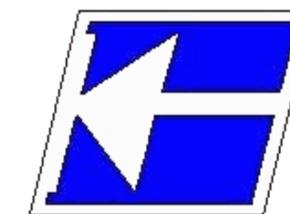




Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina  
Departamento Acadêmico de Eletrônica  
Eletrônica de Potência



# Conversores ca-ca

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, setembro de 2020.

# Curso Básico de Eletrônica de Potência

O material do curso está disponível em:

1. Moodle para os alunos matriculados na disciplina.
2. Página do professor.
3. Canal no youtube do professor.



<https://moodle.ifsc.edu.br>



[www.ProfessorPetry.com.br](http://www.ProfessorPetry.com.br)



<https://www.youtube.com>

## Esta aula está organizada em:

1. Introdução aos conversores ca-ca:
  - Introdução;
  - Comutação dos conversores ca-ca;
  - Princípio de funcionamento.
2. Conversores ca-ca básicos:
  - Conversor ca-ca com tiristores e controle por ângulo de fase;
  - Conversor ca-ca com tiristores e controle por ciclos inteiros;
  - Conversor ca-ca com transistores e modulação PWM.
3. Estabilizadores de tensão alternada:
  - Introdução;
  - Estabilizador de tensão com relés;
  - Estabilizador de tensão com tiristores;
  - Estabilizador de tensão transistores e modulação PWM.

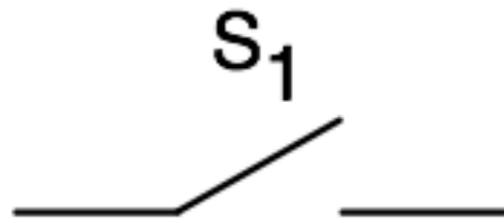


Os conversores ca-ca tem diversas aplicações, como por exemplo, na alimentação de cargas sensíveis.

