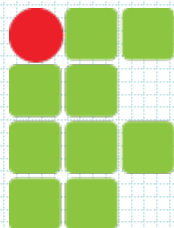
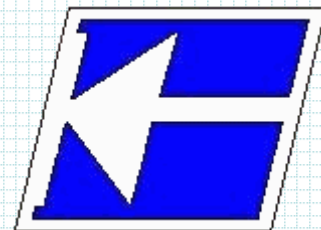


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



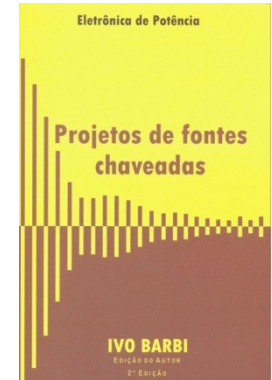
Projeto de Indutores para Alta Frequência

Prof. Joabel Moia

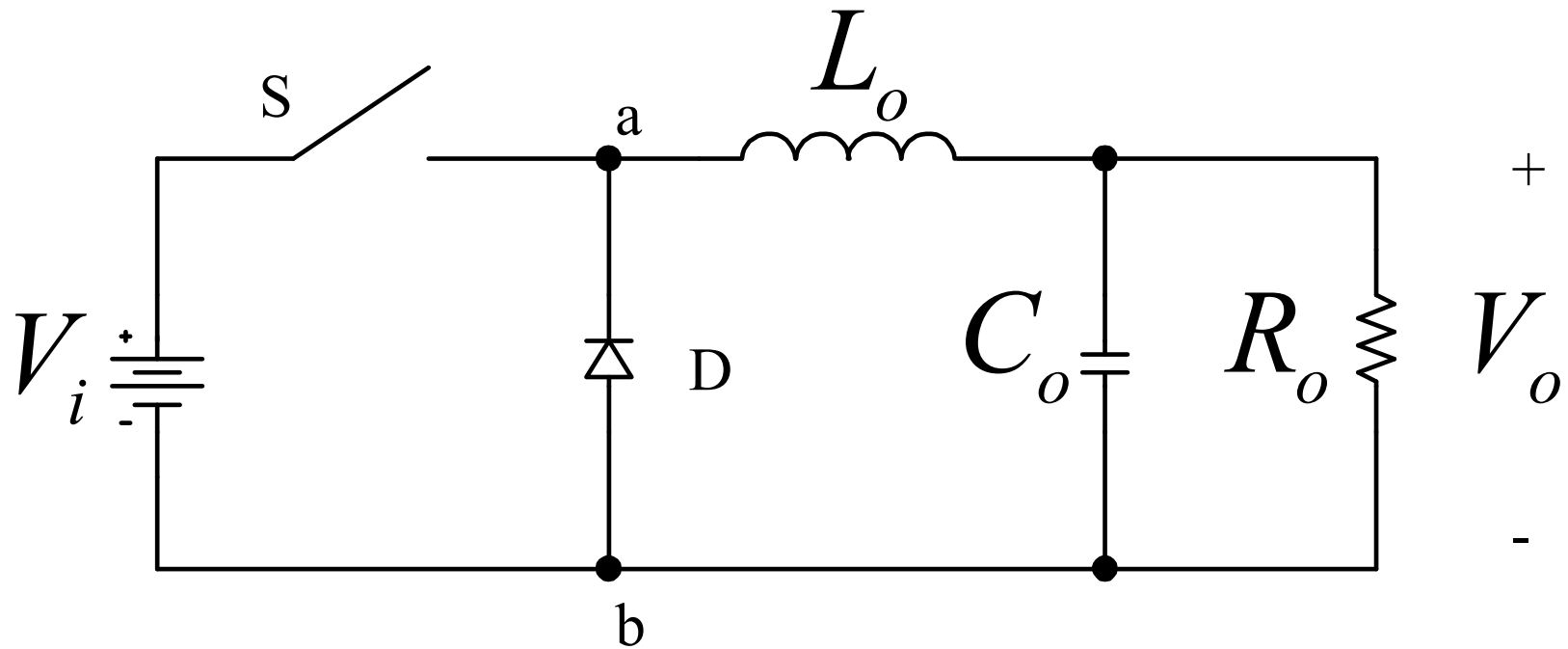
Florianópolis, abril de 2025

Introdução comparativa:

1. Conversor Buck;
2. Projeto de indutor com núcleo de ferrite.

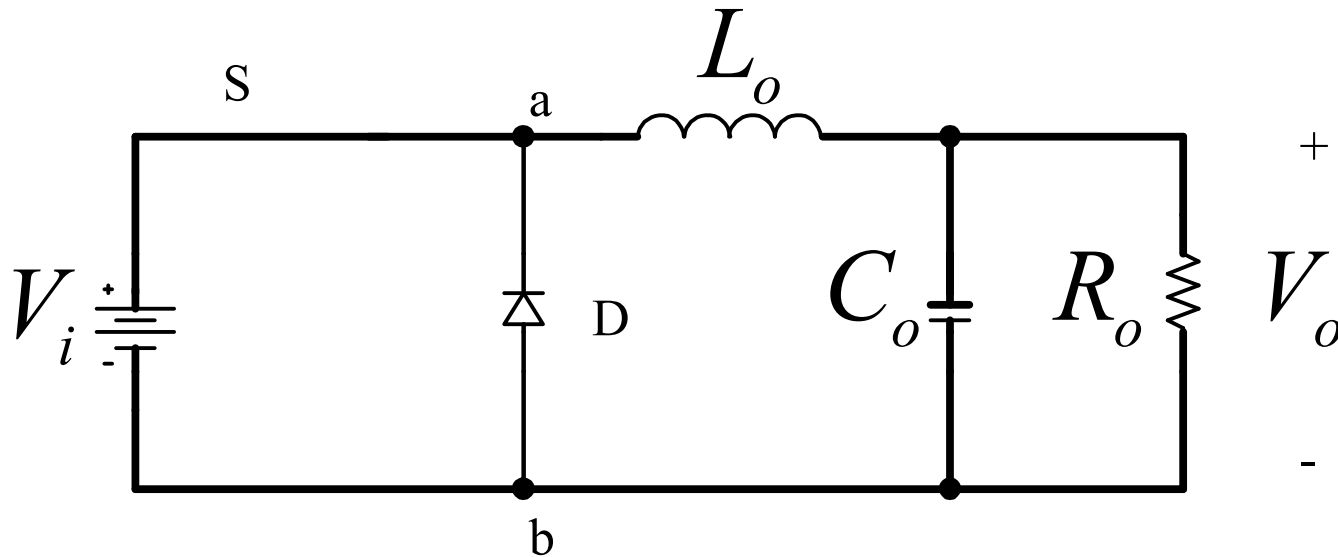


Conversor Buck



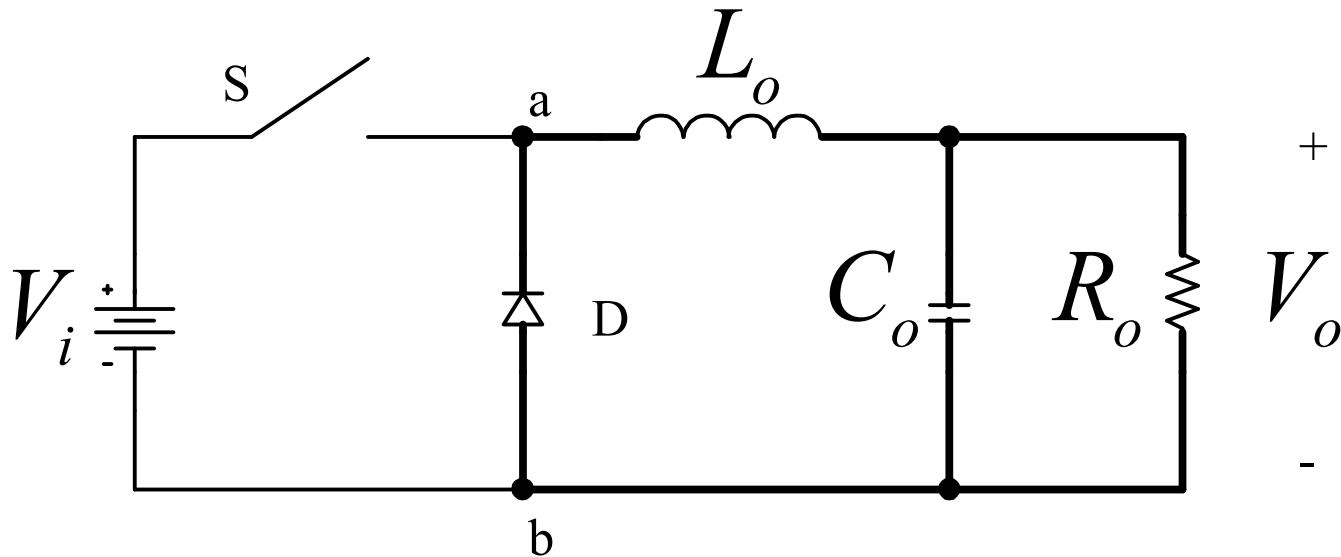
Primeira etapa de funcionamento:

- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.

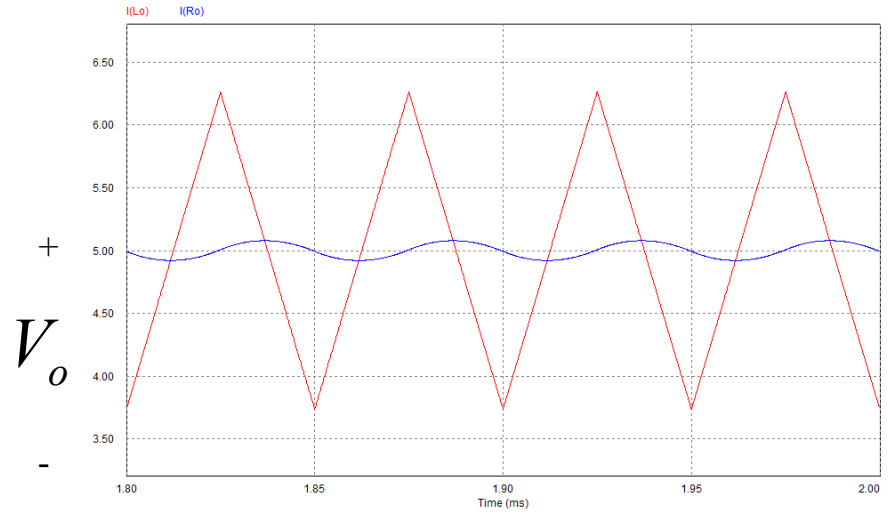
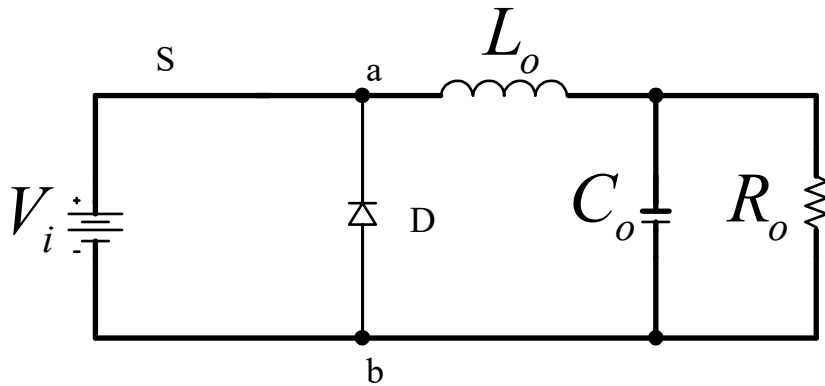


Segunda etapa de funcionamento:

- Interruptor bloqueado;
- Diodo conduzindo;
- Energia armazenada no indutor sendo transferida para saída.



