

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Eletrônica de Potência



Conversores CA-CA

Parte 1

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, novembro de 2025.

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>



ProfessorPetry
Conhecimento para uma vida plena

PRINCIPAL PROJETO PUBLICAÇÕES CONTATO

Bem vindo ao Website pessoal de Clovis Antonio Petry

O objetivo desta página é a divulgação de informações sobre eletrônica, em especial eletrônica de potência. Todos os materiais disponibilizados podem ser livremente utilizados, desde que citados os autores. As disciplinas do semestre corrente podem ser acessadas clicando na imagem da esquerda abaixo. Material didático pode ser encontrado clicando na imagem da direita abaixo.

Eventos

Outubro, 2020
SNCT 2020
Semana Nacional de Ciência e Tecnologia 2020, Florianópolis, SC.
[Acesse...](#)

Setembro, 2020
COBENGE 2020
XLVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE) e III Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE, Bento Gonçalves, RS. [Acesse...](#)

www.ProfessorPetry.com.br



<https://www.youtube.com>

Agenda

Conversores ca-ca:

- Introdução aos conversores ca-ca;
- Comutação dos conversores ca-ca;
- Princípio de funcionamento.
- 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.



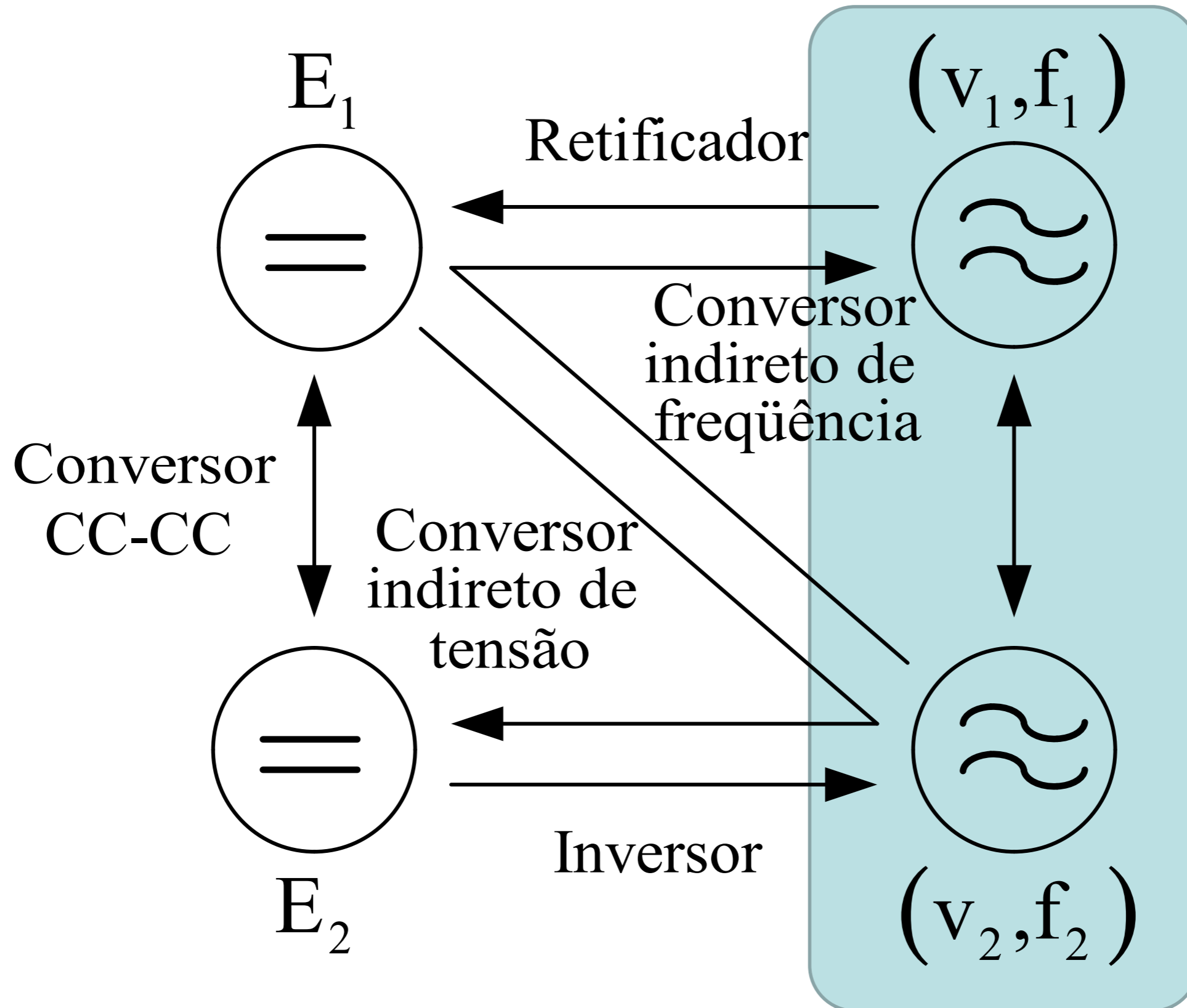
Motivação

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

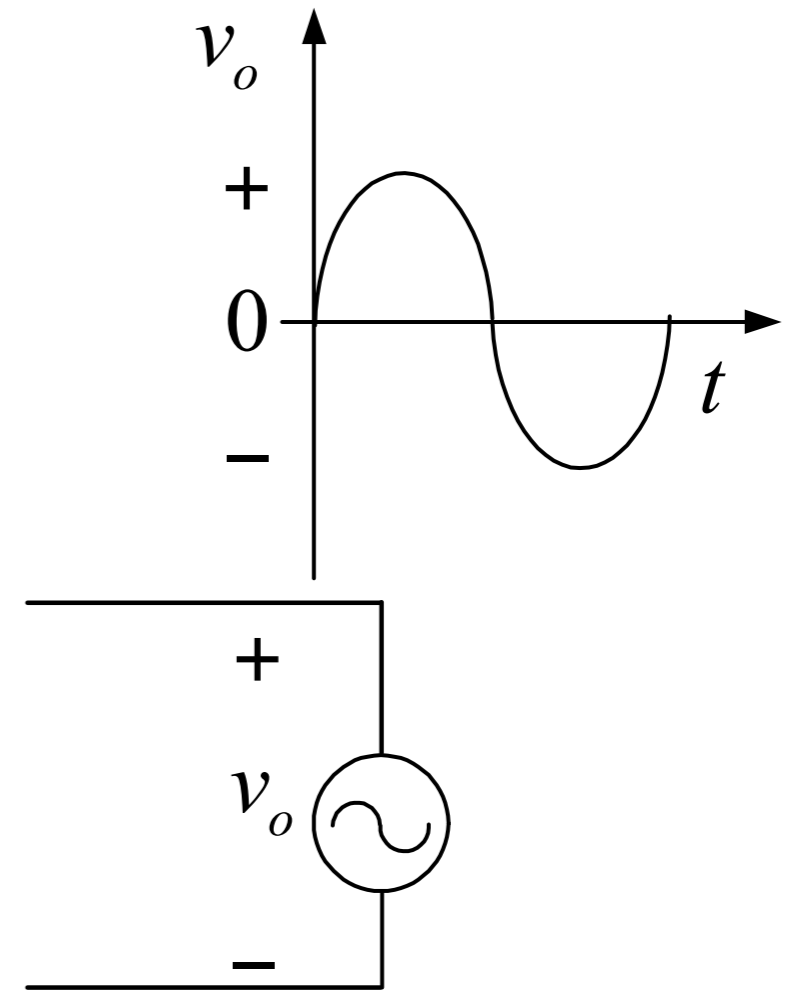
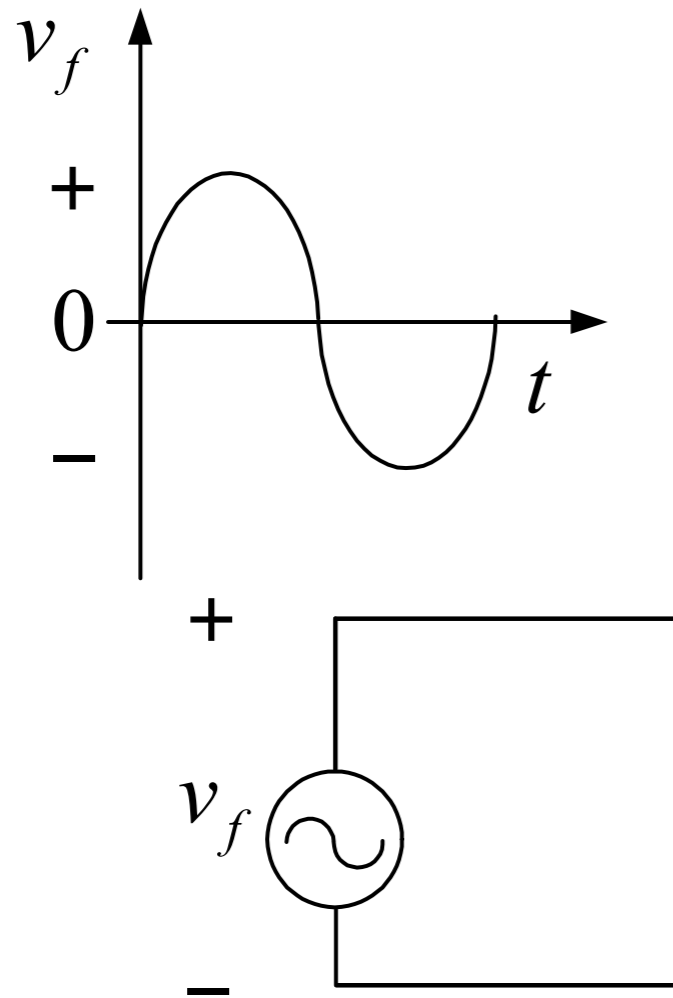