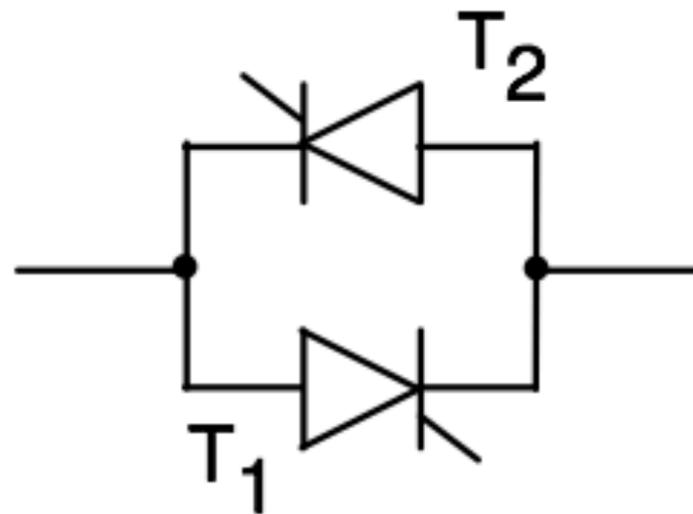


# Introdução aos conversores ca-ca

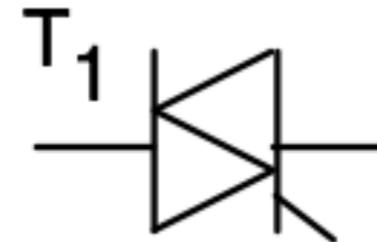
## Interruptores para conversores ca-ca



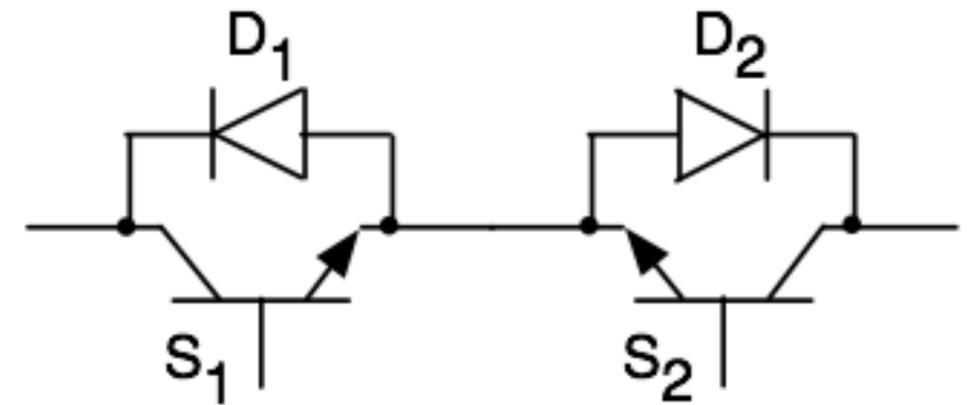
chave ideal



SCRs



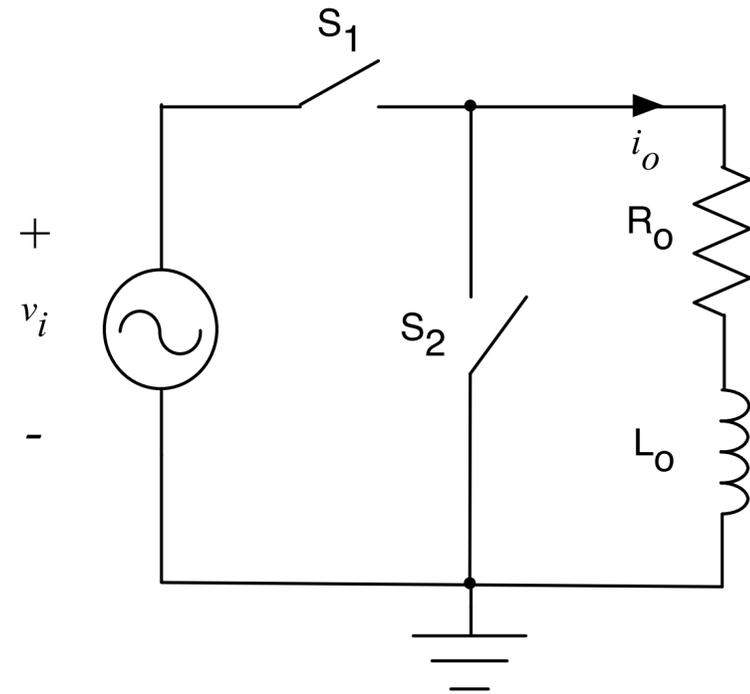
TRIAC



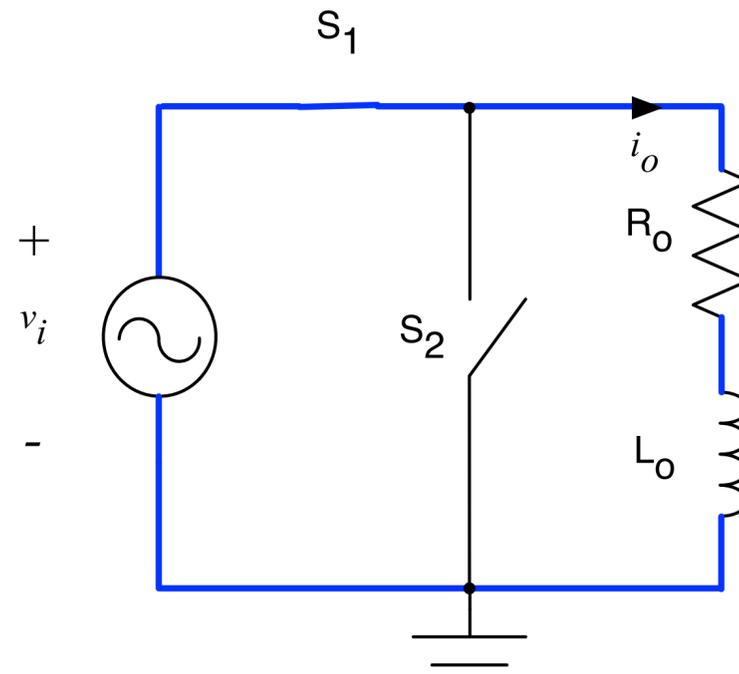
transistores

# Introdução aos conversores ca-ca

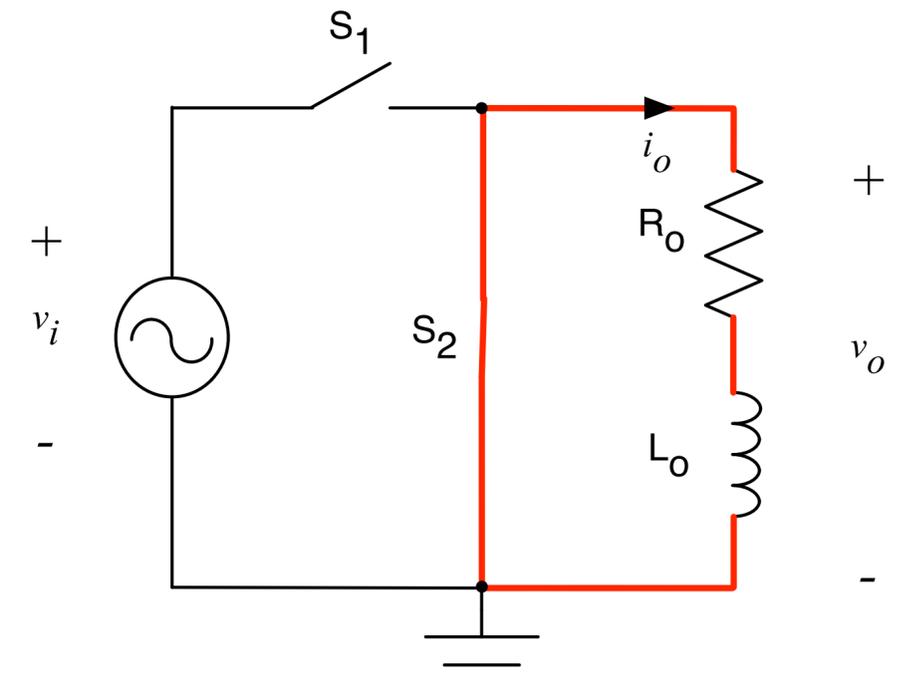
## Comutação dos conversores ca-ca



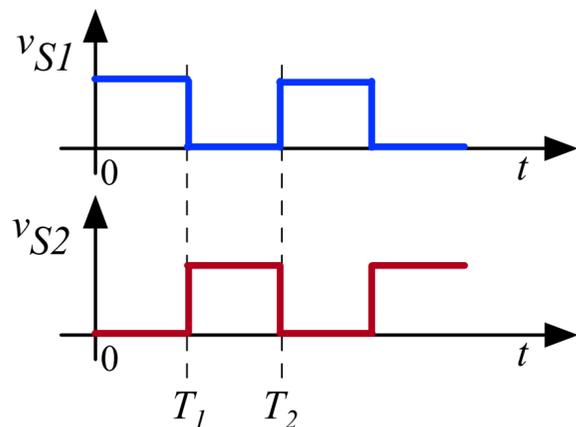
Circuito exemplo



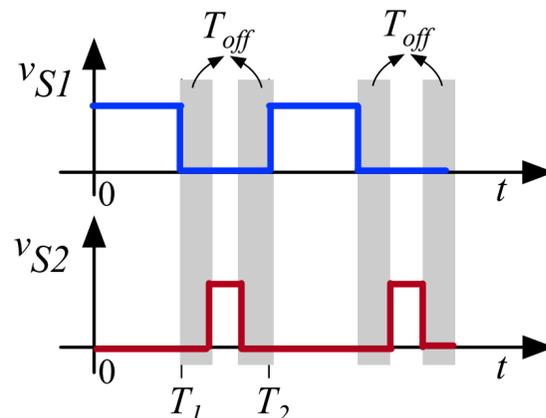
Primeira etapa



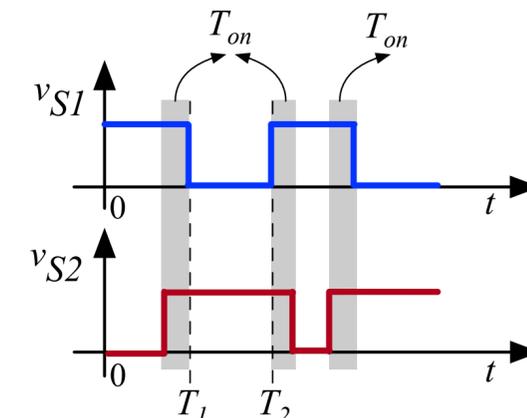
Segunda etapa



Sinais de comando - circuito ideal



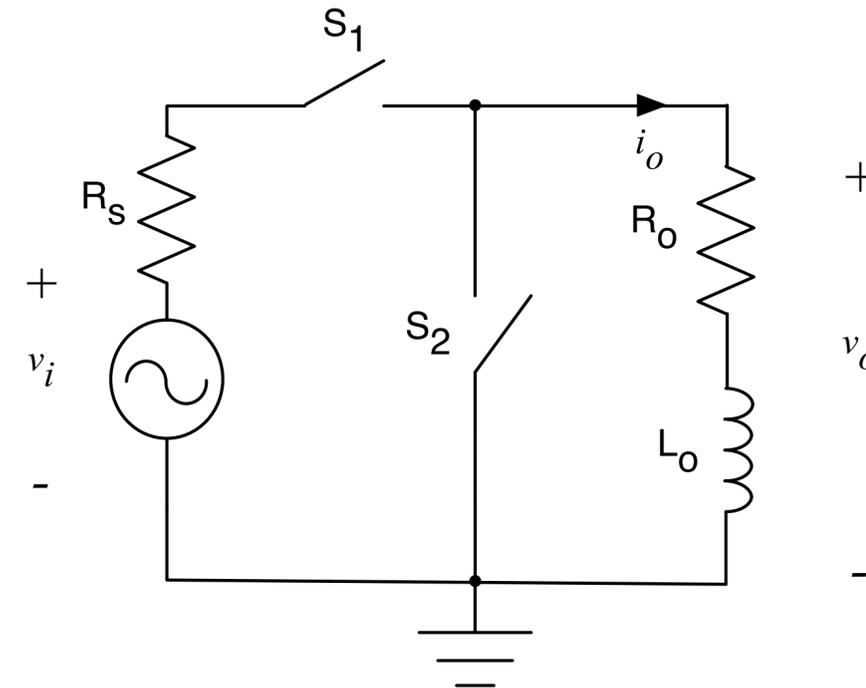
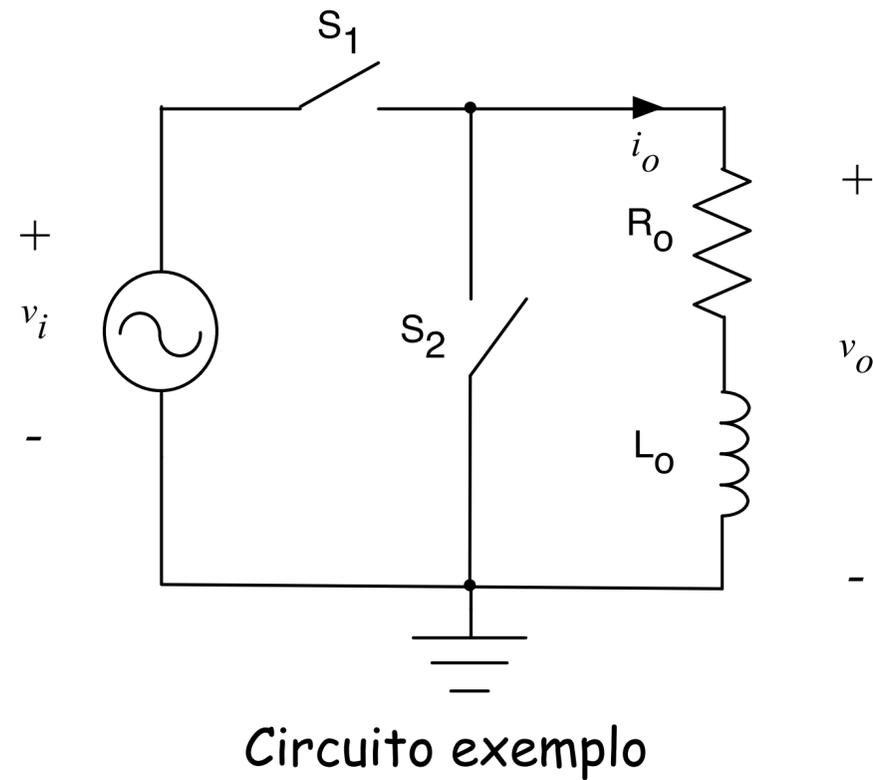
Tempo morto



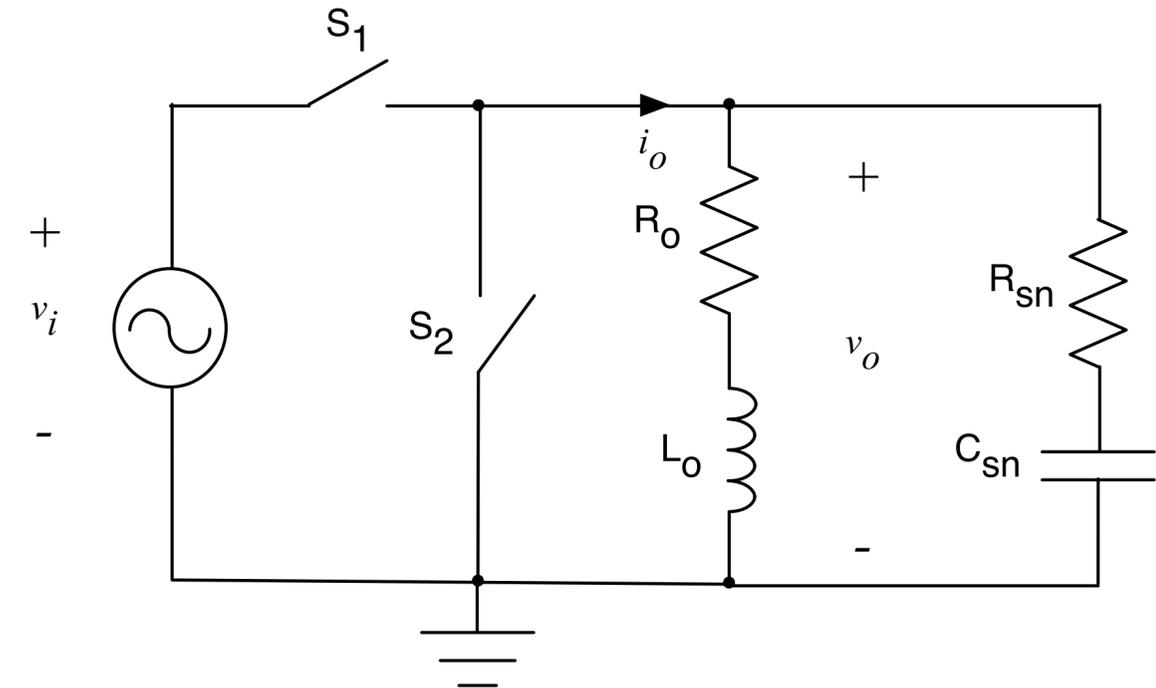
Sobreposição

# Introdução aos conversores ca-ca

## Comutação dos conversores ca-ca



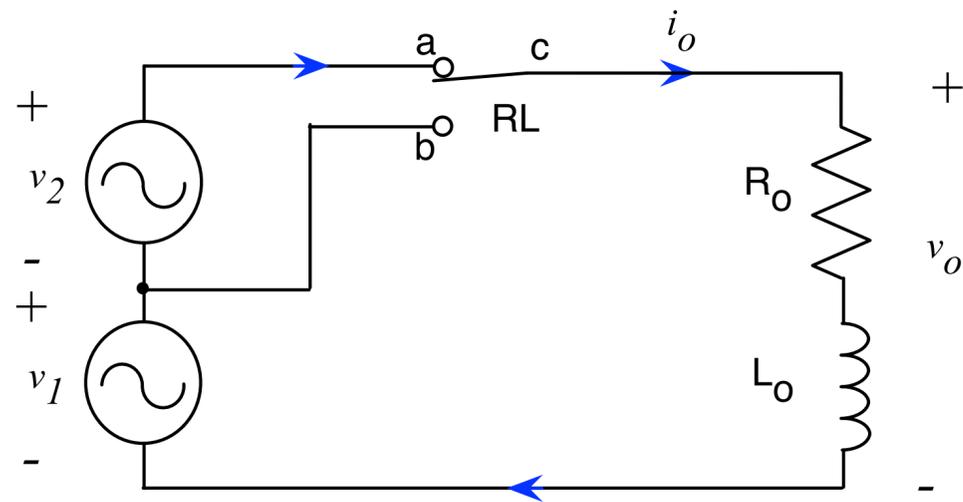
Limitação da corrente de curto-circuito  
Sobreposição dos sinais de comando



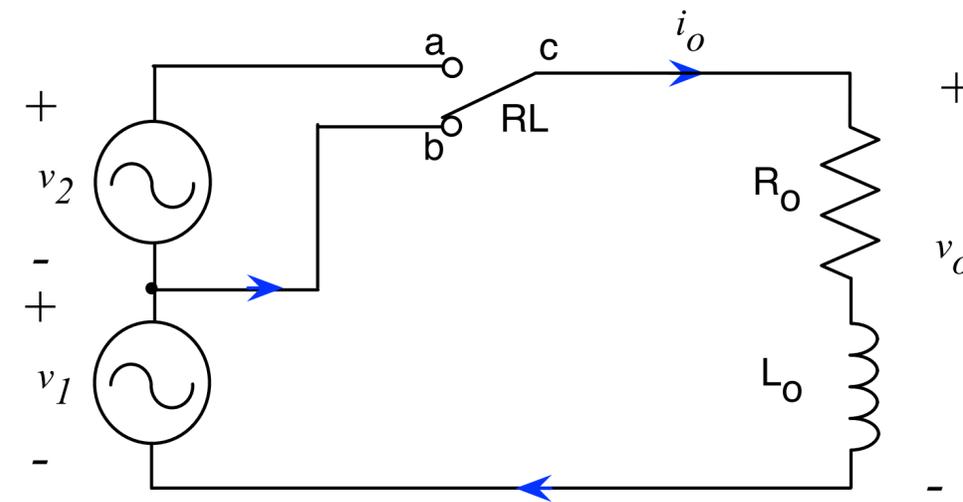
Limitação da sobretensão  
Tempo morto entre sinais de comando