Ondulação de corrente em L_o :



$$V_{L_o} = L_o \frac{di_{L_o}}{dt} \simeq L_o \frac{\Delta I_{L_o}}{\Delta T}$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T_s}{L_o}$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o} \cdot \Delta T}{L_o}$$

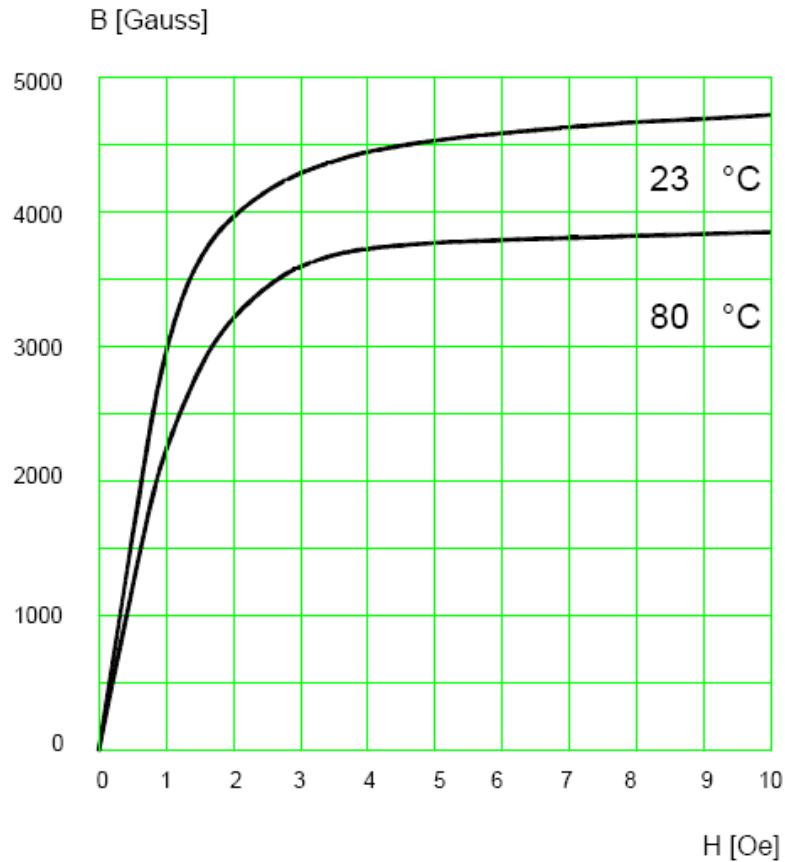
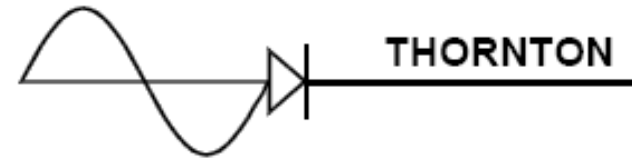
$$\Delta I_{L_o} = \frac{(V_i - D \cdot V_i) \cdot D}{L_o \cdot F_s} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} D \cdot (1 - D)$$

$$\Delta I_{L_o_max} = \frac{V_i}{4 \cdot L_o \cdot F_s}$$

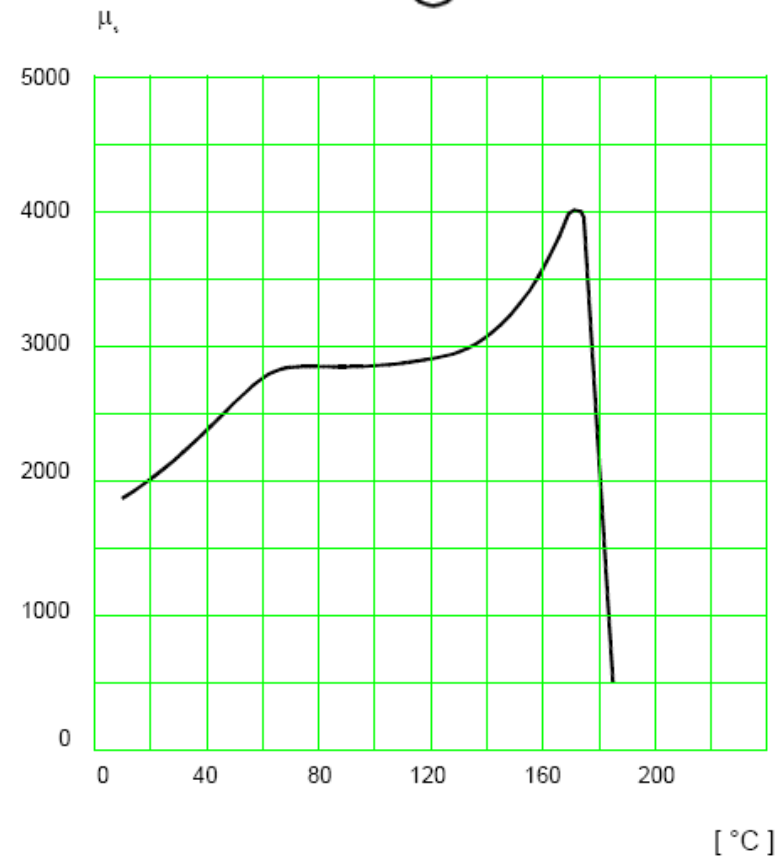
O projeto de um indutor depende:

- Da frequência de operação;
- Da corrente no mesmo;
- Do regime de trabalho;
- Do material utilizado para o núcleo;
- Entre outros....

Características do núcleo:



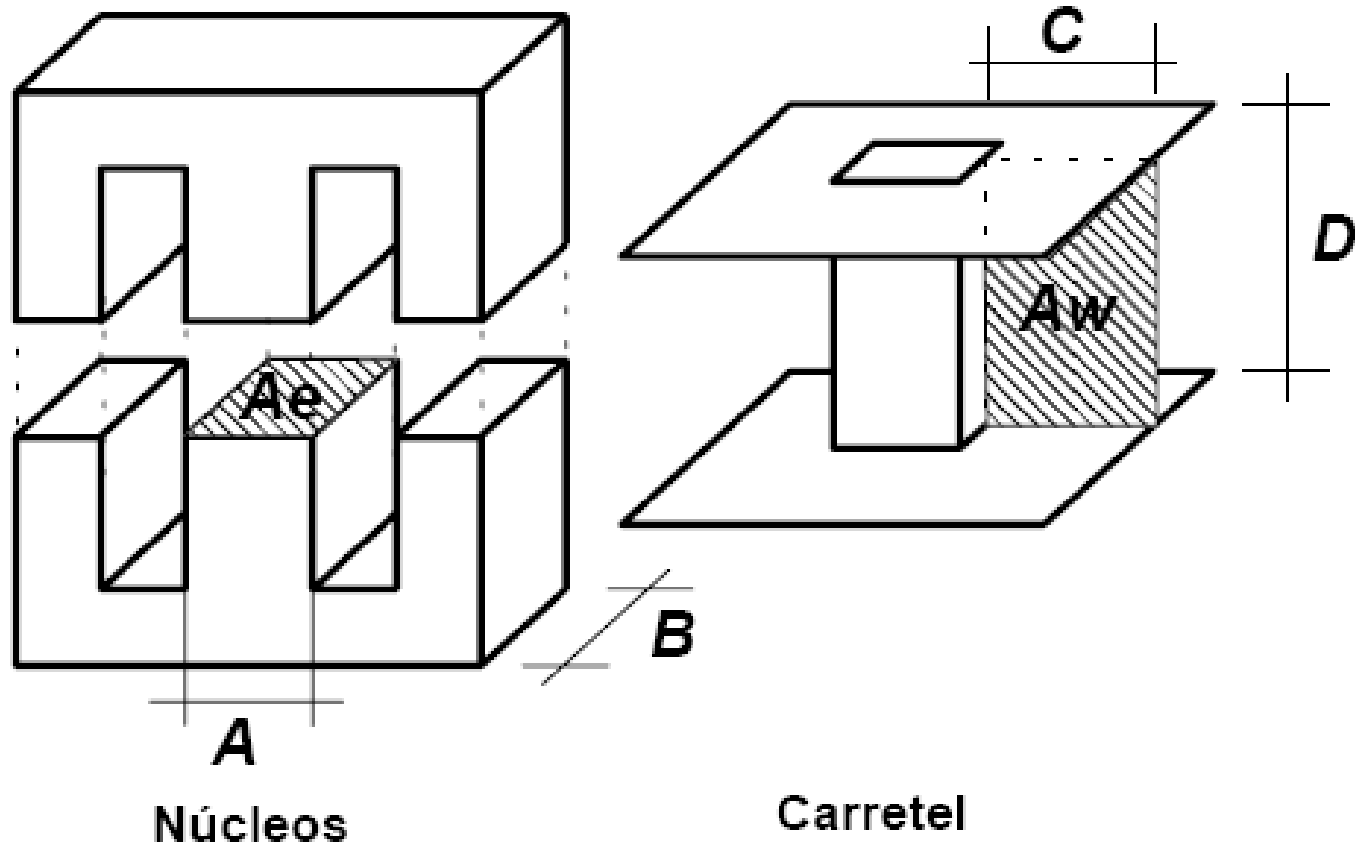
Típico $B \times H$



$\mu_i \times$ Temperatura

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Montagem do núcleo (com entreferro):



Projeto de indutores com núcleo de ferrite

1) Exemplo: Dados de entrada:

$$L_o = 100 \mu H$$

Indutância do indutor;

$$F_s = 20 kHz$$

Frequência de operação;

$$I_{Lop} = 10 A$$

Corrente de pico;

$$I_{Loef} = 6 A$$

Corrente eficaz;

$$\Delta I_{Lo} = 1 A$$

Ondulação de corrente;

$$k = 0,7$$

Fator de enrolamento;

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

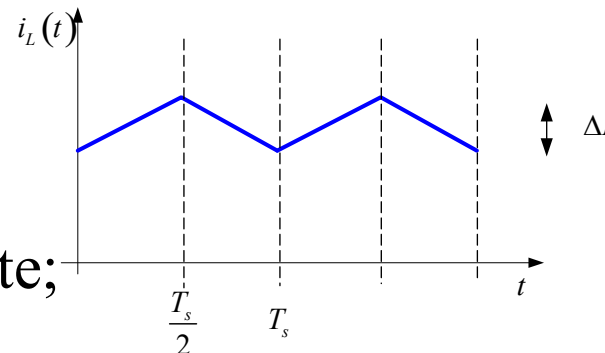
Densidade de corrente;

$$B = 0,35 T$$

Densidade de fluxo máximo;

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

Permeabilidade no vácuo.



2) Escolha do núcleo:

$$\Delta B = B \frac{\Delta I_{Lo}}{I_{Lop}} = 0,35 \frac{1}{10} = 0,035 T$$

$$A_e A_w = \frac{L_o \cdot I_{Lop} \cdot I_{Loef} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 6 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,35 \cdot 450} = 0,544 \text{ cm}^4$$

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:

$$N = \frac{L_o \cdot I_{Lop} \cdot 10^4}{B \cdot A_e} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^4}{0,35 \cdot 1,20} = 24 \text{ espiras}$$

4) Cálculo do entreferro:

$$lg = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e \cdot 10^{-2}}{L_o} = \frac{24^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,20 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 10^{-6}} = 0,087 \text{ cm}$$

5) Perdas no núcleo:

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

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

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

$$P_{nucleo} = 0,035^{2,4} \cdot (4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 + 4 \cdot 10^{-10} \cdot 20000^2) \cdot 8$$

$$P_{nucleo} = 2,46 mW$$

6) 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.

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

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

7) Escolha da seção dos condutores:

$$S = \frac{I_{Loef}}{J} = \frac{6}{450} = 0,013 \text{ cm}^2 \quad \text{Maior que a área do fio 22 AWG.}$$

$$N_{fios} = \frac{S}{A_{cu22}} = \frac{0,013}{0,003255} = 4 \text{ fios} \rightarrow 5 \text{ fios}$$

8) Cálculo da resistência do fio:

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho_{22}}{N_{fios}} \cdot l_t = 24 \cdot \frac{0,000530}{5} \cdot 6,7 = 0,017 \Omega$$