<https://www.zael.com.br/>

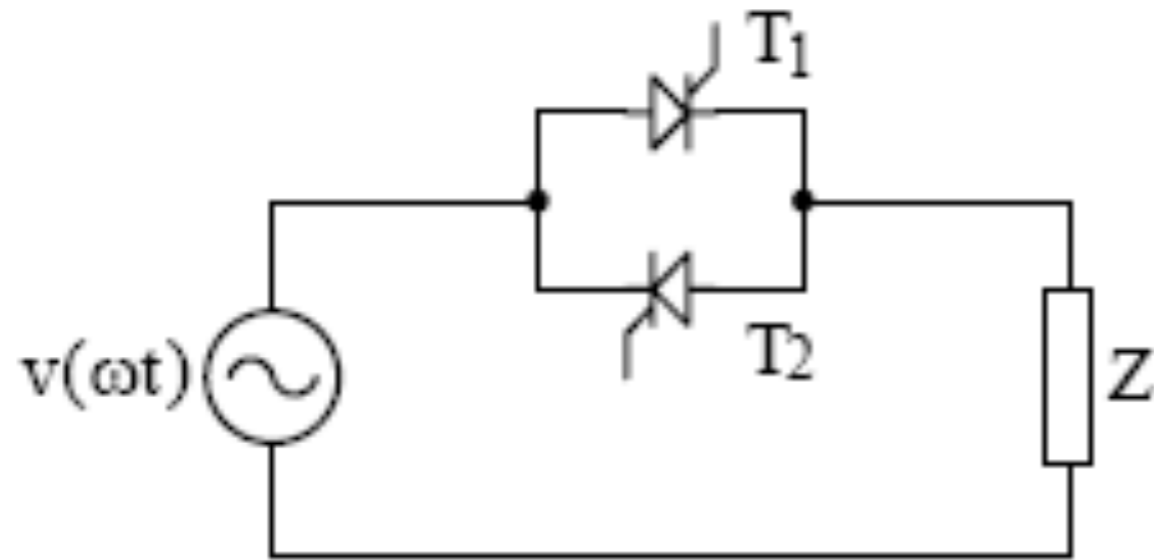
Introdução aos Conversores CA-CA



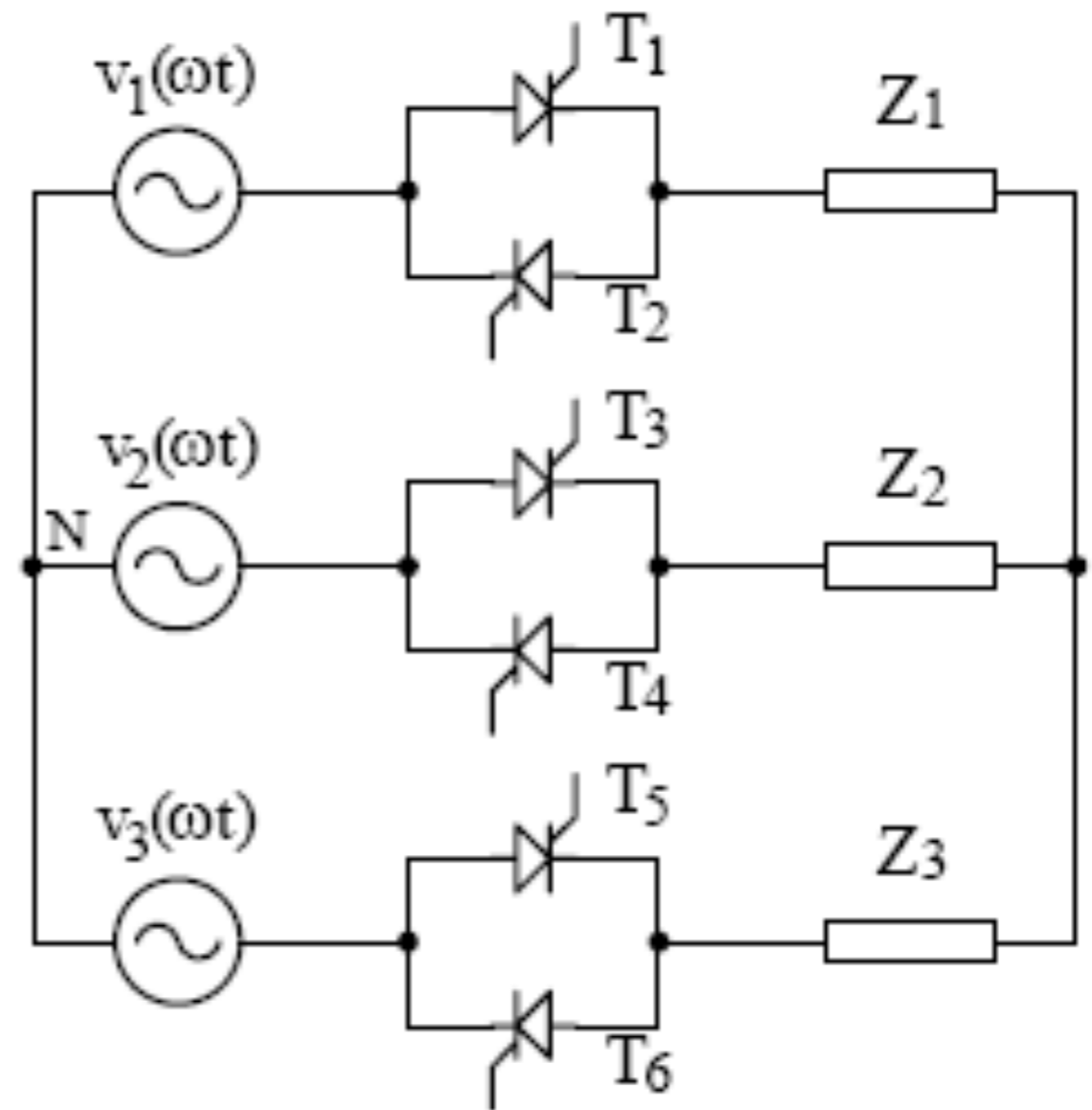
Conversores CA-CA: Princípio Geral



Conversores CA-CA: Número de Fases

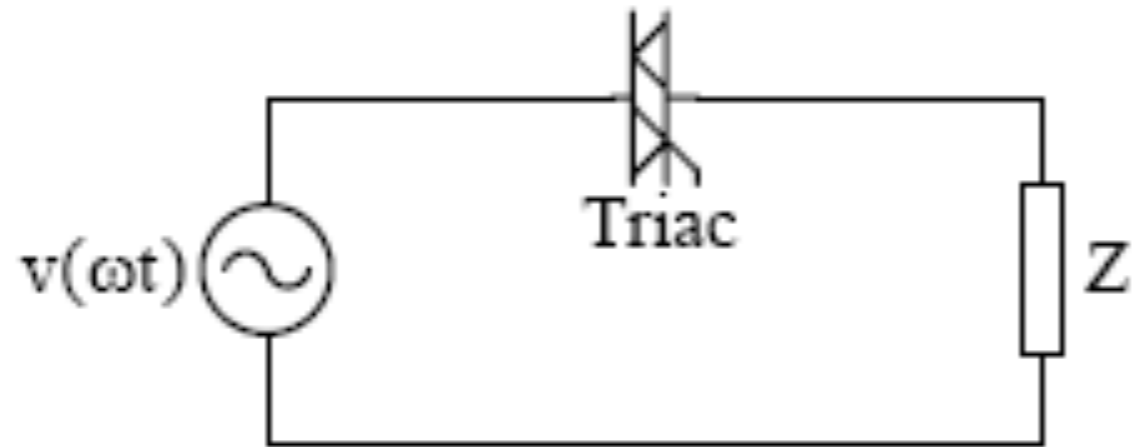


Monofásico

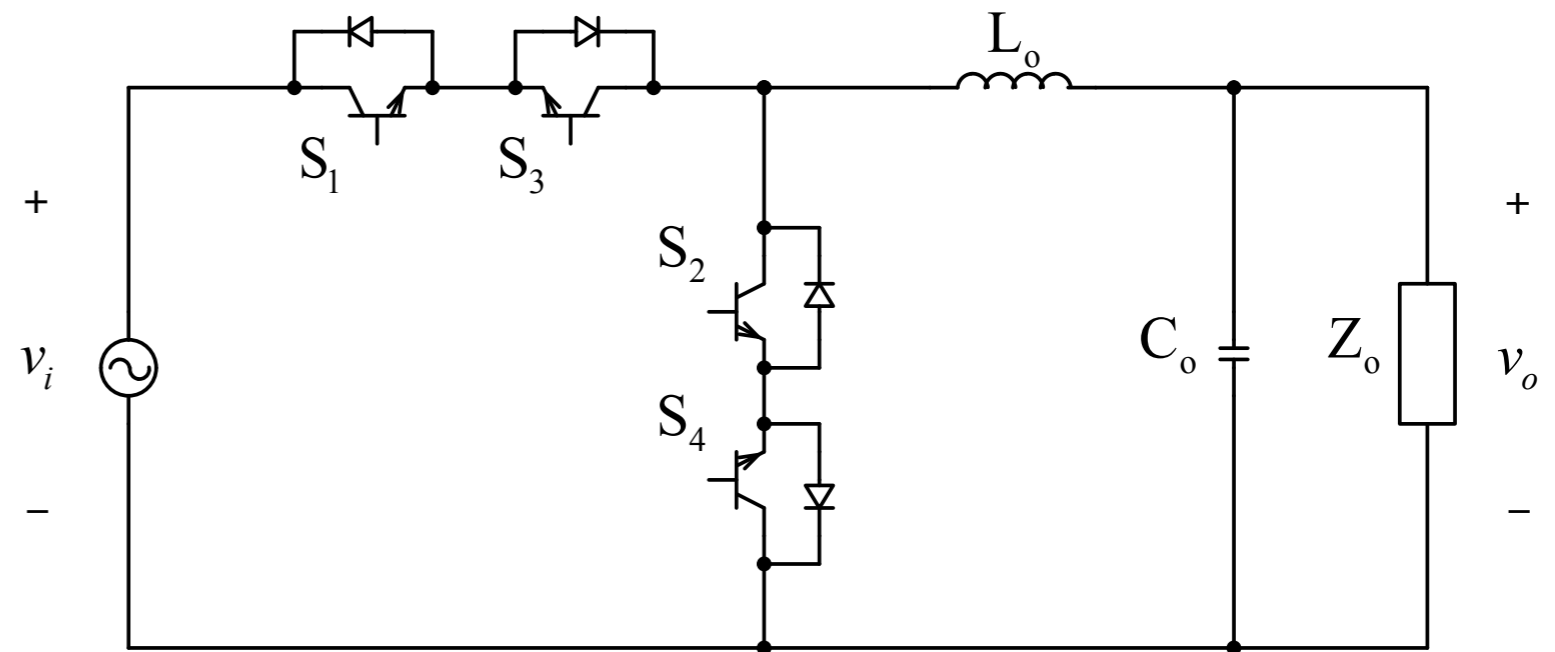


Trifásico

Conversores CA-CA: Comando



Baixa frequência



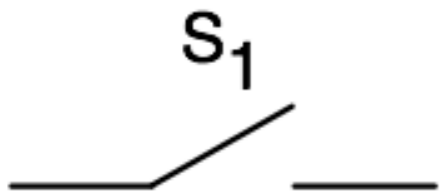
PWM alta frequência

Conversores CA-CA: Aplicações

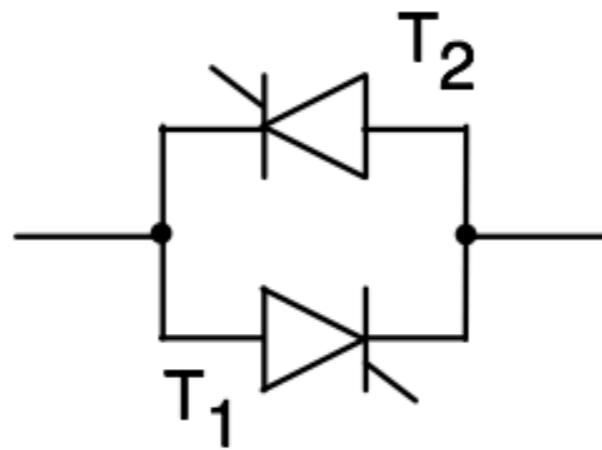
Algumas aplicações:

1. Controle de intensidade luminosa;
2. Controle de temperatura;
3. Controle de velocidade de motores de indução;
4. Limitação da corrente de partida de motores de indução;
5. Estabilizadores de tensão;
6. Filtros ativos;
7. Pré-estabilização em fontes de alimentação e UPS;
8. Economia de energia;
9. Sistemas de potência;
10. Entre outras.