# Introdução aos conversores ca-ca

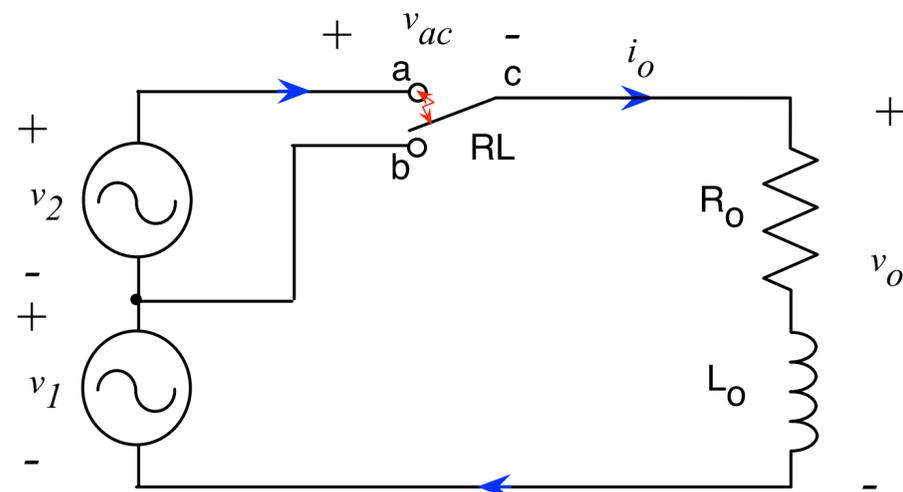
## Comutação dos conversores com relés



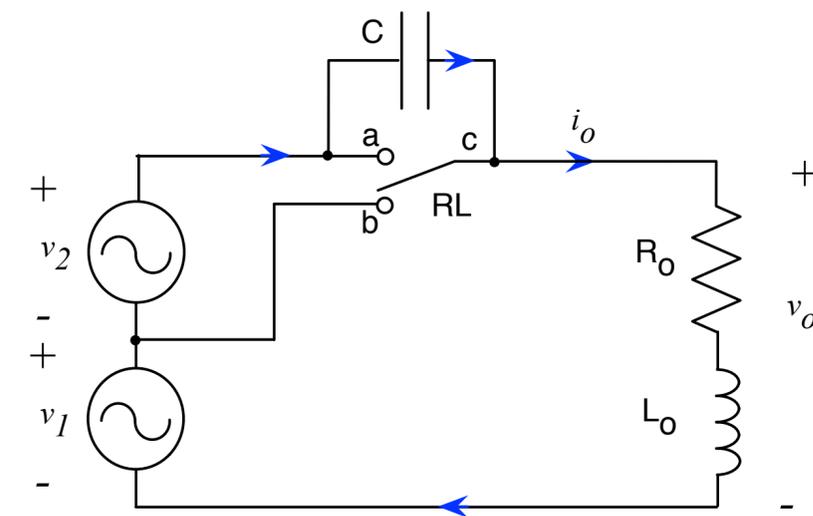
Primeira etapa



Segunda etapa



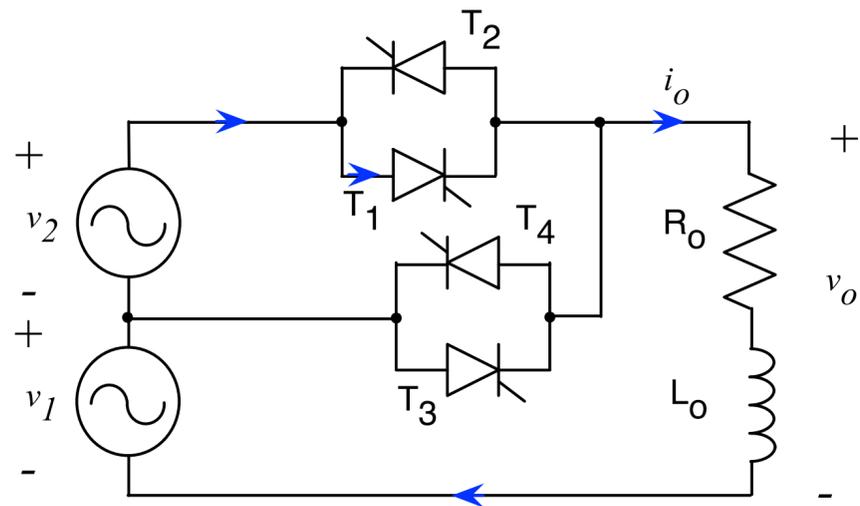
Abertura dos contatos e arco-elétrico



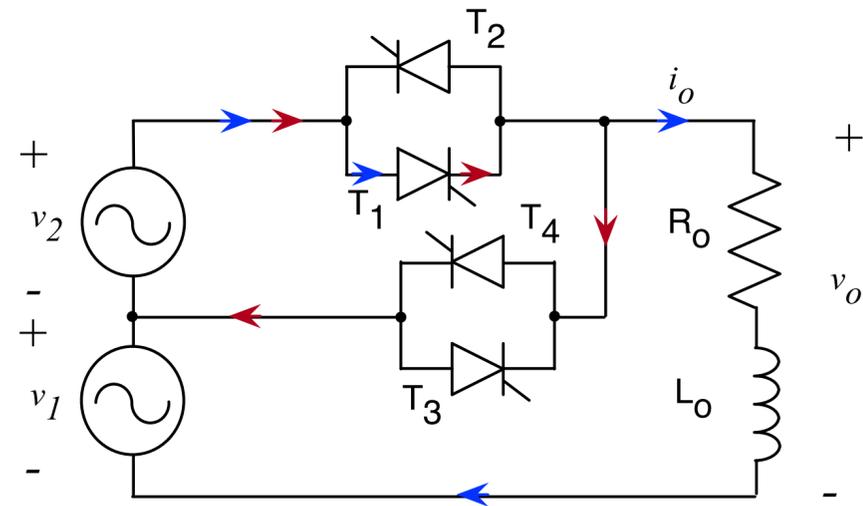
Capacitor para auxiliar na comutação

# Introdução aos conversores ca-ca

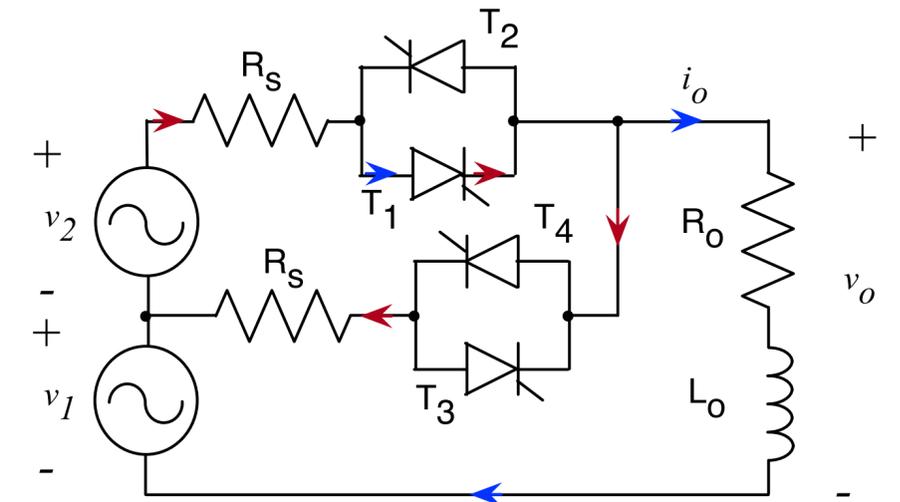
## Comutação dos conversores com tiristores



Circuito exemplo



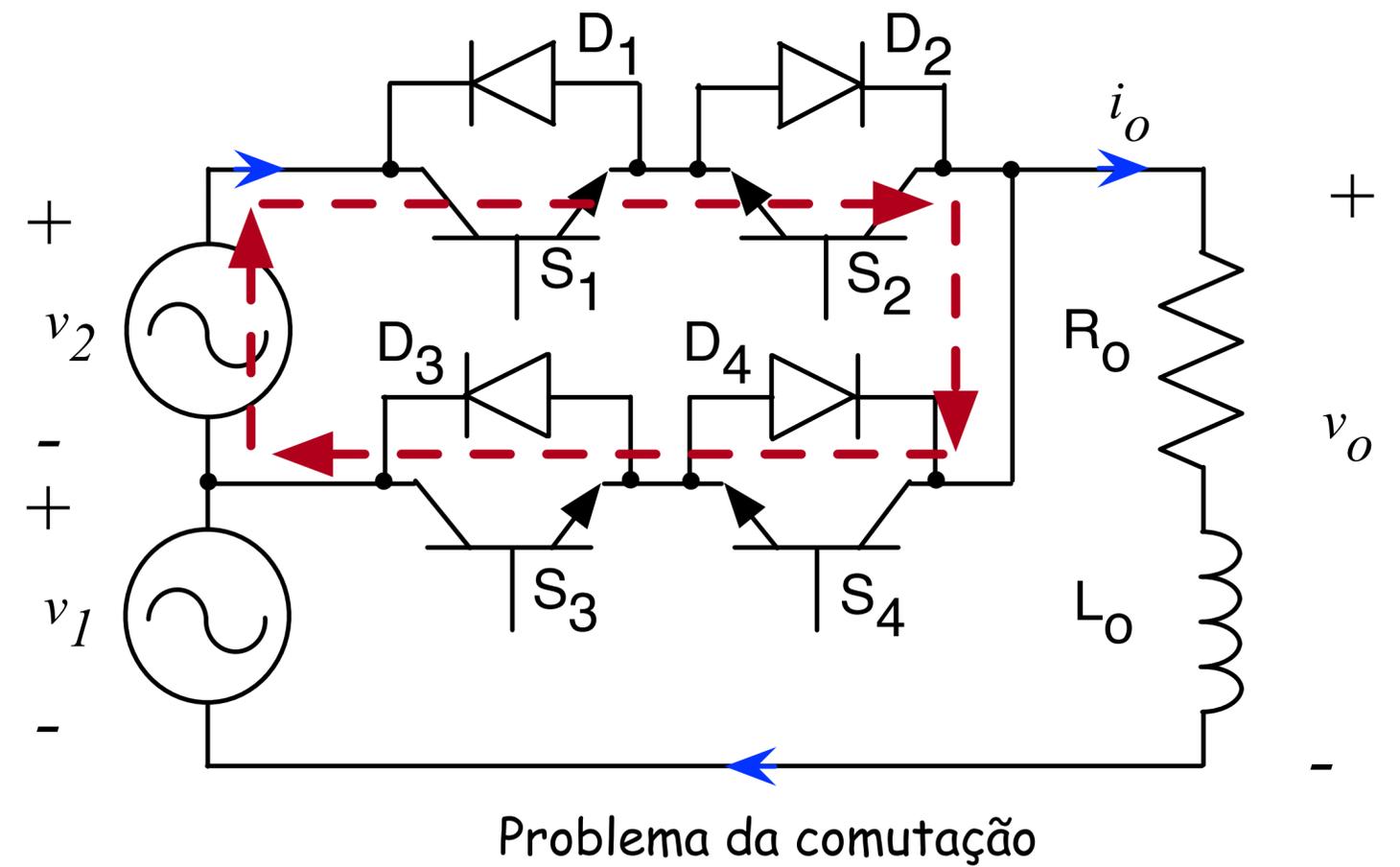
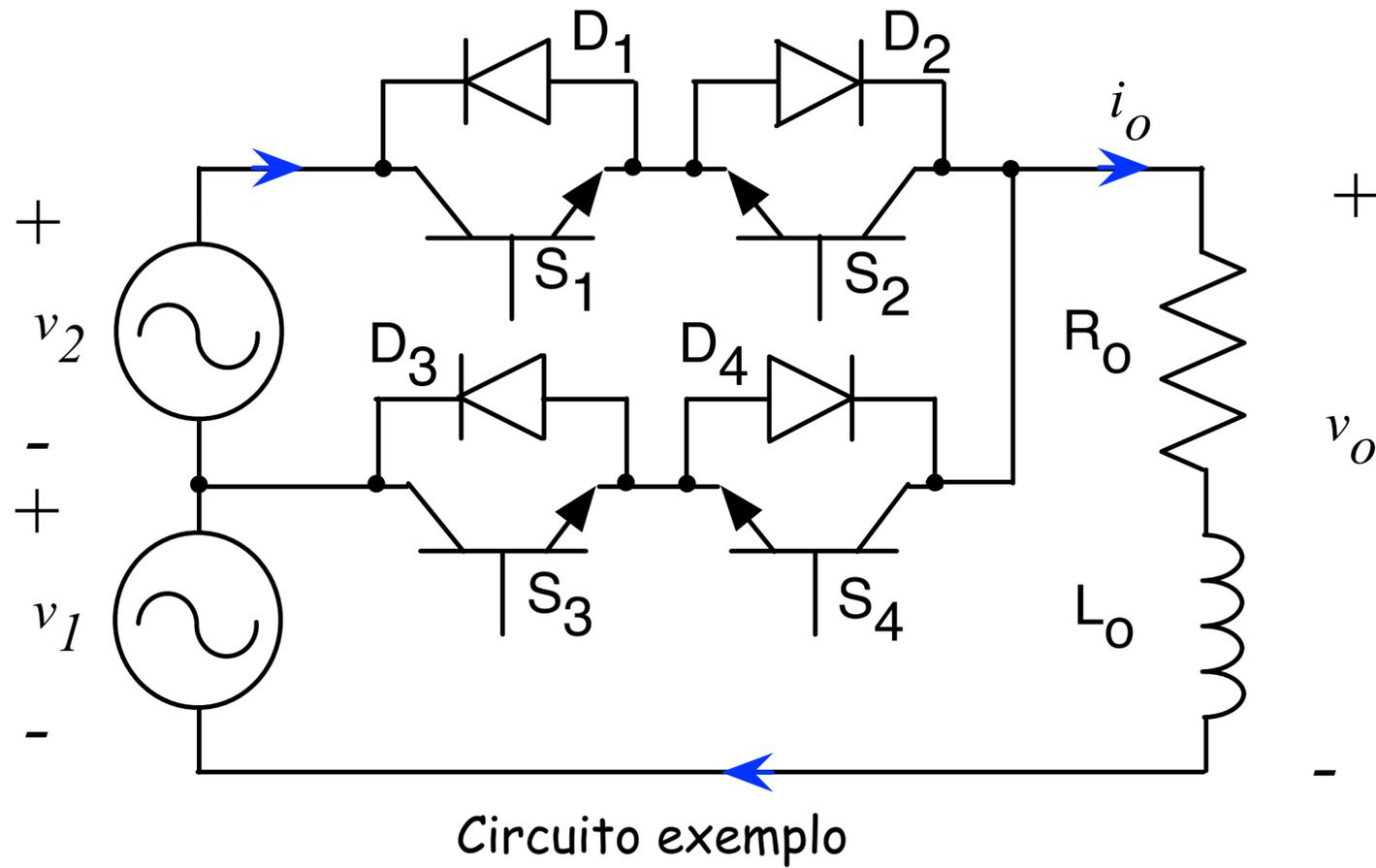
Curto-circuito durante a comutação



