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

Projeto de Indutores para Alta Frequência

Prof. Joabel Moia.

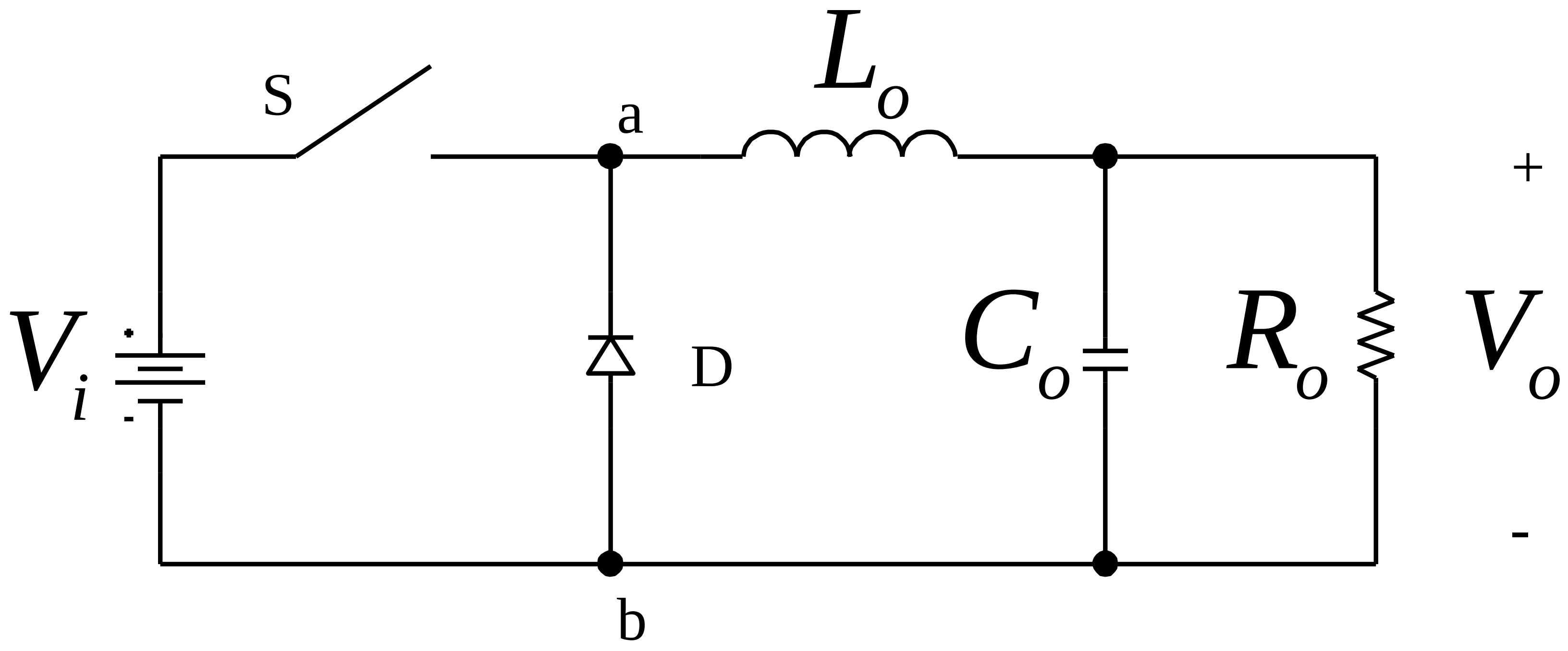
Florianópolis, agosto de 2018.

Bibliografia para esta aula

Introdução comparativa:

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

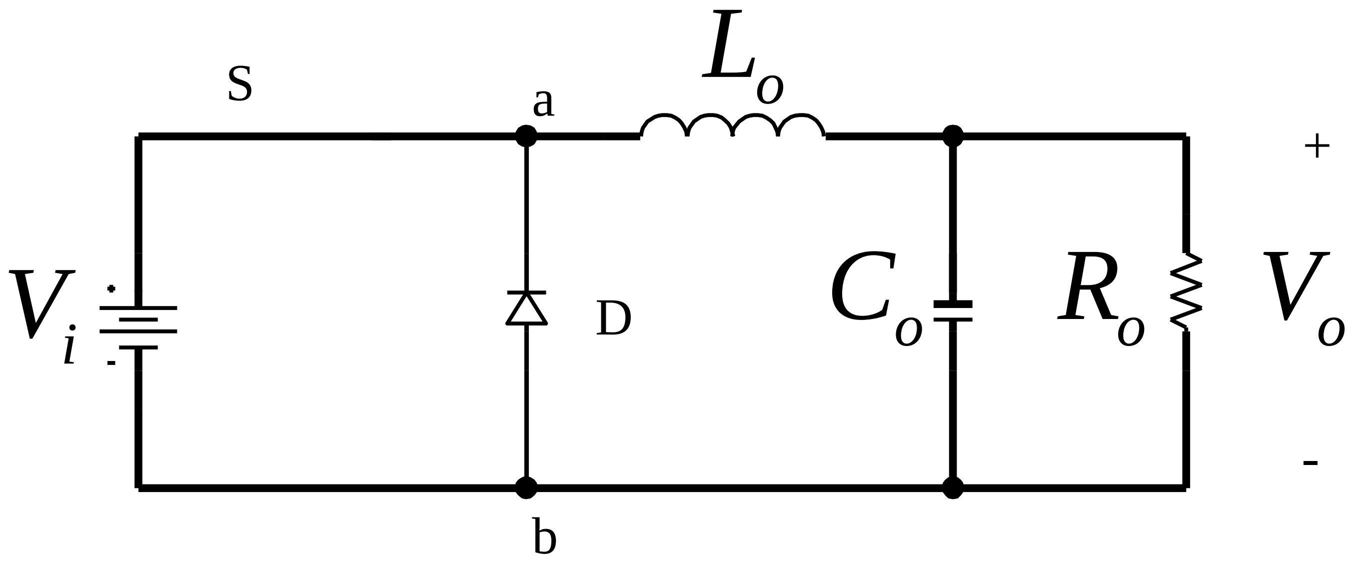
Conversor Buck



Conversor Buck

Primeira etapa de funcionamento:

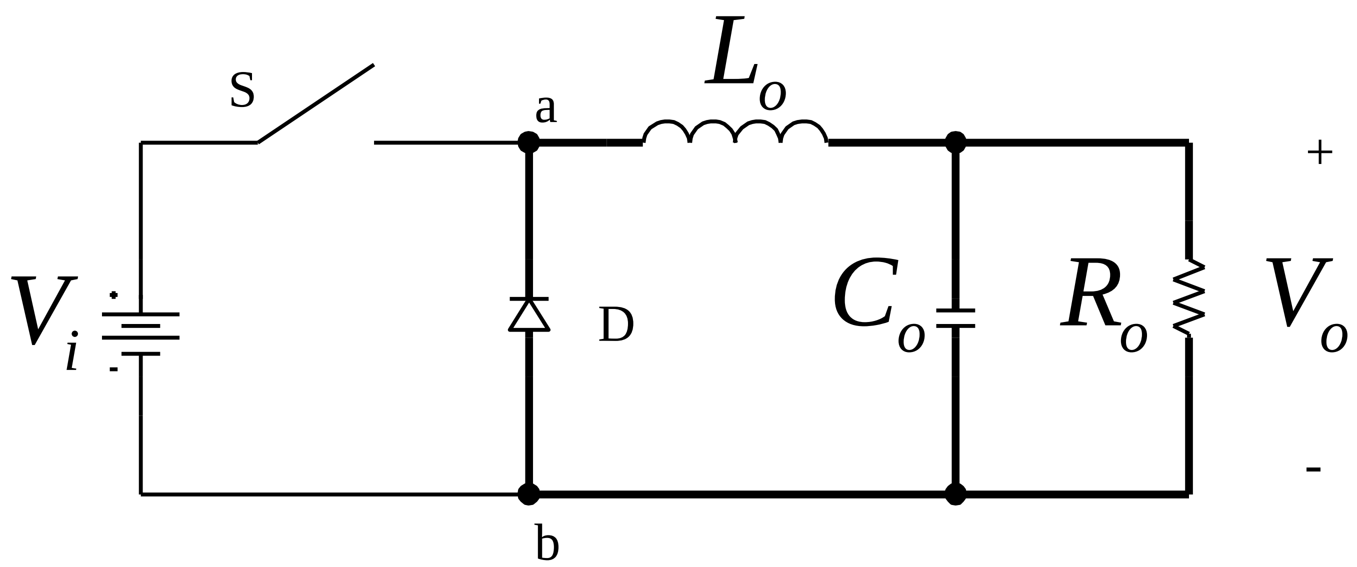
- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.



Conversor Buck

Segunda etapa de funcionamento:

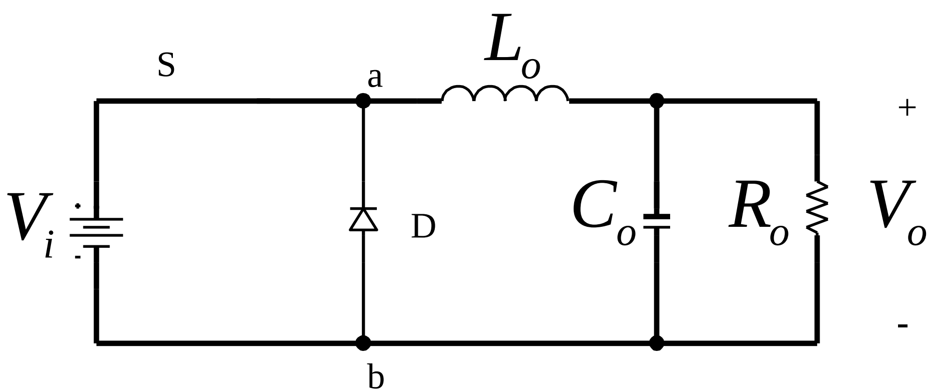
- Interruptor bloqueado;
- Diodo conduzindo;
- Energia armazenada no indutor sendo transferida para saída.