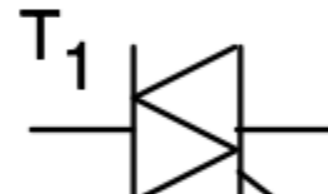
Conversores CA-CA: Comutação



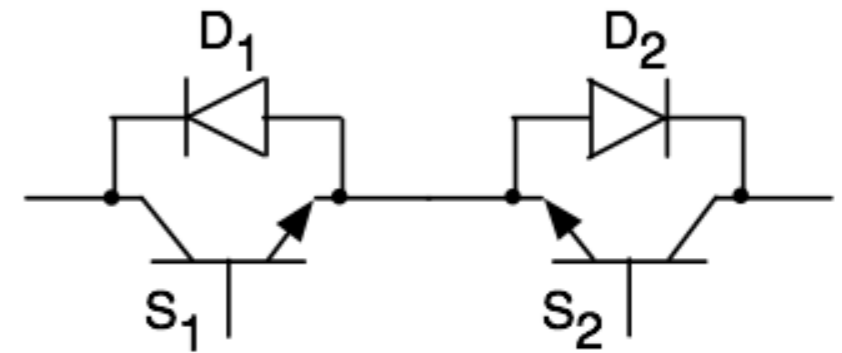
chave ideal



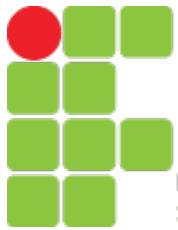
SCRs



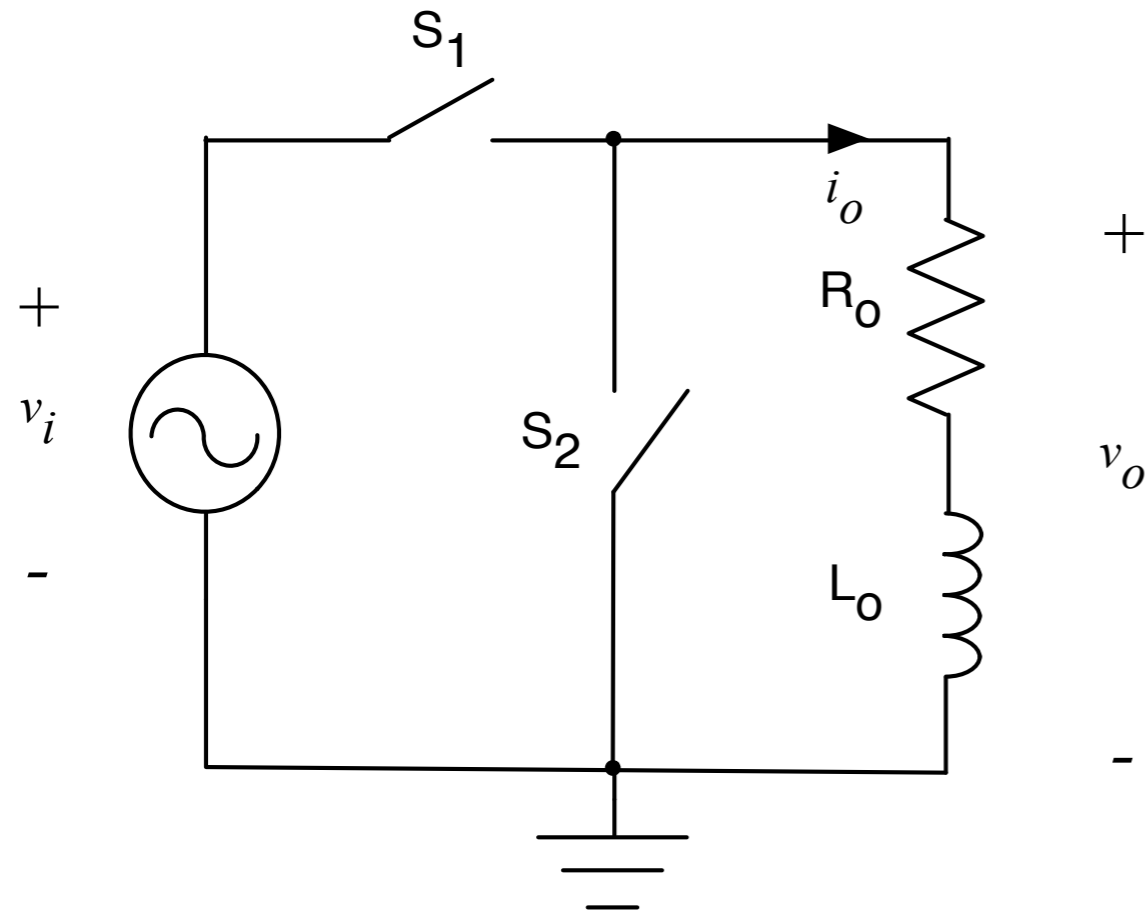
TRIAC



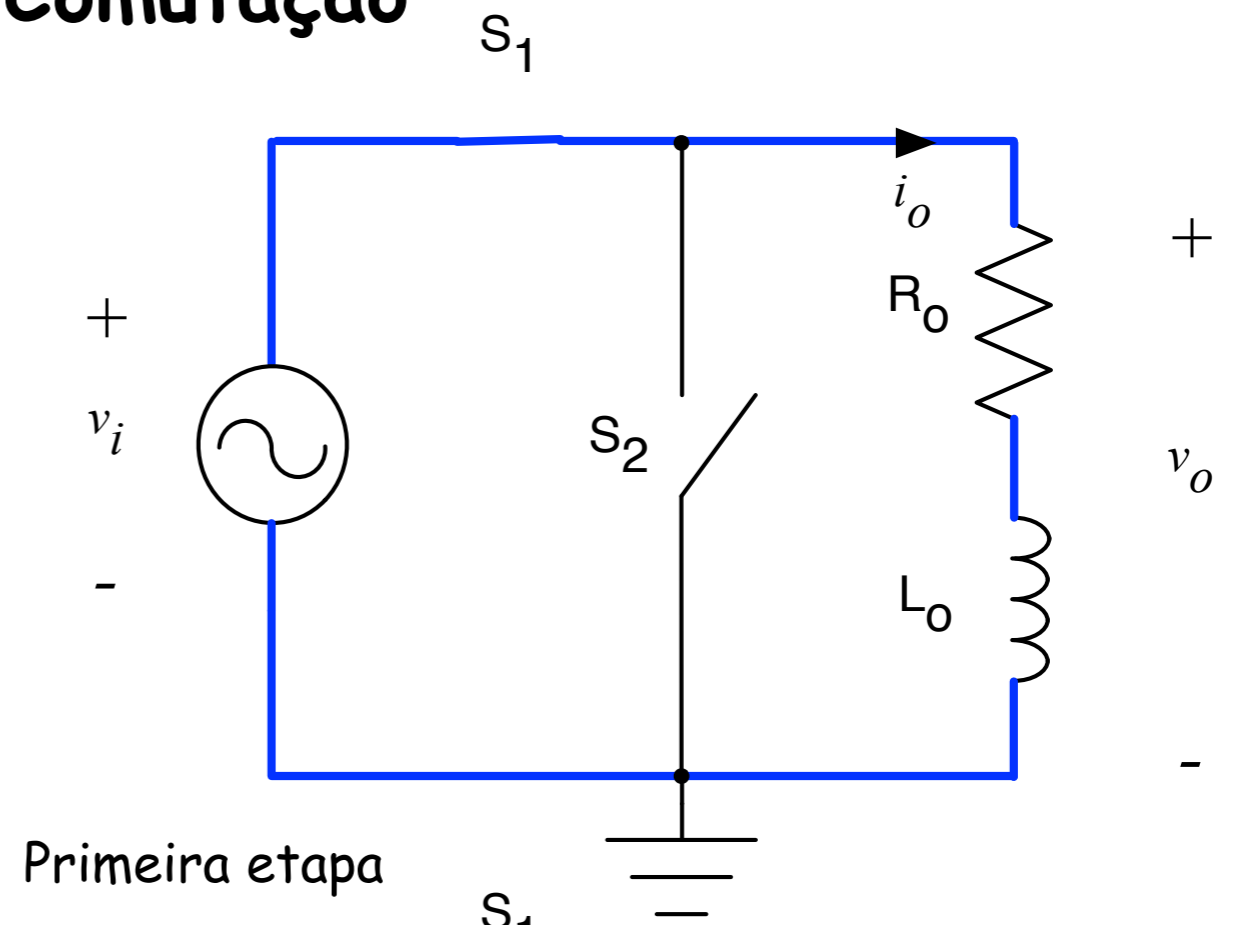