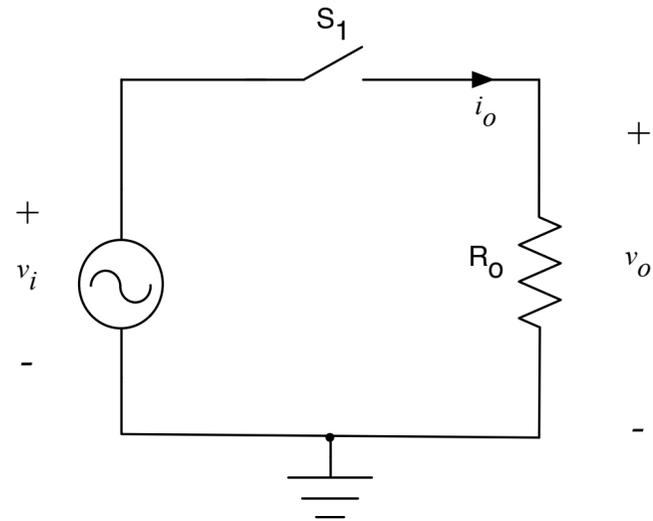
Resistores série para limitar a corrente de curto-circuito

# Introdução aos conversores ca-ca

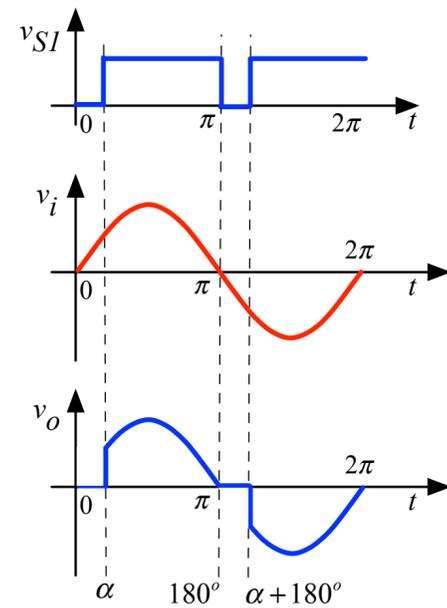
## Comutação dos conversores com transistores