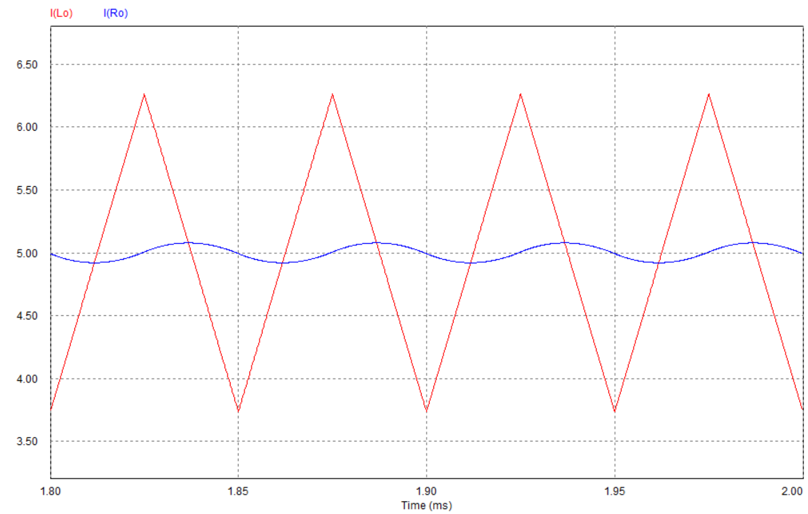


Conversor Buck

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Ondulação de corrente em L_o:





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

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

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

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

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

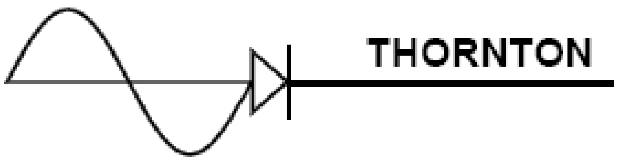
Projeto de indutores

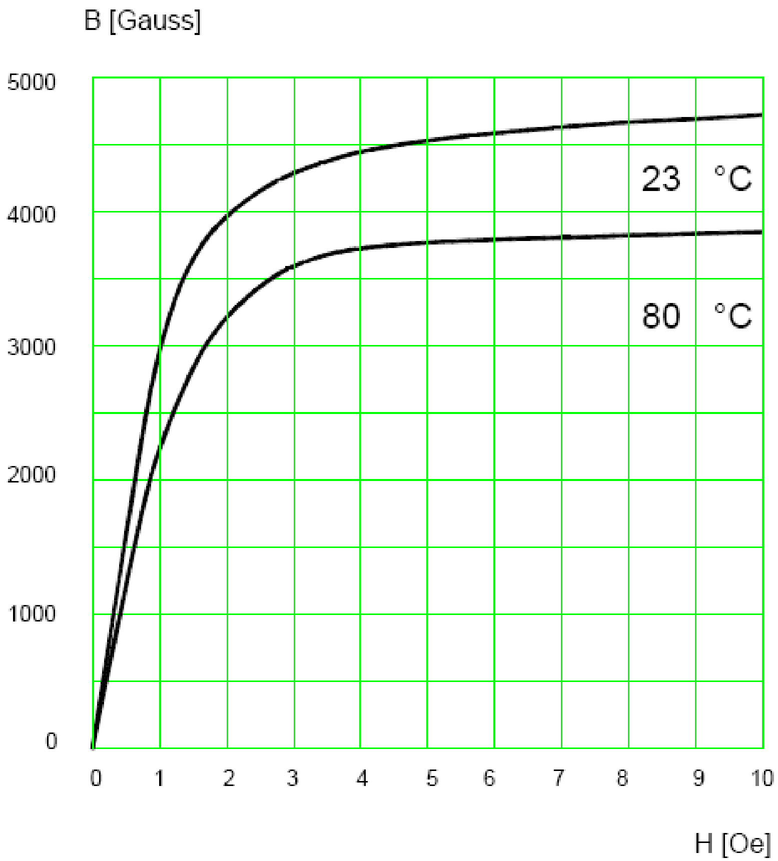
O projeto de um indutor depende:

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

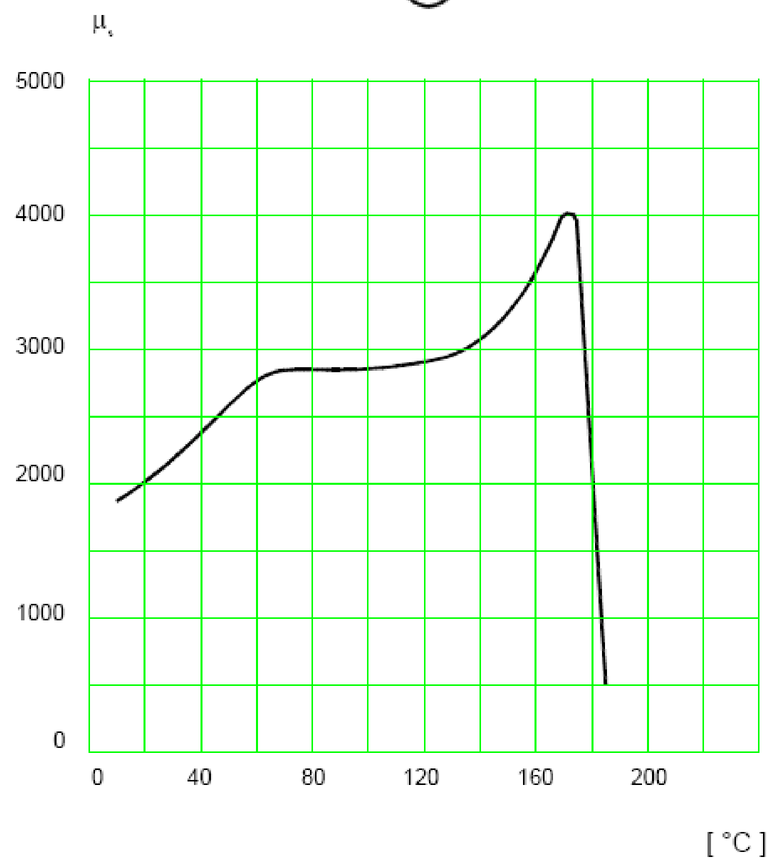
Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Características do núcleo:





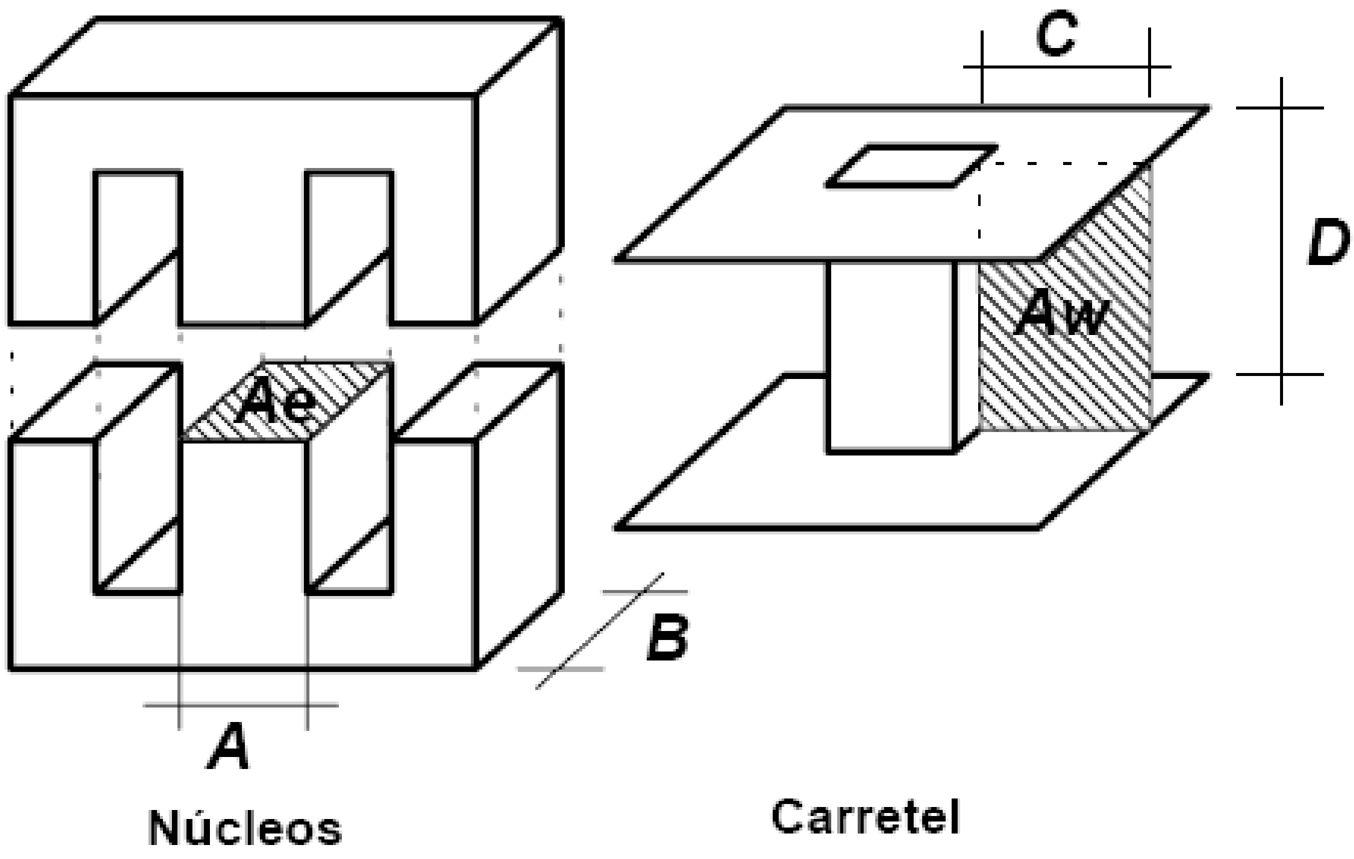
Típico B x H



μι x *Temperatura*

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Montagem do núcleo (com entreferro):