9) Perdas no cobre:

$$P_{cobre} = R_{fio} \cdot I_{Loef}^2 = 0,017 \cdot 6^2 = 0,614 W$$

10) Perdas totais:

$$P_{totais} = P_{nucleo} + P_{cobre} = 2,46m + 0,614 = 0,616 W$$

11) Elevação de temperatura:

$$Rt = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} = 23 \cdot (1,02)^{-0,37} = 22,832 ^\circ C / W$$

$$\Delta T = Rt \cdot P_{total} = 22,832 \cdot 0,616 = 14,066 ^\circ C$$

12) Cálculo do fator de ocupação:

$$Aw_{neces} = \frac{N \cdot N_{fios} \cdot S_{22}}{0,7} = \frac{24 \cdot 5 \cdot 0,004013}{0,7} = 0,688 cm^2$$

$$K_{ocup} = \frac{Aw_{neces}}{Aw} = \frac{0,688}{0,85} = 0,809$$



[HELP](#) [REQUEST SAMPLES](#) [REQUEST QUOTE](#) [CONTACT MAGNETICS](#)

[Print PDF](#)

[Help](#)

Design Input

Shape Selection: E Shape Design

Material Selection: Kool Mu

DC Current (Amps): 8.333

Peak to Peak Ripple (Amps): 0.833

Frequency (kHz): 100

Peak Current Inductance (μH): 100

Specified Current (Amps): 8.33

Temperature Rise (°C): 50

Stack Cores: 1

[Reset](#)

[Find Part Numbers](#)

Magnetics Part Numbers

Part No	Specification	Size Code
00K3515E090	Datasheet	3515E
00K4317E090	Datasheet	4317E
00K4317E060	Datasheet	4317E
00K4317E040	Datasheet	4317E
00K4317E026	Datasheet	4317E
00K4020E090	Datasheet	4020E
00K4020E060	Datasheet	4020E
00K4020E040	Datasheet	4020E
00K4020E026	Datasheet	4020E

Selected Part Numbers

00K4020E026

[Design Output](#)

A	42.85	mm	u	26	μ
HT	15.4	mm	AL	80	nH/T²

Design Output

Min Inductance @ Full Load (μH): 108.2

Nom Inductance @ No Load (μH): 121.7

Min Inductance @ Specified Current (μH): 108.5

Core Loss (W): 0.023

Copper Loss (W): 1.91

Total Losses (W): 1.933

Temperature Rise (°C): 17.5

Number of Turns: 39

Wire Size (AWG): 14

Winding Factor (%): 46.4%

DC Resistance: 27.45

Output Inductor Design Tool

The OUTPUT INDUCTOR Design Tool was created as a Design Tool, to assist you in your application Designs of:

Flyback Transformer Design, Forward Converter output Filter Design, Half Bridge Converter output filter Design , Full Bridge Converter output filter Design, VRM Inductor Design, Voltage regulation module design, synchronis rectification output inductor design

[Download the .EXE file](#)

[Download the ZIP File](#)

AC Reactor Design Tool

The AC Reactor Design Tool was created as a Design Tool, to assist you in your application Designs of:

Harmonic Filter Design, UPS Harmonic Filter Design, dv/dt Inductor Design, Harmonic Filter for Distributed Power Generation, Solar Cell Harmonic Filter Design, Wind Power Harmonic Filter Design, Wind Power Harmonic Filter Design.

[Download the .EXE file](#)

[Download the ZIP File](#)

DC Reactor Design Tool

The DC Reactor Design Tool was created as a Design Tool, to assist you in your application Designs of:

Choke Design, High PowerHarmonic Filter Design, Power Factor Harmonic Filter Design, Input Inductor Design, DC Link Reactor Design, DC Link Filter.

[Download the .EXE file](#)

[Download the ZIP File](#)

<http://hitachimetals.metglas.com/>

Projeto de indutores

PExprt - [Buck1]

File Libraries Calculations Modeler Reports FEA Link Options View Window Help

Property Value

Waveforms Design Inputs Modeling Options

Input Voltage: 24 V

Switching Frequency: 100 kHz

Inductor Current Ripple: Ripple Value: 833.33 mA, 20 % of Iaverage

Output Values: Voltage: 12 V, Current: 4.17 A, Power: 50 W, Load: 2.88 ohm

Inductor Average Current: 4.17 A

Inductance: 72.00 uH

Conduction Mode: Continuous

Duty Cycle: 50.0%

Cores Bobbins Wires Material

Stock Libraries: AVX, Electrical steel, Epcos, Ferroxcube, Magnetics, Metglas, Micrometals, Steward, TDK, Design Library

Circuit Diagram: A Buck converter circuit with input voltage V_i , switch S , diode D , inductor L , capacitor C , and output voltage V_o .