# Princípio de funcionamento

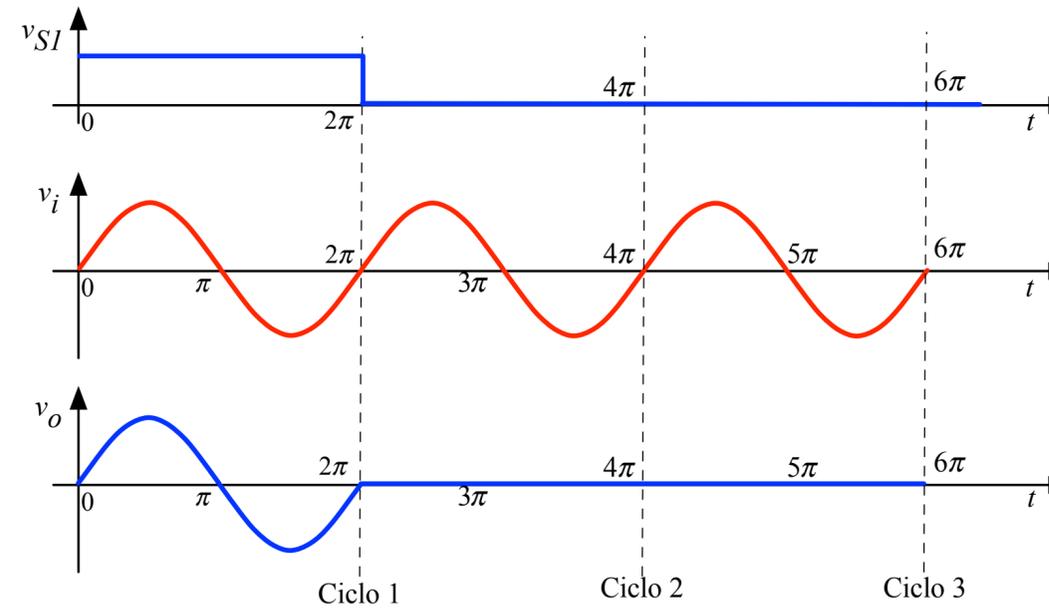


Conversor ca-ca simples

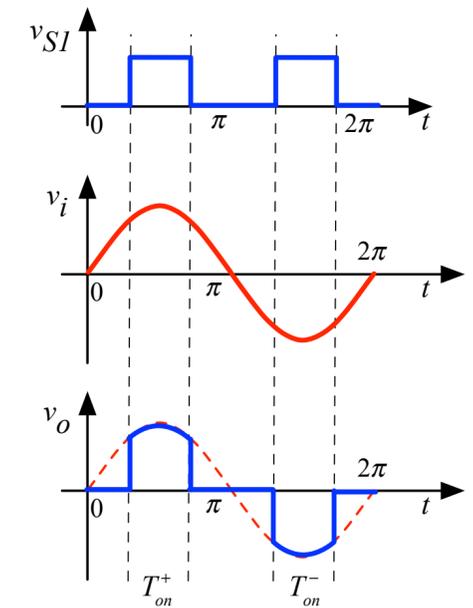


Controle por ângulo de fase

## Principais formas de onda



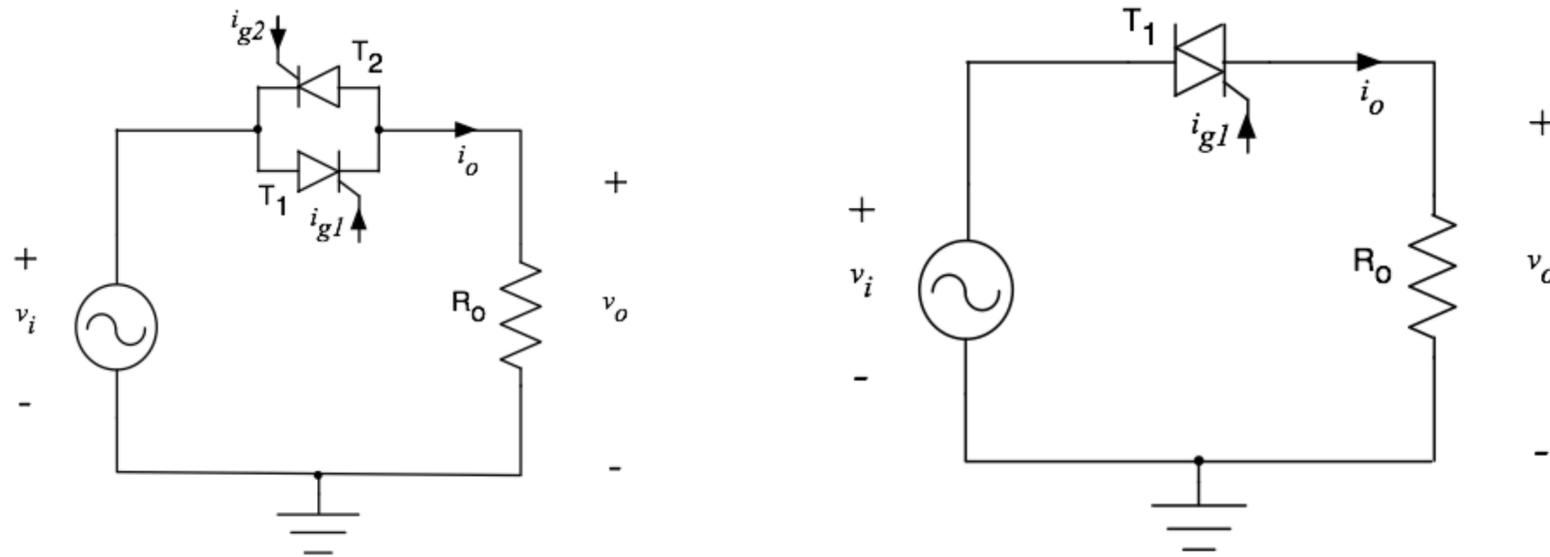
Controle por ciclos inteiros



Modulação PWM

# Conversores CA-CA

## Conversores com tiristores - controle por ângulo de fase



Conversores ca-ca com tiristores

$$v_{i(t)} = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t \pm \phi)$$

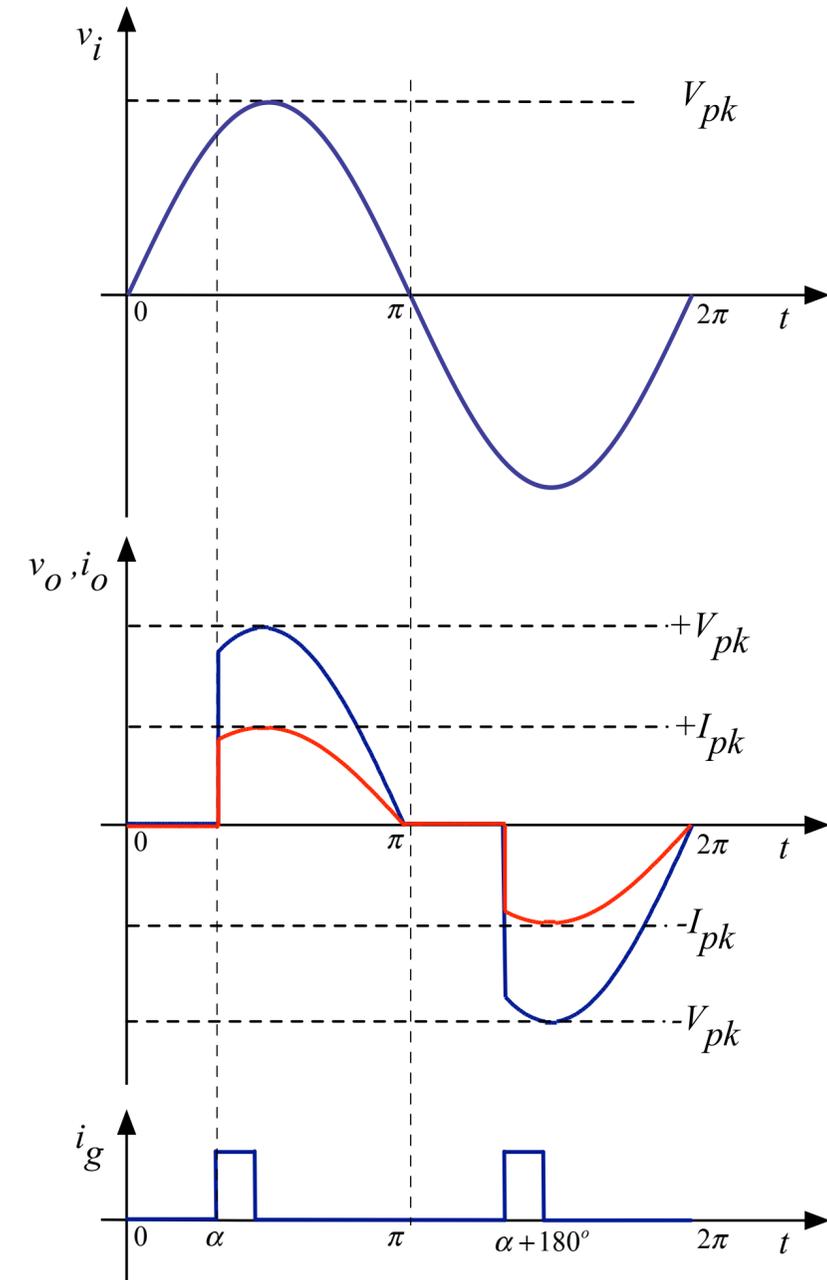
$$V_{i(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{tensão eficaz}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot F \text{ [rad / s]} \rightarrow \text{frequência angular}$$

$\phi \rightarrow$  ângulo de defasagem

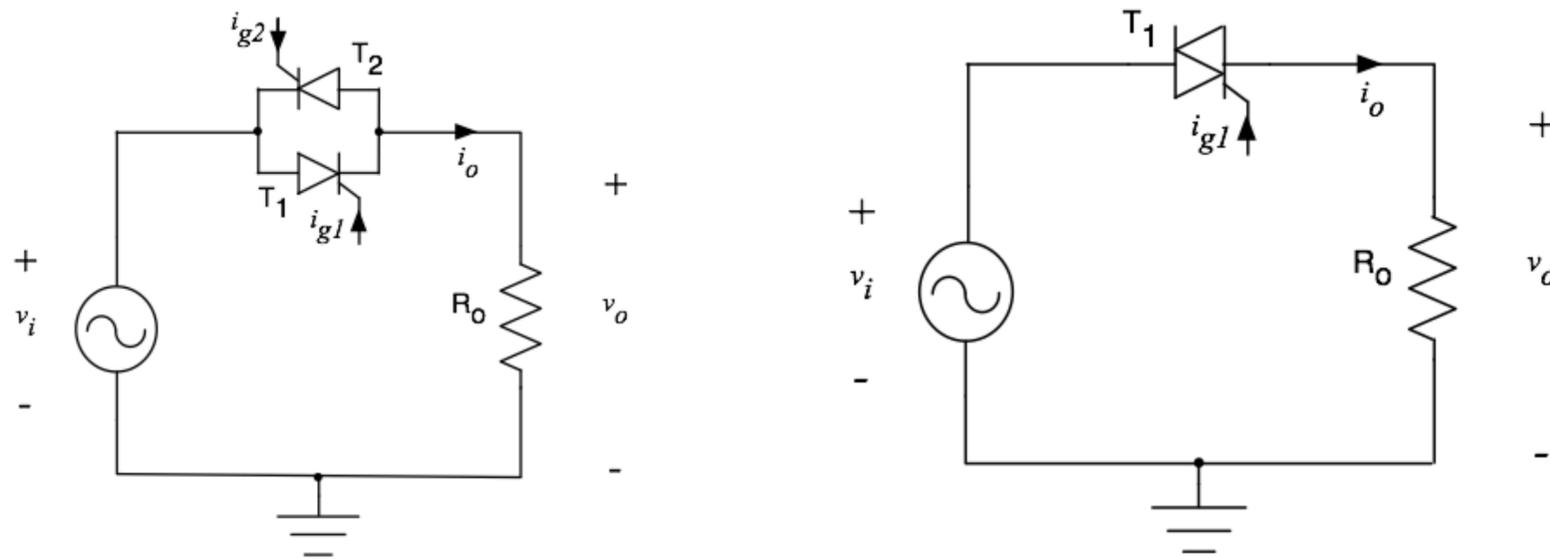
$$V_{o(pk)} = \begin{cases} V_{i(pk)} & \rightarrow 0 \leq \alpha \leq 90^\circ \\ V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\alpha) & \rightarrow 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases}$$

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{seno}(2 \cdot \alpha)}{2 \cdot \pi}}$$