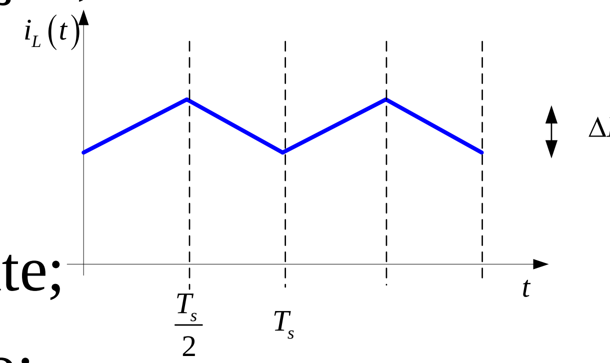


Projeto de indutores com núcleo de ferrite

1) Exemplo: Dados de entrada:

$L_o = 100\,\mu H$ Indutância do indutor;

$F_s = 20\,kHz$ Freqüência de operação;



$I_{Lop} = 10\,A$ Corrente de pico;

$\mathrm{I}_{\mathrm{Loef}} = 6\,A$ Corrente eficaz;

$\Delta \mathrm{I}_{\mathrm{Lo}} = 1\,A$ Ondulação de corrente;

$\mathrm{k} = 0{,}7$ Fator de enrolamento;

$\mathrm{J} = 450\,A/cm^2$ Densidade de corrente;

$\mathrm{B} = 0{,}35\,T$ Densidade de fluxo máximo;

$\mu_{\mathrm{o}} = 4\pi \cdot 10^{-7}\,Wb/A/m$ Permeabilidade no vácuo.

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

2) Escolha do núcleo:

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

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

Núcleo	A_e (cm^2)	A_w (cm^2)	l_e (cm)	l_t (cm)	v_e(cm^3)	A_eA_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 de indutores com núcleo de ferrite

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:

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

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

5) Perdas no núcleo:

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

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

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

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

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

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

6) Profundidade de penetração:

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

$$Dfio_{max} = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot 0,053 = 0,106cm$$

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.

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

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

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

7) Escolha da seção dos condutores:

$$S = \frac{I_{Loef}}{J} = \frac{6}{450} = 0,013 cm^2$$

Maior que a área do fio 22 AWG.

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

8) Cálculo da resistência do fio:

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

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

9) Perdas no cobre:

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

10) Perdas totais:

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

11) Elevação de temperatura:

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

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

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

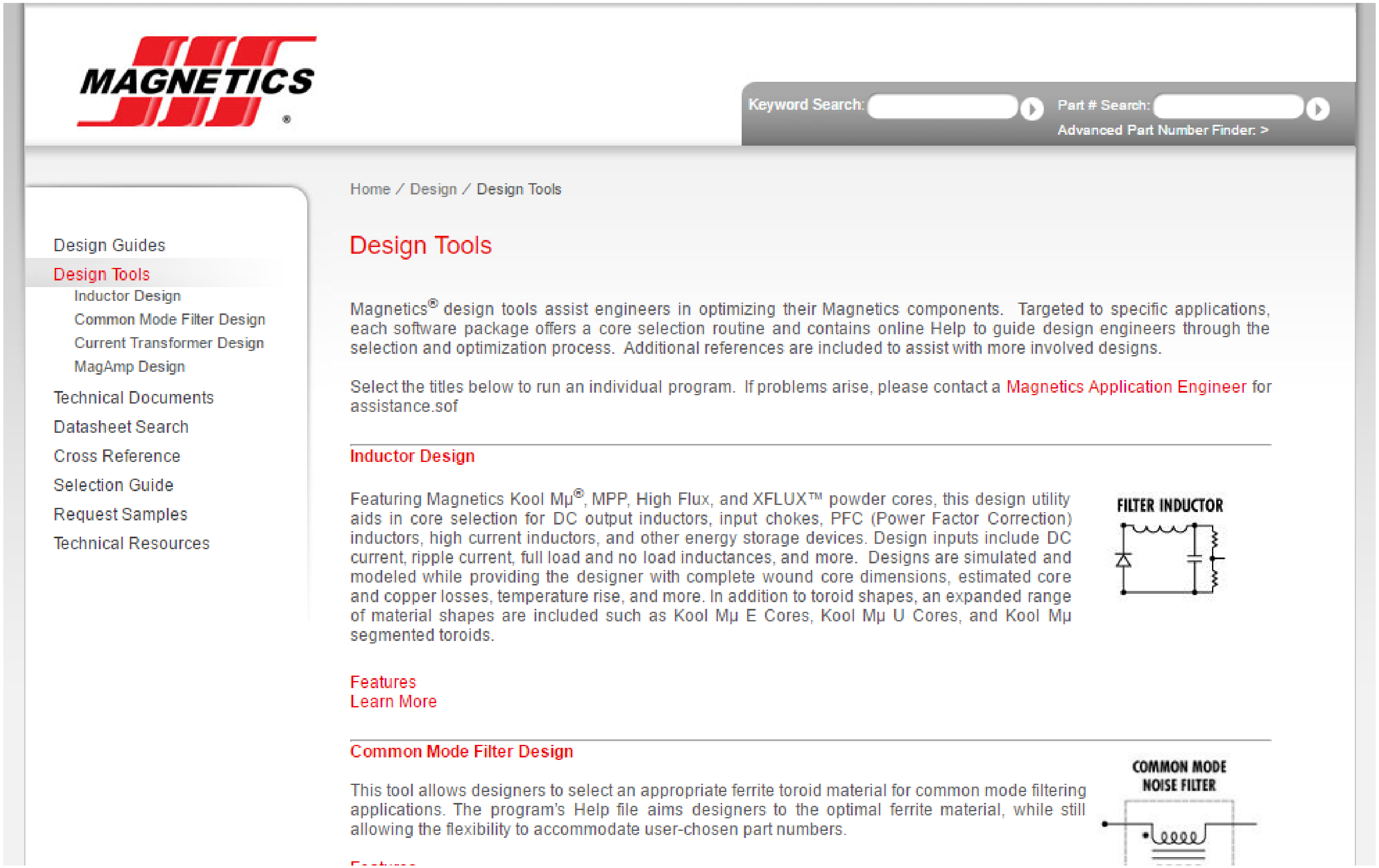
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

12) Cálculo do fator de ocupação:

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

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

Projeto de indutores



MAGNETICS®

Keyword Search: Part # Search:

Advanced Part Number Finder: >

Design Guides

Design Tools

Inductor Design

Common Mode Filter Design

Current Transformer Design

MagAmp Design

Technical Documents

Datasheet Search

Cross Reference

Selection Guide

Request Samples

Technical Resources

Home / Design / Design Tools

Design Tools

Magnetics® design tools assist engineers in optimizing their Magnetics components. Targeted to specific applications, each software package offers a core selection routine and contains online Help to guide design engineers through the selection and optimization process. Additional references are included to assist with more involved designs.

Select the titles below to run an individual program. If problems arise, please contact a Magnetics Application Engineer for assistance.sof

Inductor Design

Featuring Magnetics Kool Mµ®, MPP, High Flux, and XFLUX™ powder cores, this design utility aids in core selection for DC output inductors, input chokes, PFC (Power Factor Correction) inductors, high current inductors, and other energy storage devices. Design inputs include DC current, ripple current, full load and no load inductances, and more. Designs are simulated and modeled while providing the designer with complete wound core dimensions, estimated core and copper losses, temperature rise, and more. In addition to toroid shapes, an expanded range of material shapes are included such as Kool Mµ E Cores, Kool Mµ U Cores, and Kool Mµ segmented toroids.

FILTER INDUCTOR

Features

Learn More

Common Mode Filter Design

This tool allows designers to select an appropriate ferrite toroid material for common mode filtering applications. The program's Help file aims designers to the optimal ferrite material, while still allowing the flexibility to accommodate user-chosen part numbers.