transistores



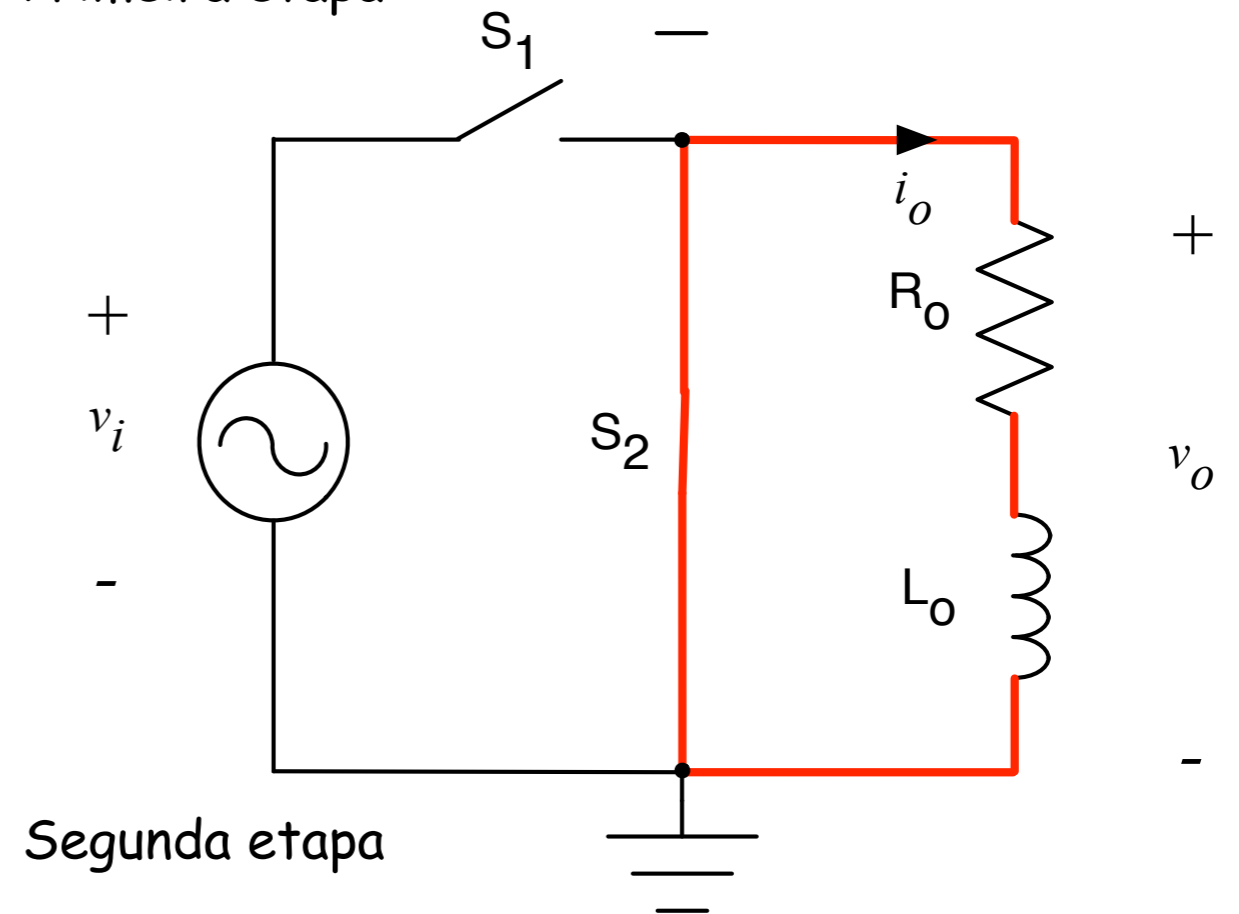
Conversores CA-CA: Comutação



Circuito exemplo

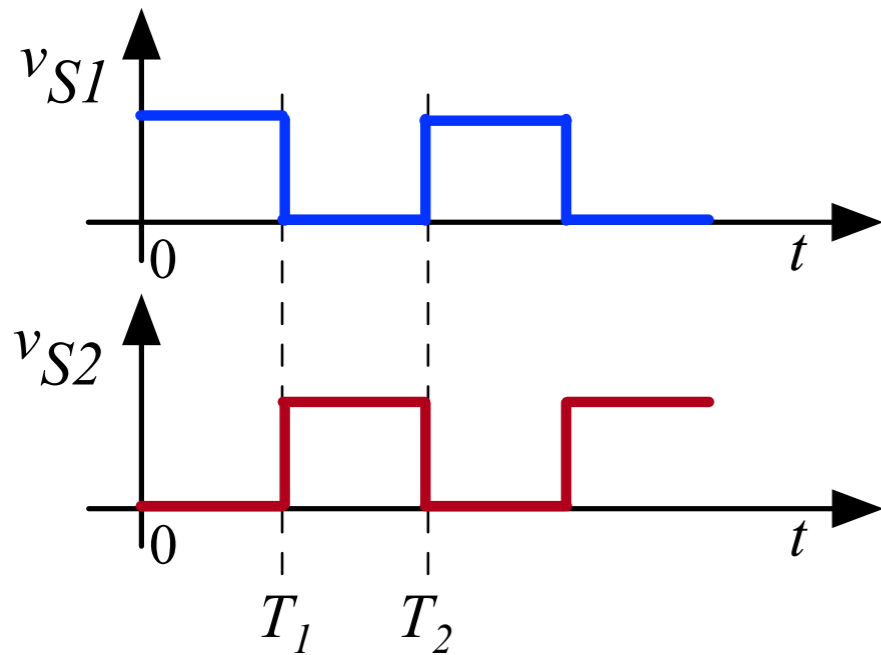


Primeira etapa

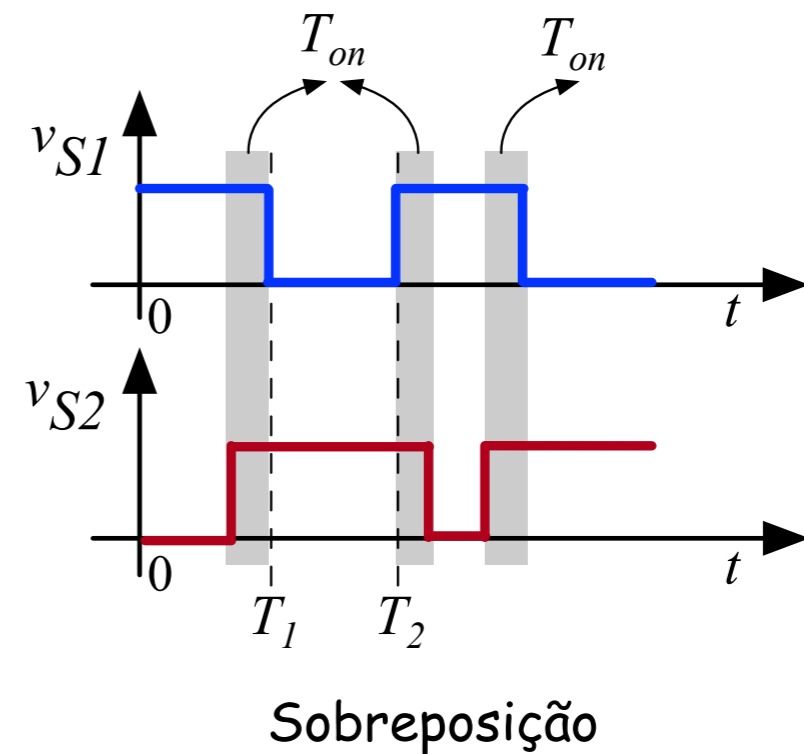
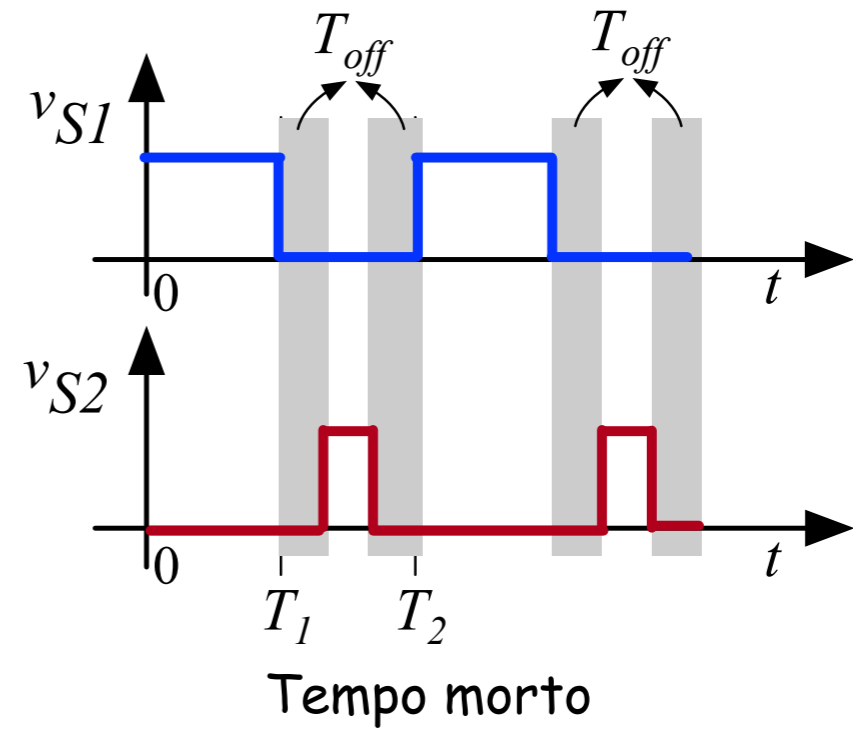