# Conversores CA-CA

## Conversores com tiristores - controle por ciclos inteiros

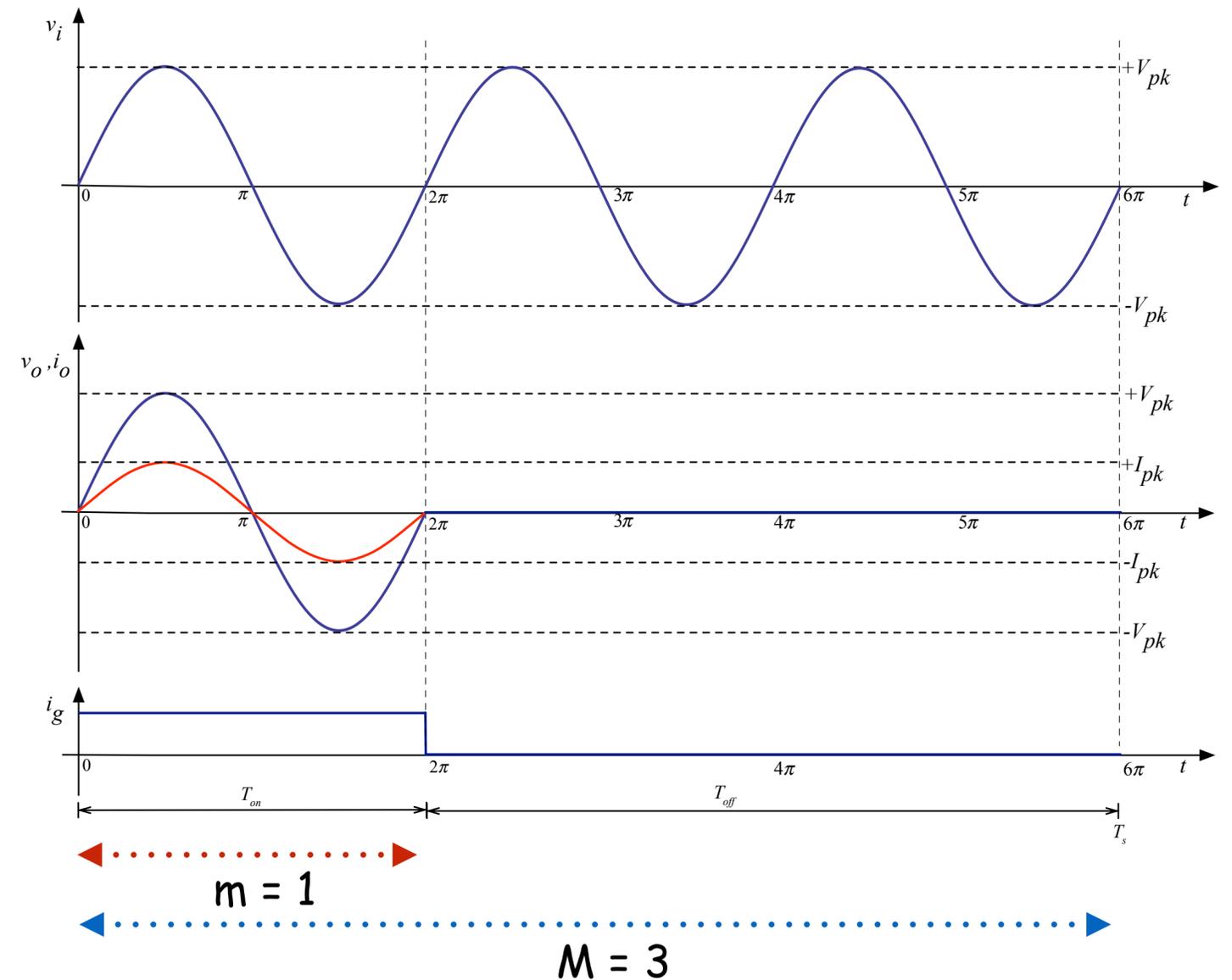


Conversores ca-ca com tiristores

$$v_{i(t)} = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t \pm \phi)$$

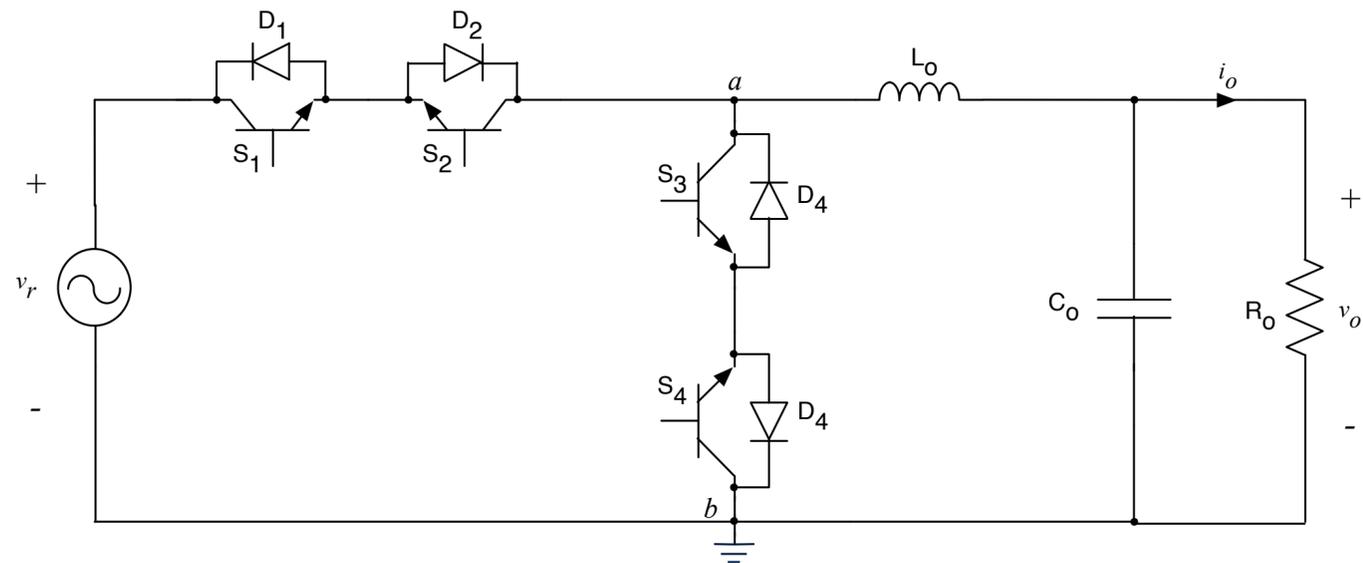
$$V_{i(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{tensão eficaz}$$

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{\frac{m}{M}}$$



# Conversores CA-CA

## Conversores com transistores - modulação PWM

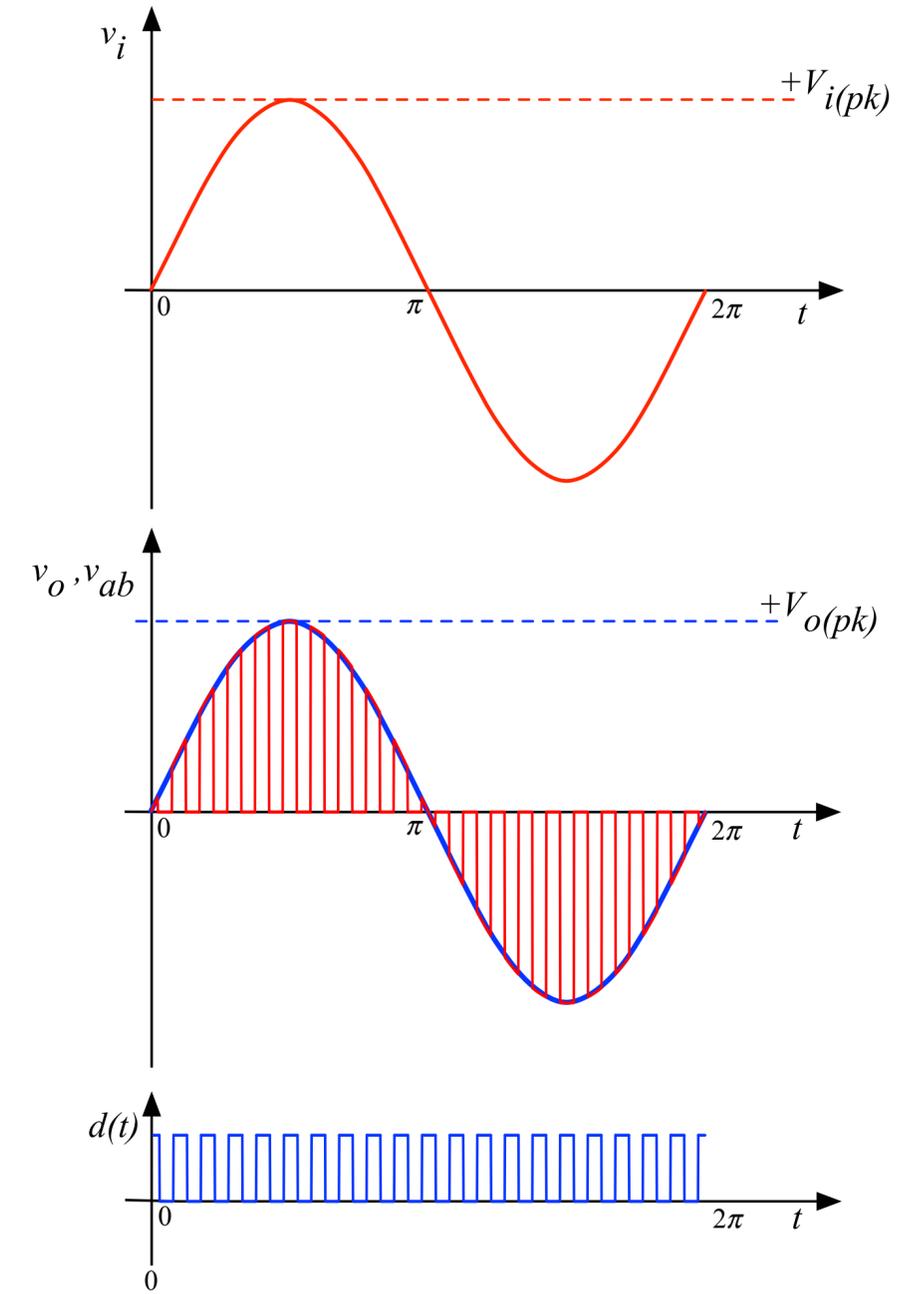


Conversor Buck ca-ca

$$v_{i(t)} = V_{i(pk)} \cdot \text{seno}(\omega \cdot t \pm \phi)$$

$$V_{i(ef)} = \frac{V_{i(pk)}}{\sqrt{2}} \rightarrow \text{tensão eficaz}$$

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot D$$



# Estabilizadores de Tensão Alternada

## Introdução:

- Aplicações dos estabilizadores de tensão alternada:
  - Alimentação de cargas sensíveis em laboratórios, hospitais, indústrias, equipamentos de informática, equipamentos de telecomunicações, etc;
  - Condicionadores de tensão;
  - Pré-estabilização em fontes de alimentação e UPS;
  - Economia de energia;
  - Sistemas de potência;
  - Proteção de cargas de alto valor (sistemas de som e vídeo, por exemplo);
  - Energias alternativas;
  - Entre outras.
- Faixas de tensão conforme Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST 2010 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica):
  - Adequada: tensão da rede entre 202 V e 231 V;
  - Precária: tensão entre 191 V e 202 V ou entre 231 V e 233 V;
  - Crítica: tensão abaixo de 191 V ou acima de 233 V.