COMMON MODE NOISE FILTER

http://www.mag-inc.com/design/design-tools

Projeto de indutores

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

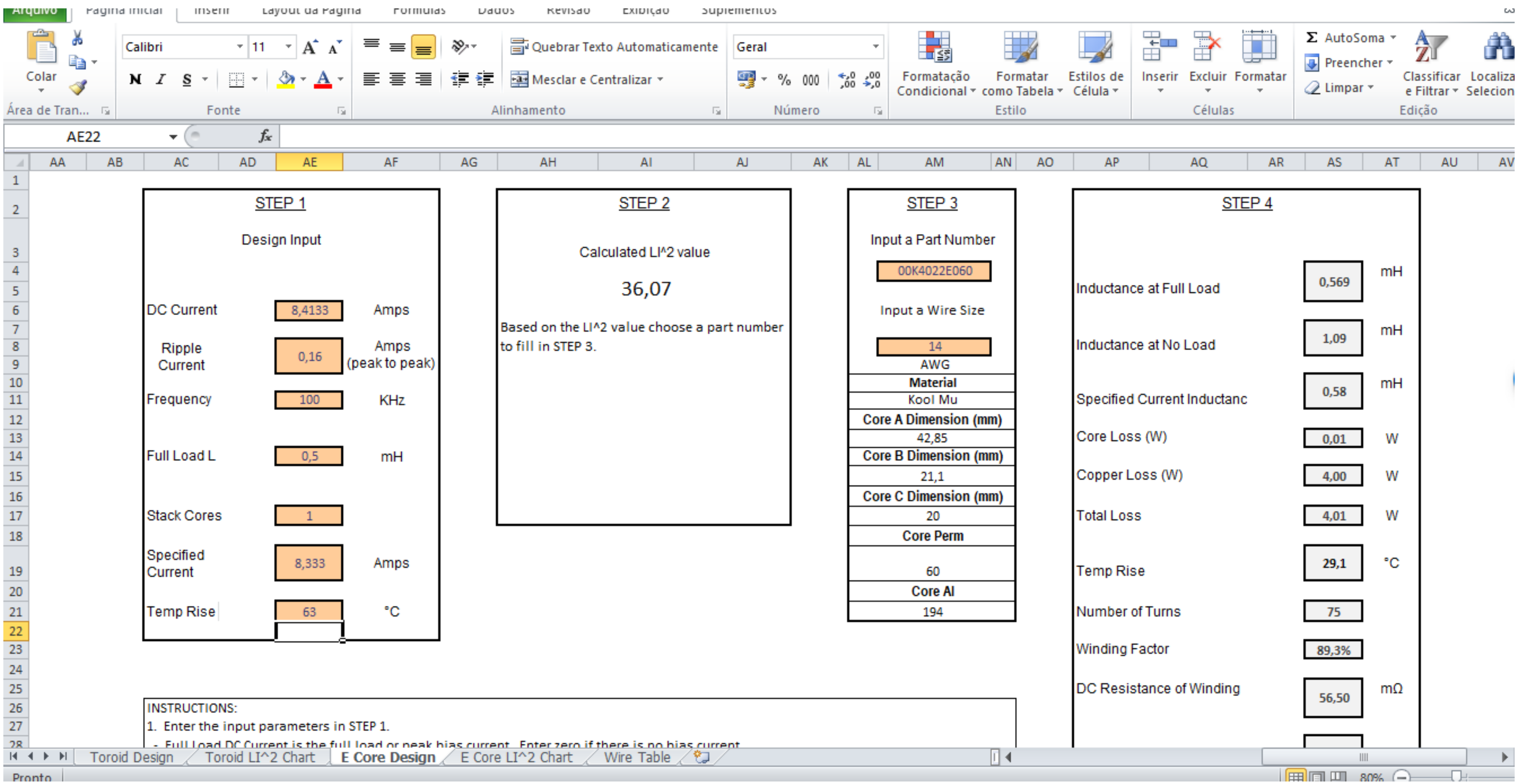
The DC Reactor Design Tool was created as a Design Tool, to assist you in your application Designs of:
Choke Design, High PowerHarmonic Filter Design, Power Factor Harmonic Filter Design, Input Inductor Design, DC Link Reactor Design, DC Link Filter.