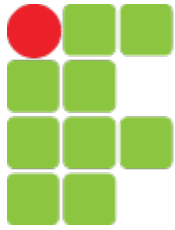
Segunda etapa

Conversores CA-CA: Comutação



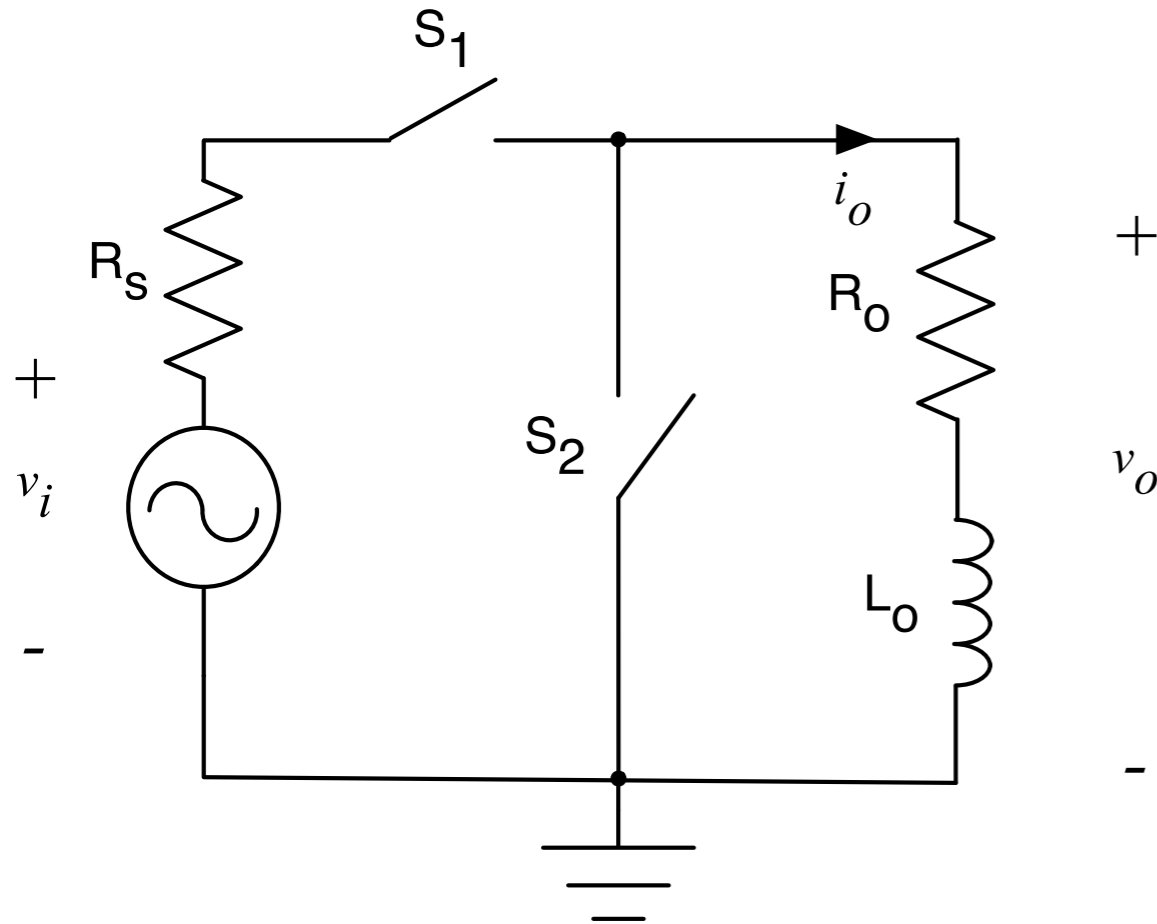
Sinais de comando - circuito ideal





INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

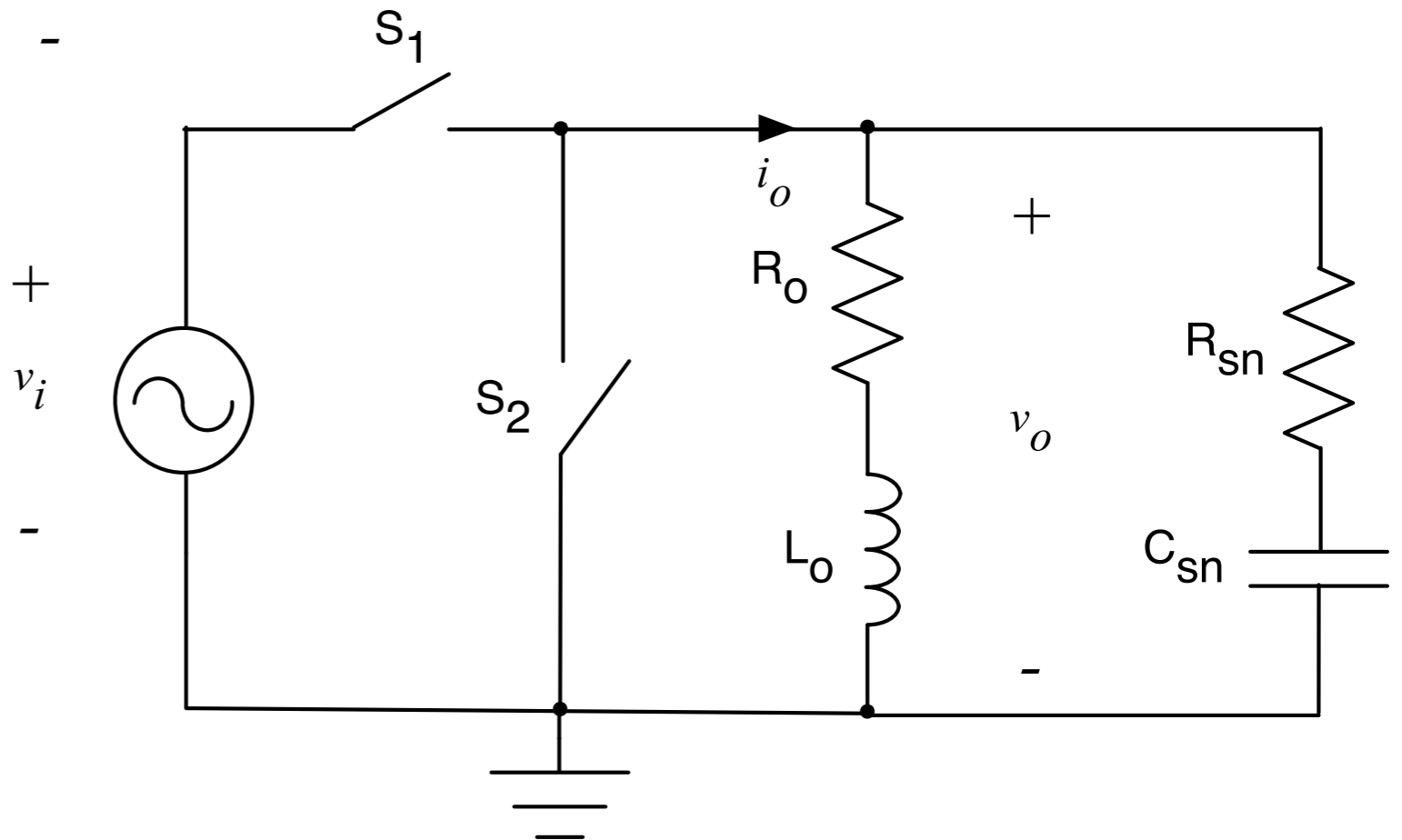