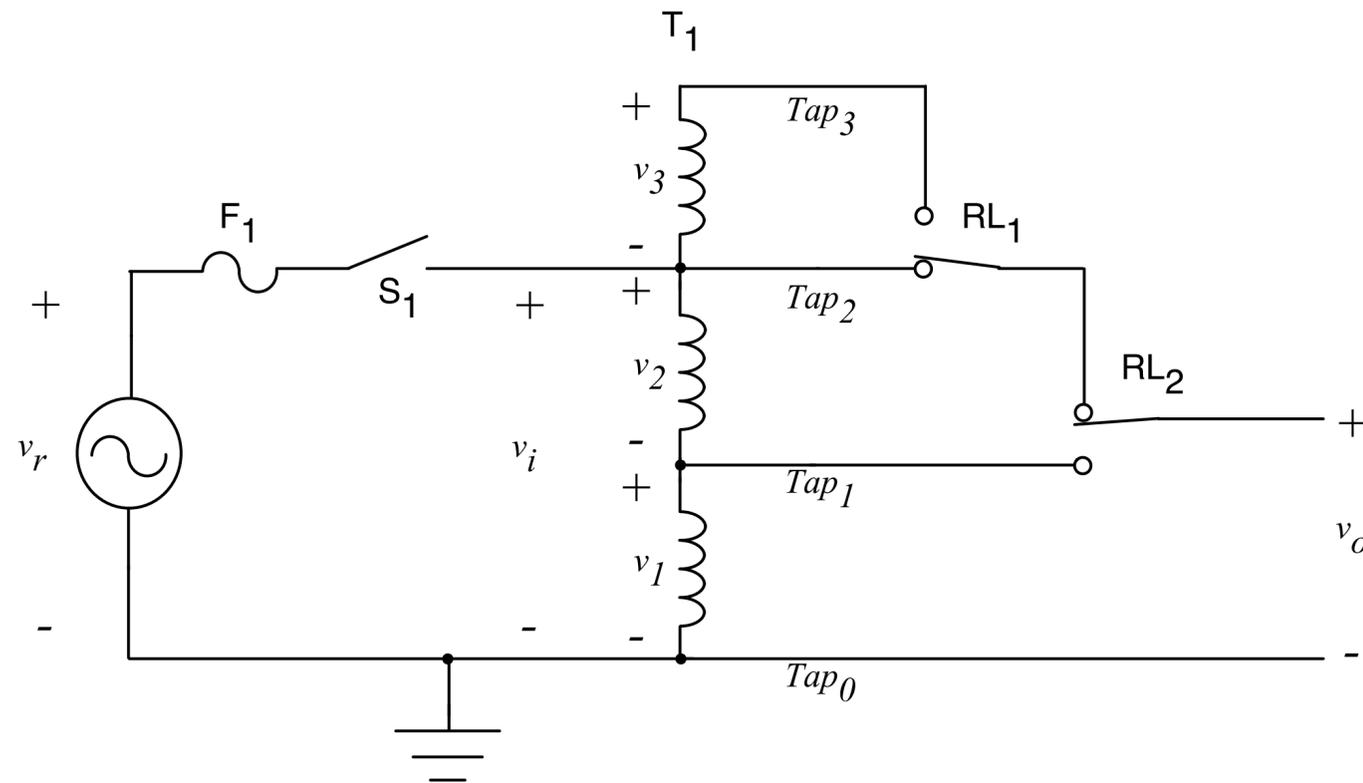
<https://www.se.com>



<https://www.engeblu.com.br>

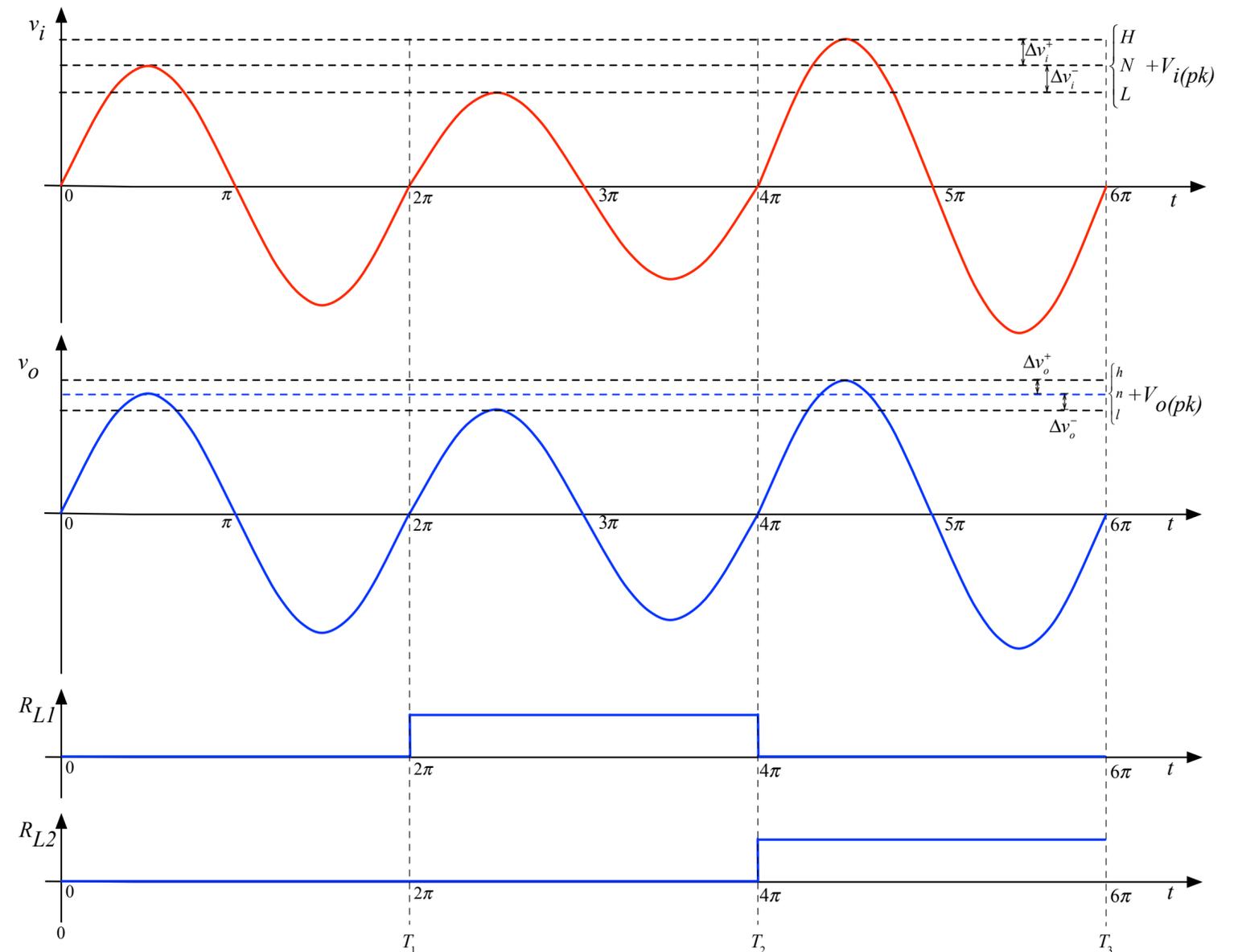
# Estabilizadores de Tensão Alternada

## Estabilizador de tensão alternada com relés



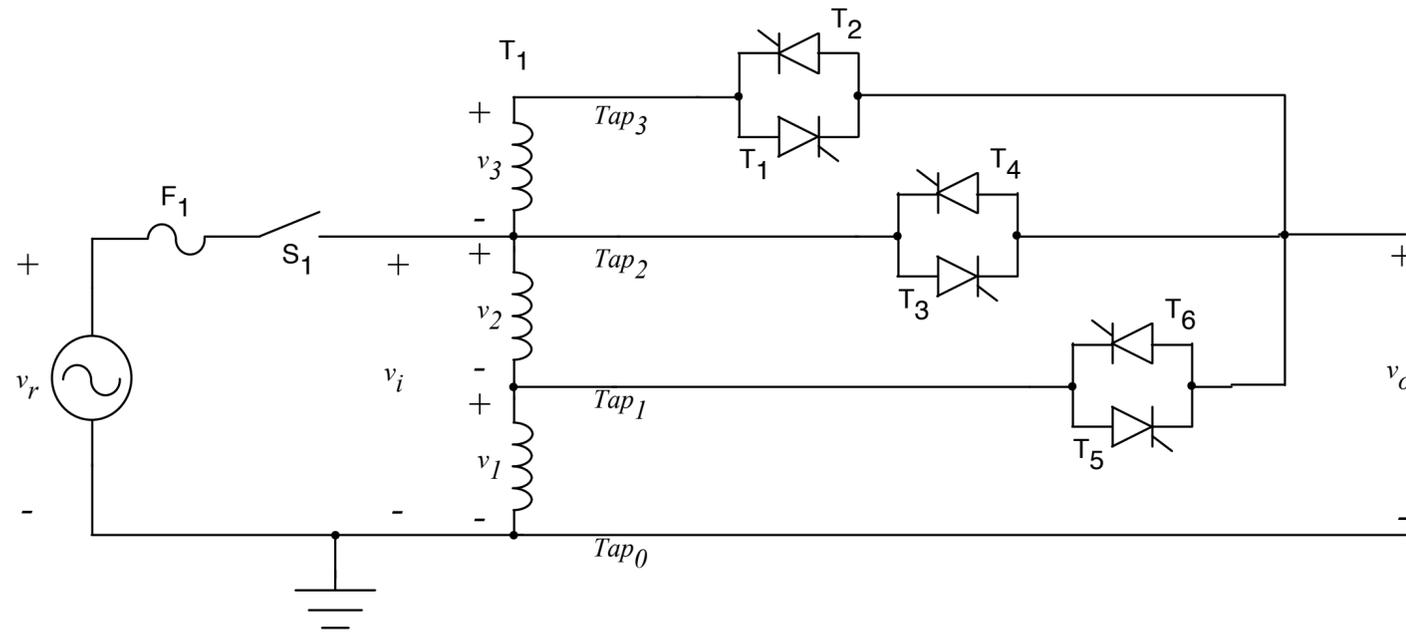
Estabilizador com tap variável

$$v_o = \begin{cases} v_o = v_i \rightarrow R_{L1} \text{ e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i + v_3 \rightarrow R_{L1} \text{ on e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i - v_2 \rightarrow R_{L1} \text{ off e } R_{L2} \text{ on} \end{cases}$$



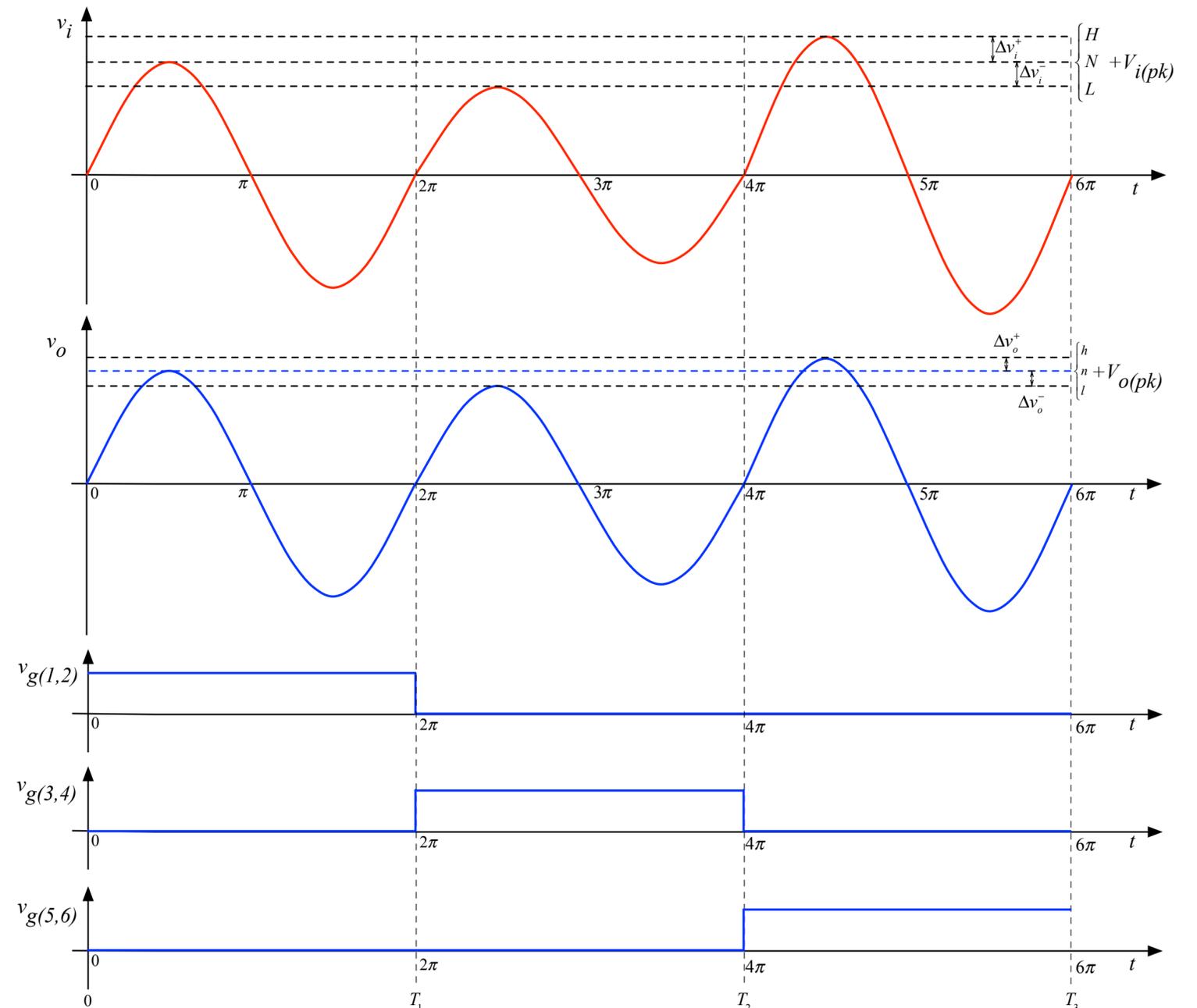
# Estabilizadores de Tensão Alternada

## Estabilizador de tensão alternada com tiristores



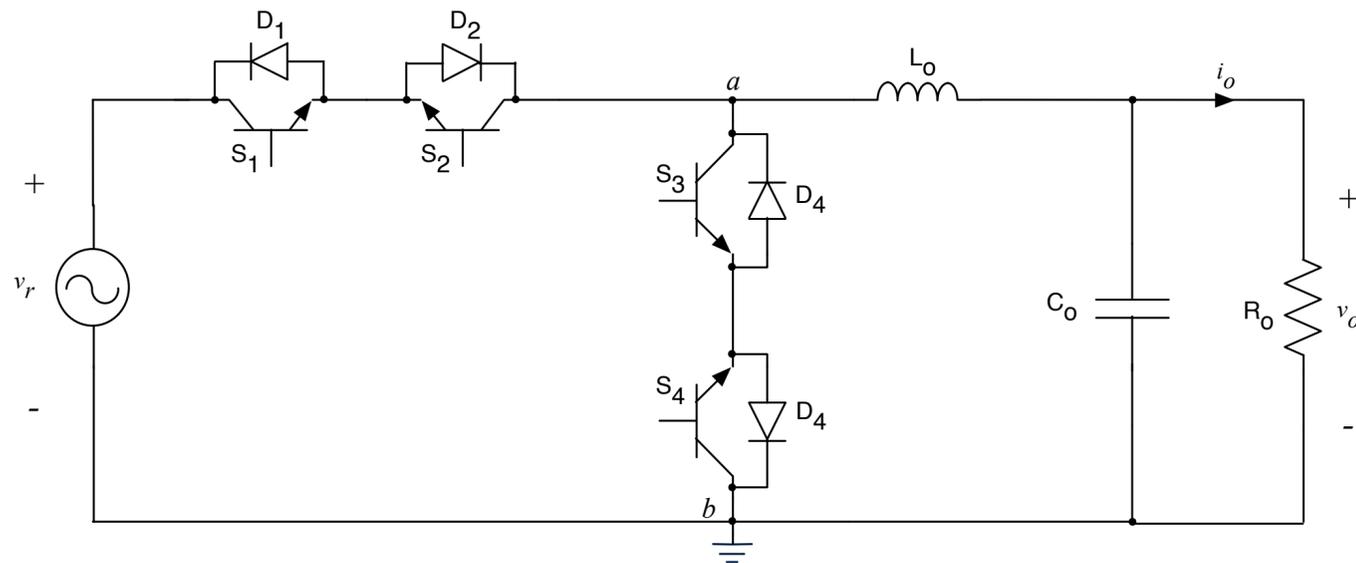
Estabilizador com tap variável

$$v_o = \begin{cases} v_o = v_i \rightarrow T_3 \text{ e } T_4 \text{ on} \\ v_o = v_i + v_3 \rightarrow T_1 \text{ e } T_2 \text{ on} \\ v_o = v_i - v_2 \rightarrow T_5 \text{ e } T_6 \text{ on} \end{cases}$$