Voltage Graph: Plot of Voltage (V) vs Time (us) showing a square wave switching between 12V and 0V.

Currents Graph: Plot of Currents (A) vs Time (us) showing the inductor current (red line) and average current (green line) over time.

PExprt™ Version 2015.0.0. © 2015 Universidad Politécnica de Madrid (UPM) and SAS IP, Inc.

Software PExprt - ANSYS

Especificações

- Indutância
- Corrente média
- Frequência de operação
- Máxima elevação de temperatura
- Temperatura ambiente
- Fator de utilização da janela

Seleção do núcleo

- Material do núcleo
- Máxima densidade de campo magnético
- Produto de área do núcleo

Enrolamentos

- Número de voltas
- Densidade de corrente
- Seleção dos condutores

Perdas

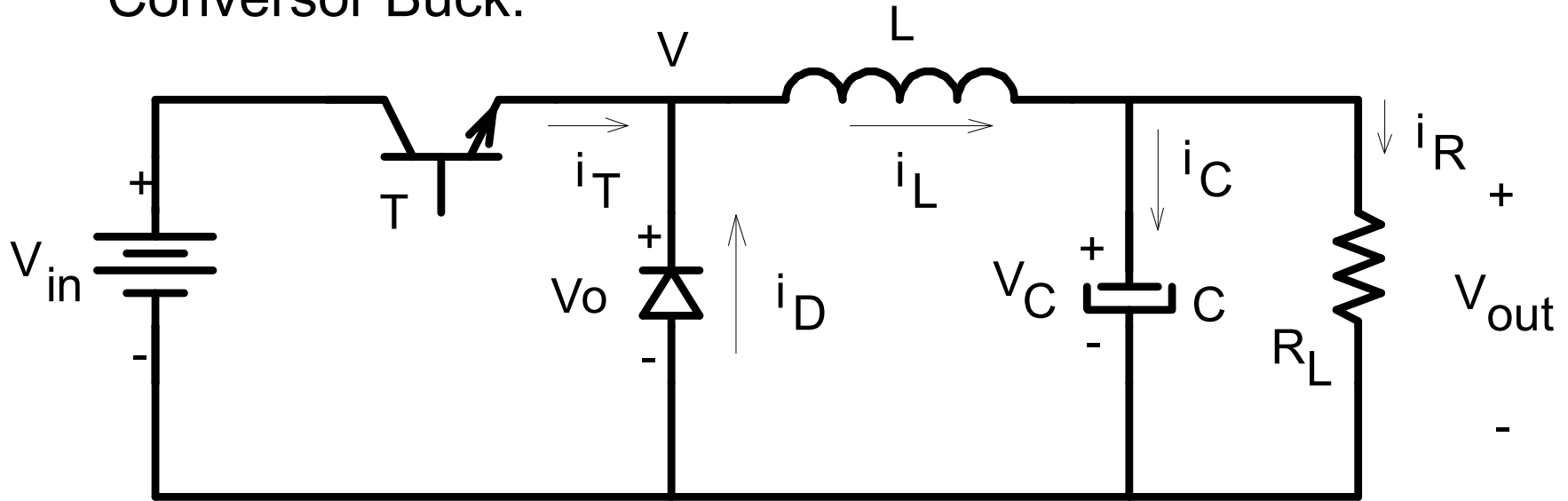
- Perdas no cobre
- Perdas nos enrolamentos se necessário

Passos para projetar elementos magnéticos em alta frequência:

- Calcular os esforços de corrente e tensão em tal elemento;
- Calcular a variação do fluxo magnético;
- Definir qual material e fabricante será empregado;
- Calcular o tamanho do núcleo mínimo:
 - Definir um núcleo comercial;
- Calcular o número de espiras;
- Calcular a área de seção transversal (bitola) do fio:
 - Calcular a quantidade de fio em paralelo, devido ao efeito pelicular;
- Calcular a possibilidade de execução;
- Calcular as perdas magnéticas e do fio;
- Calcular a elevação de temperatura;

Tarefa 3

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 o site da Magnetics e definir um núcleo de tal fabricante