Conversores CA-CA: Comutação



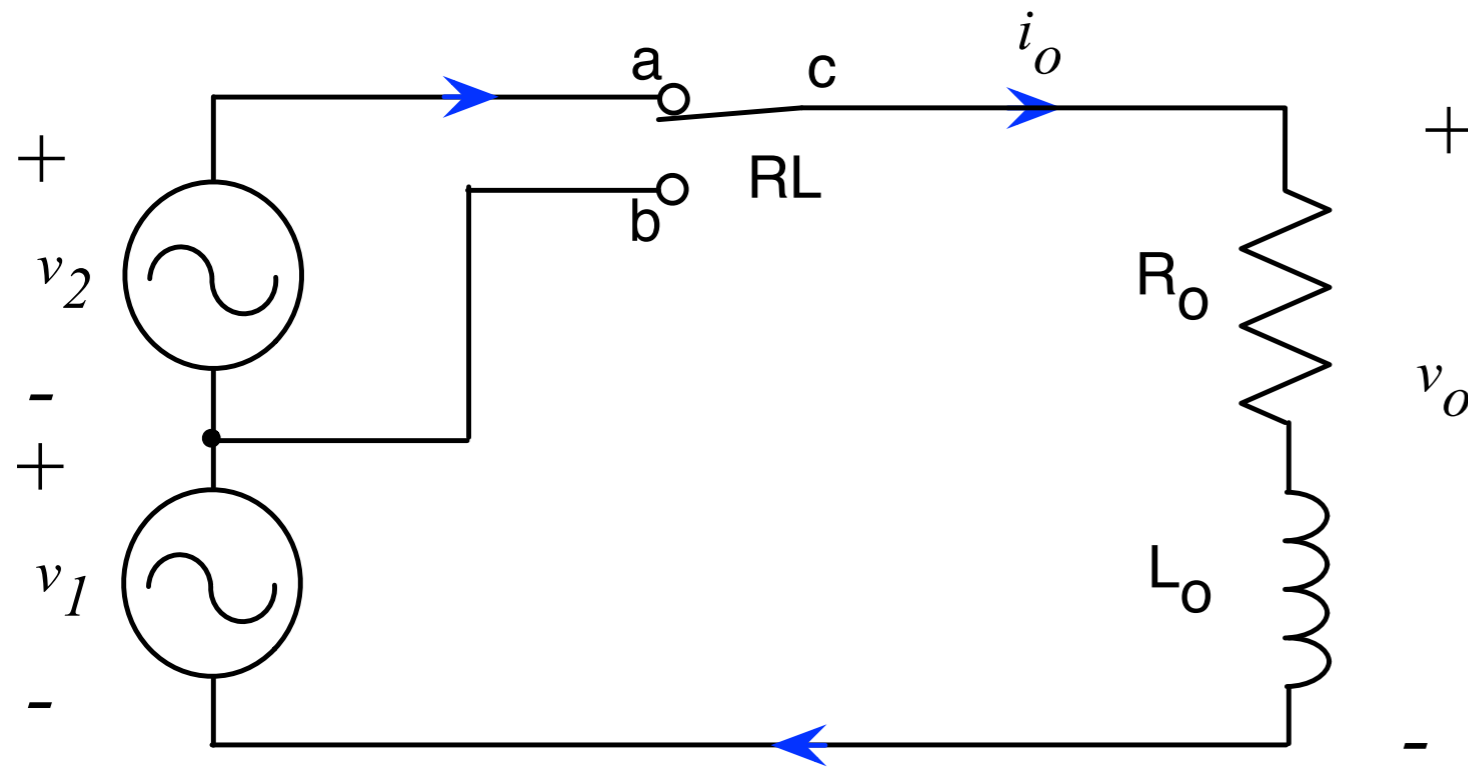
Limitação da sobretensão
Tempo morto entre sinais de comando

+
 v_o
-
-

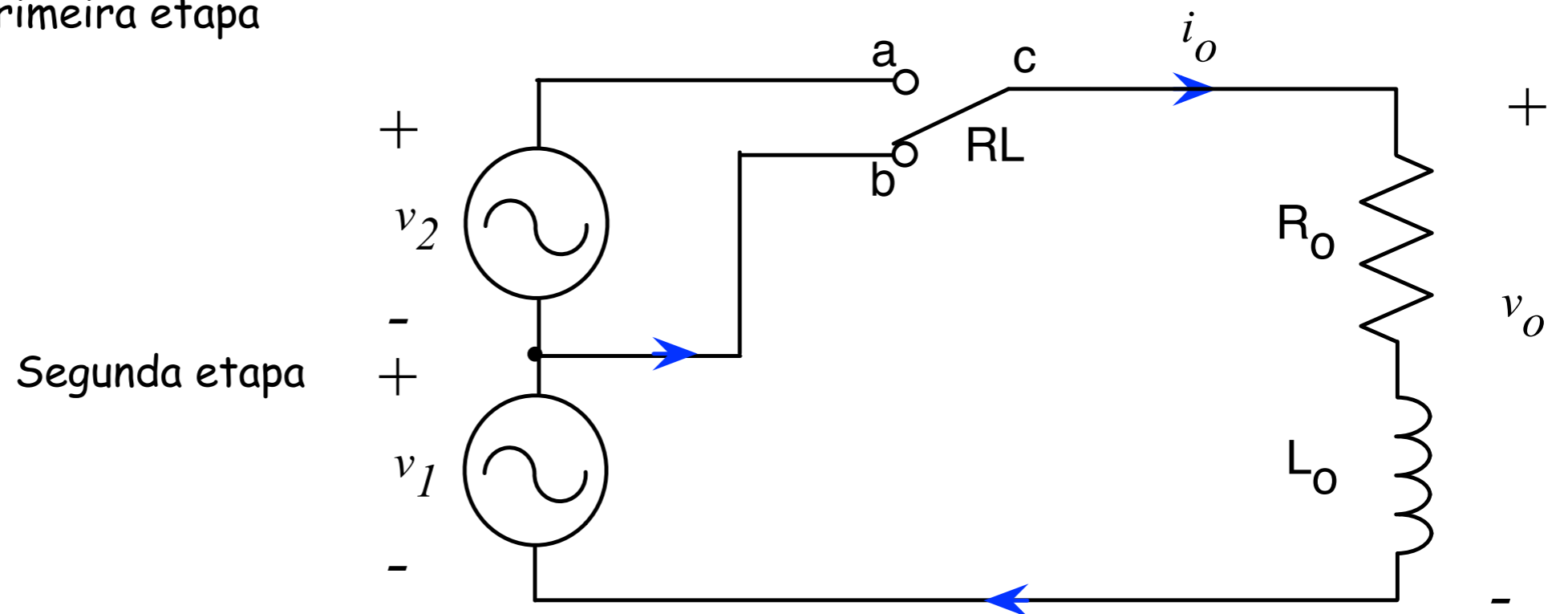
Limitação da corrente de curto-circuito
Sobreposição dos sinais de comando