Download the .EXE file

Download the ZIP File

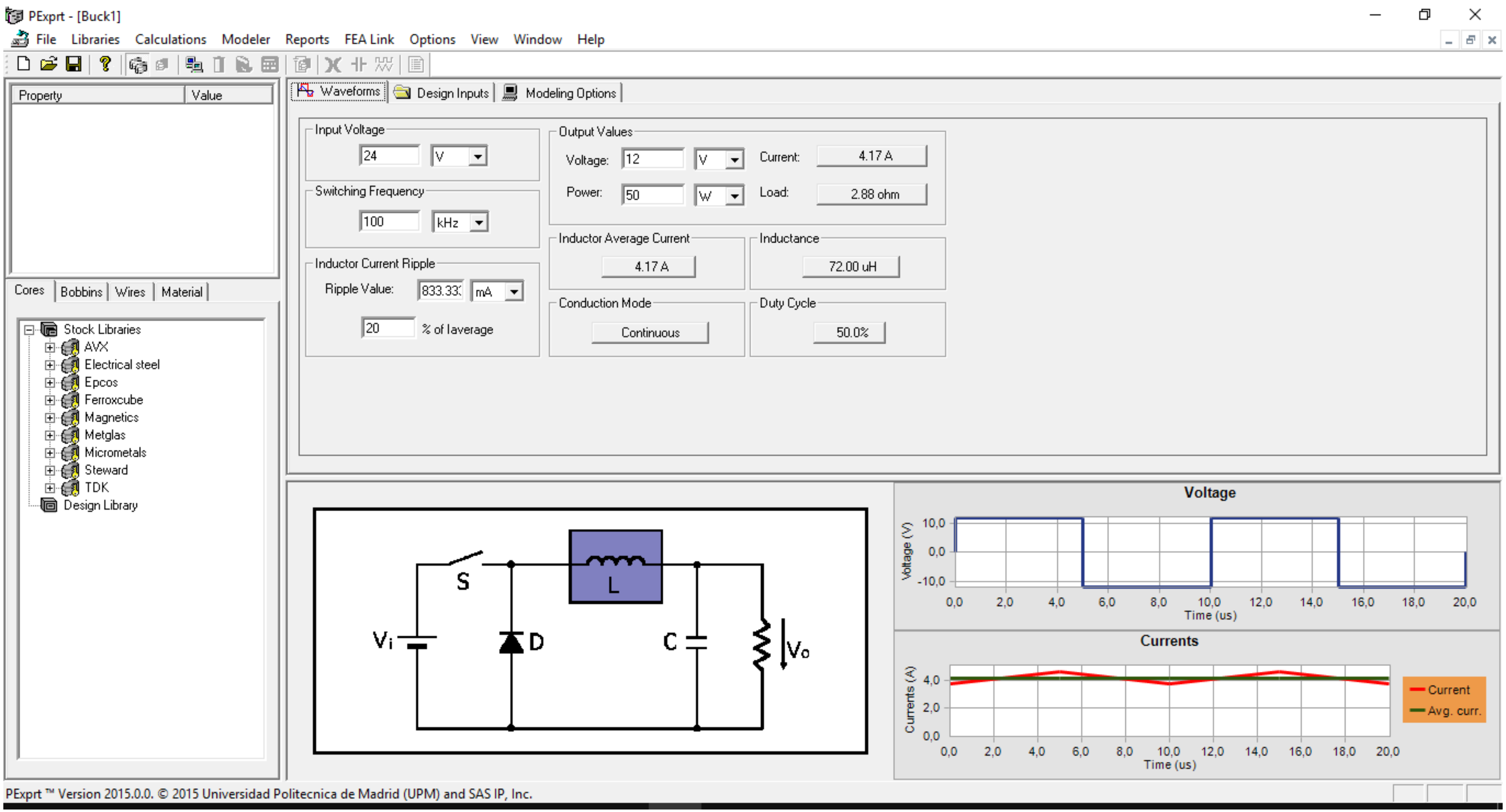
http://hitachimetals.metglas.com/

Projeto de indutores



Planilha no Excel: Fabricante Magnetics

Projeto de indutores



Software PExprt - ANSYS

Projetos de Elementos Magnéticos:

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

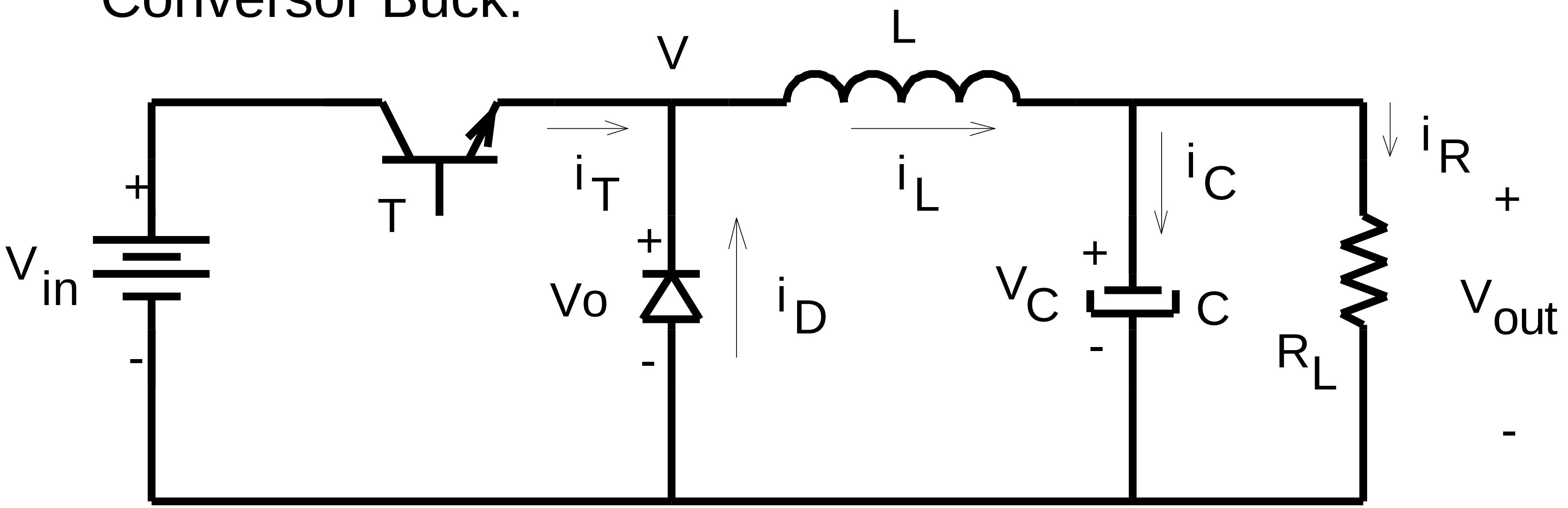
Projetos de Elementos Magnéticos:

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 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: ΔI=10% da corrente média
Capacitância C: 100 uF;
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