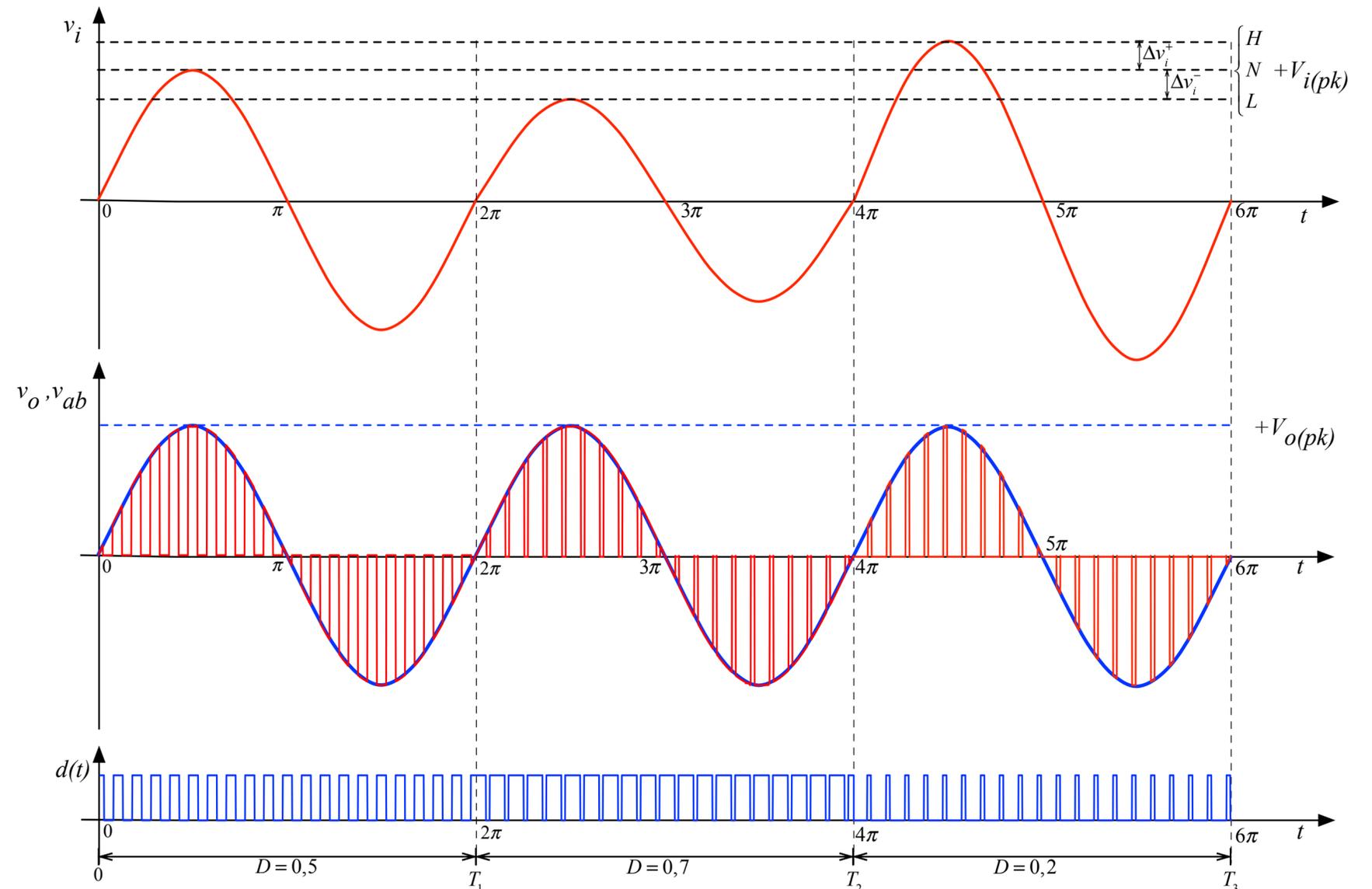
# Estabilizadores de Tensão Alternada

## Estabilizador de tensão alternada com transistores



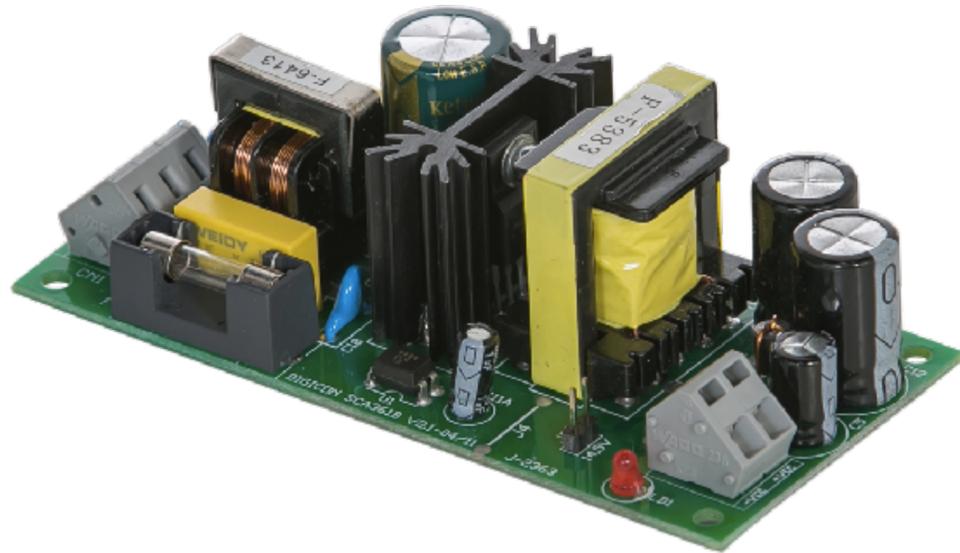
Conversor Buck ca-ca

$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot D$$



# Próxima Aula

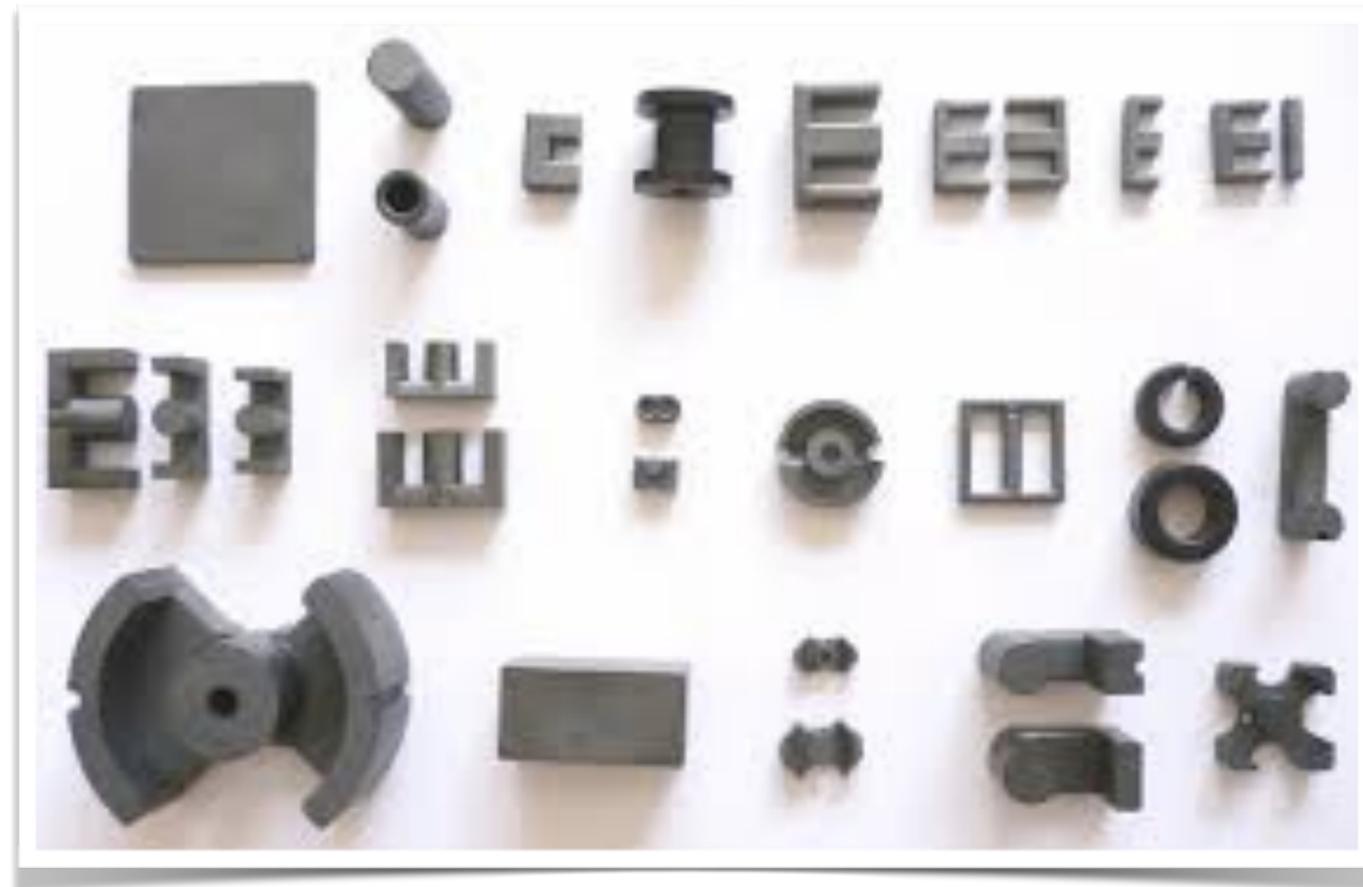
## Projeto de elementos magnéticos



<http://www.cebra.com.br>



<http://www.magmatec.com.br>



<https://www.thornton.com.br>