Conversores CA-CA: Comutação por Relés

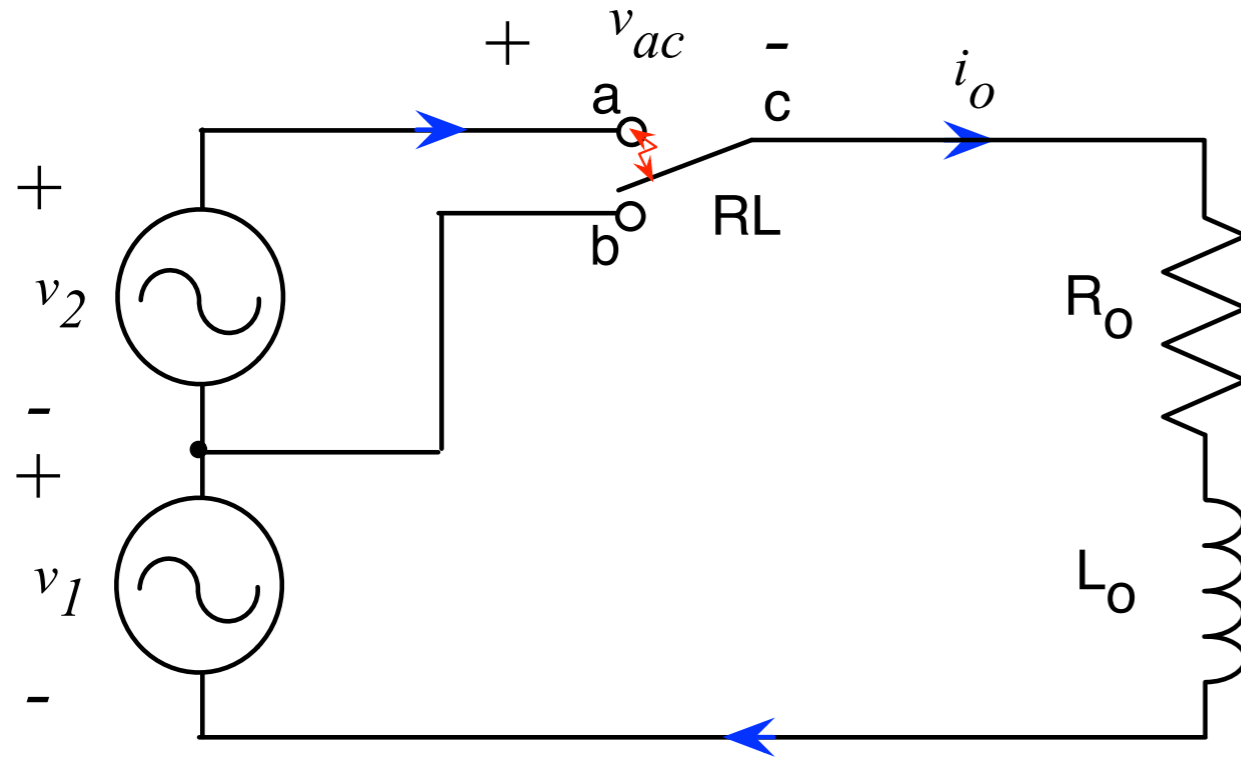


Primeira etapa



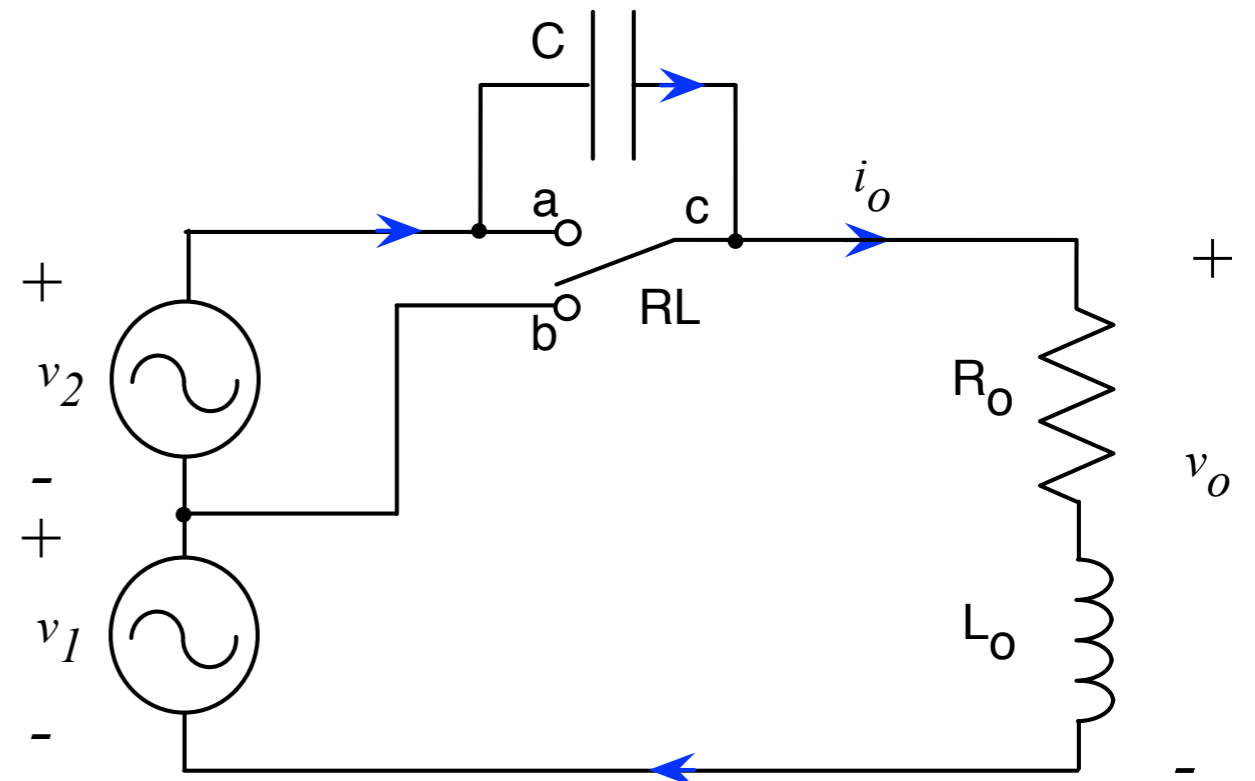
Segunda etapa

Conversores CA-CA: Comutação por Relés

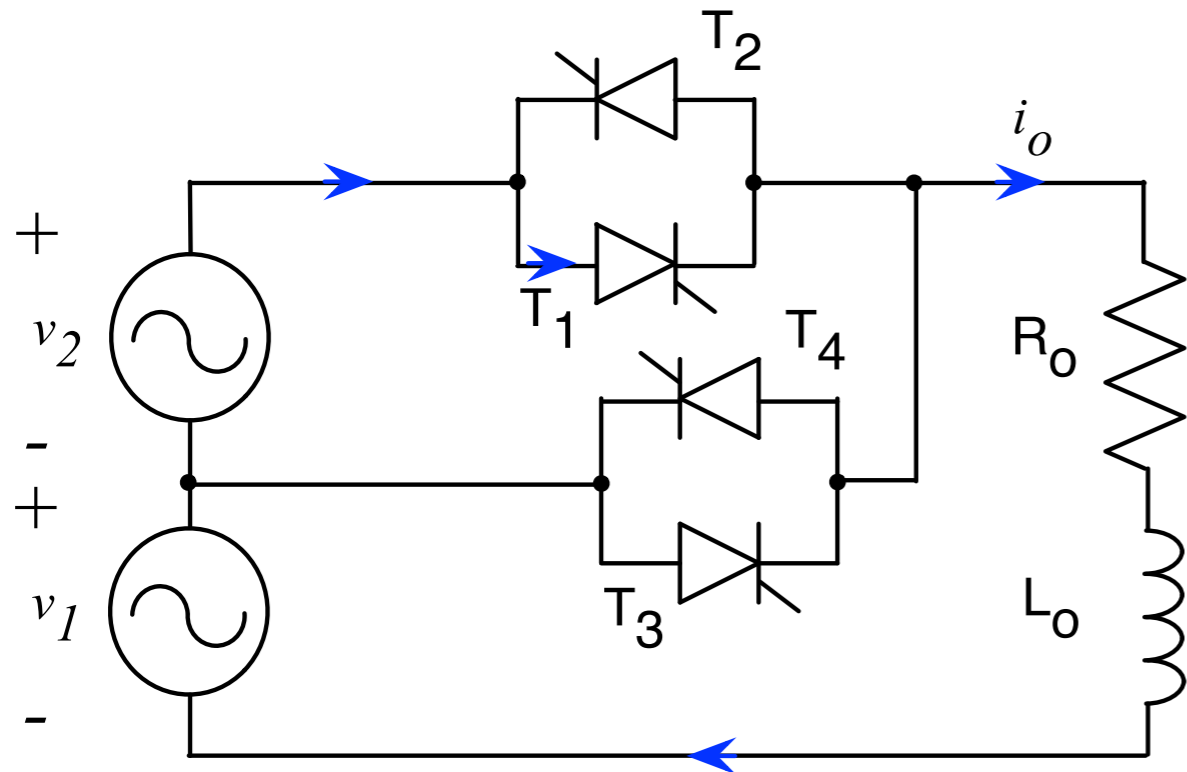


Abertura dos contatos e arco-elétrico

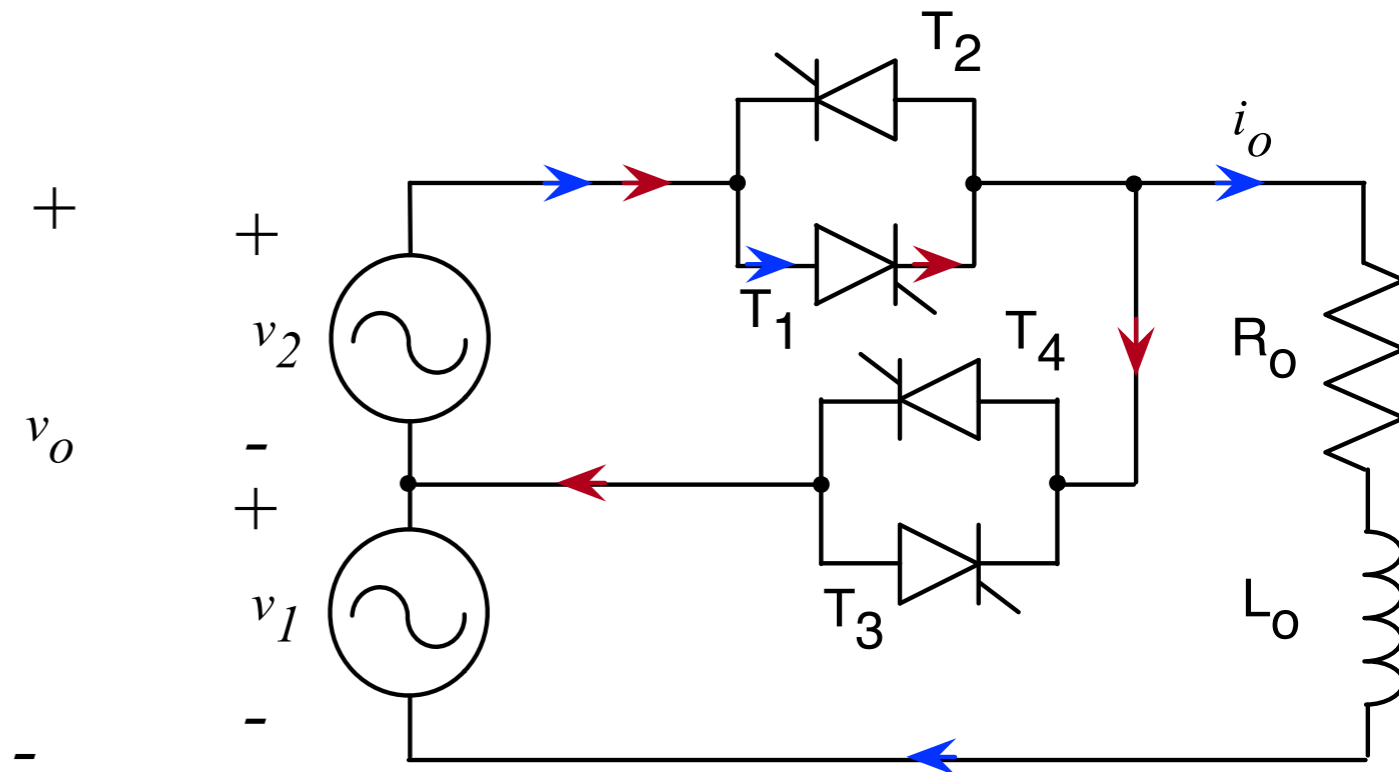
Capacitor para auxiliar na comutação



