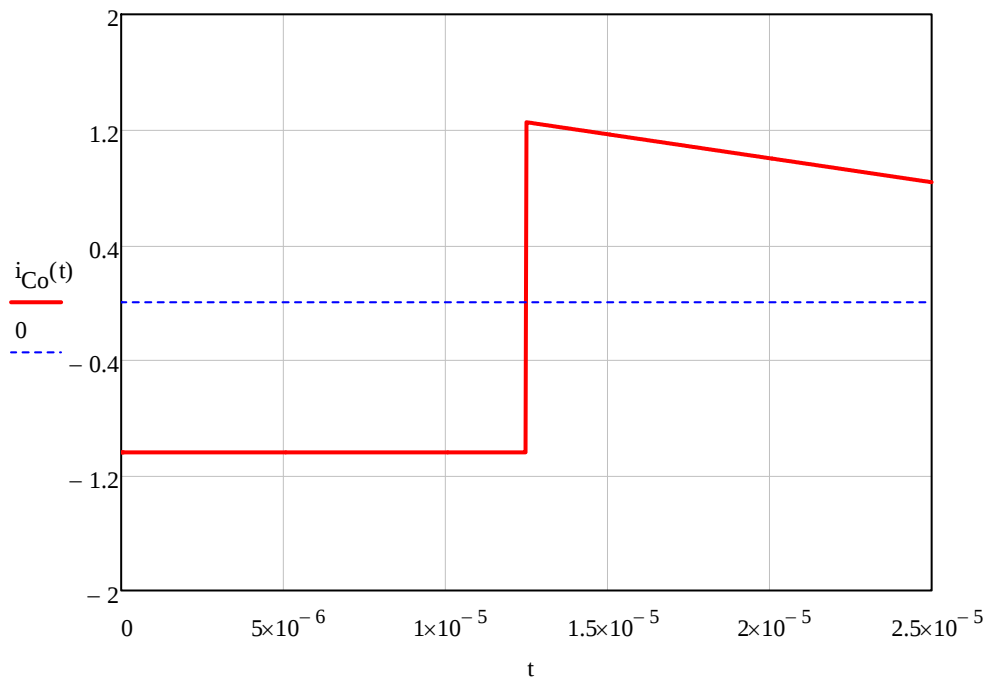
Projeto do Capacitor:

Cálculo do Capacitor:

$$C_o := \frac{D \cdot V_o}{f_s \cdot R_o \cdot \Delta V_{C_o}} = 2.713 \times 10^{-5}$$

Co = 27,13µF

Corrente no capacitor de saída



$i_{Crms} = 1.045$ A

Corrente rms no capacitor

$\Delta I_{C_o} = 0.417$ A

Variação de corrente no capacitor

$\Delta V_{C_o} = 0.48$ V

Variação de tensão

$C_o = 2.713 \times 10^{-5}$

Capacitância

$$RSE_{\max.} := \frac{\Delta V_{Co}}{\Delta I_{Co}} = 1.152 \ \Omega$$

Capacitor 33uF/100V
Epcos: Família B41851/105°C

▲ Capacitor de Saida