Conversores CA-CA: Comutação por Tiristores

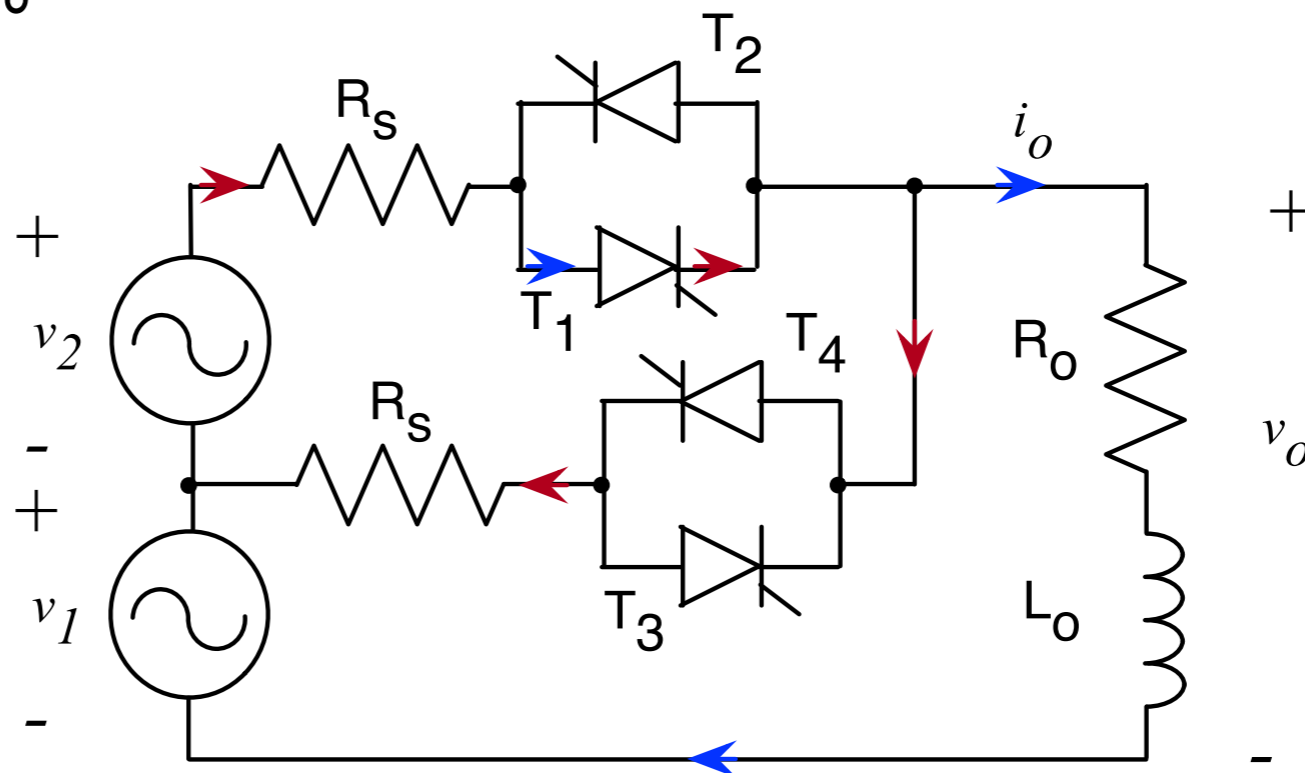


Circuito exemplo

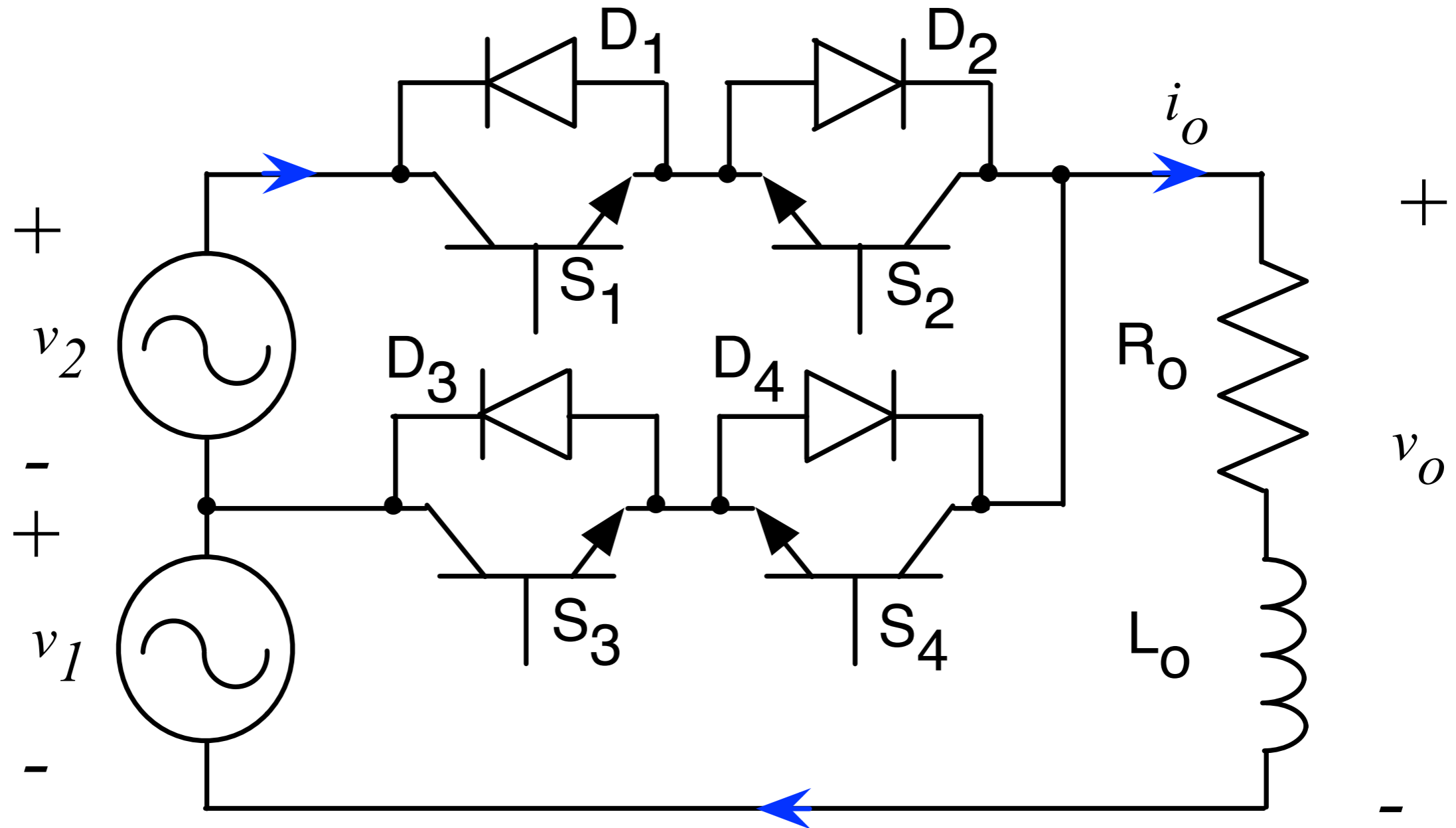


Curto-circuito durante a comutação

Resistores série para limitar a corrente de curto-circuito

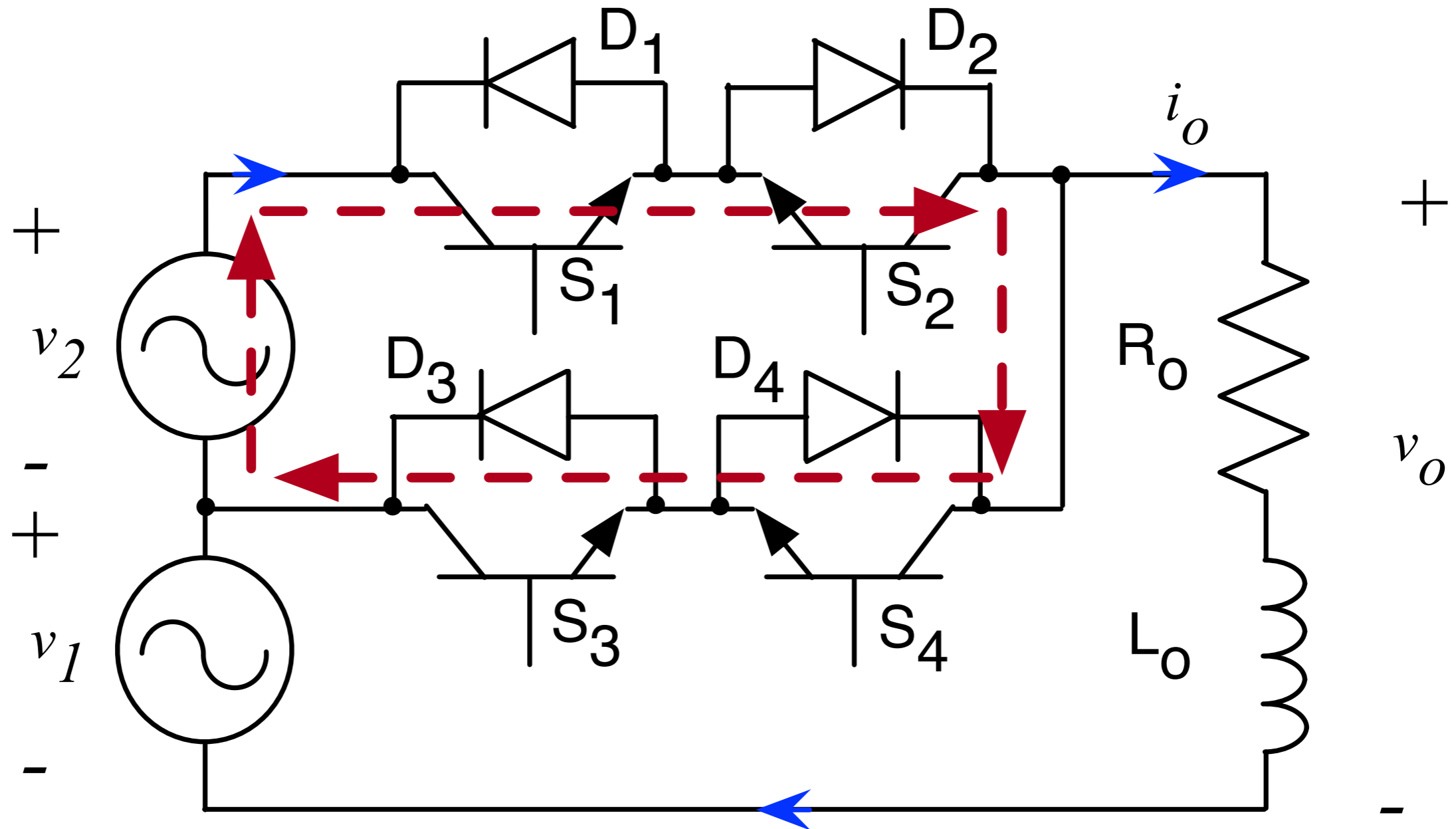


Conversores CA-CA: Comutação por Transistores



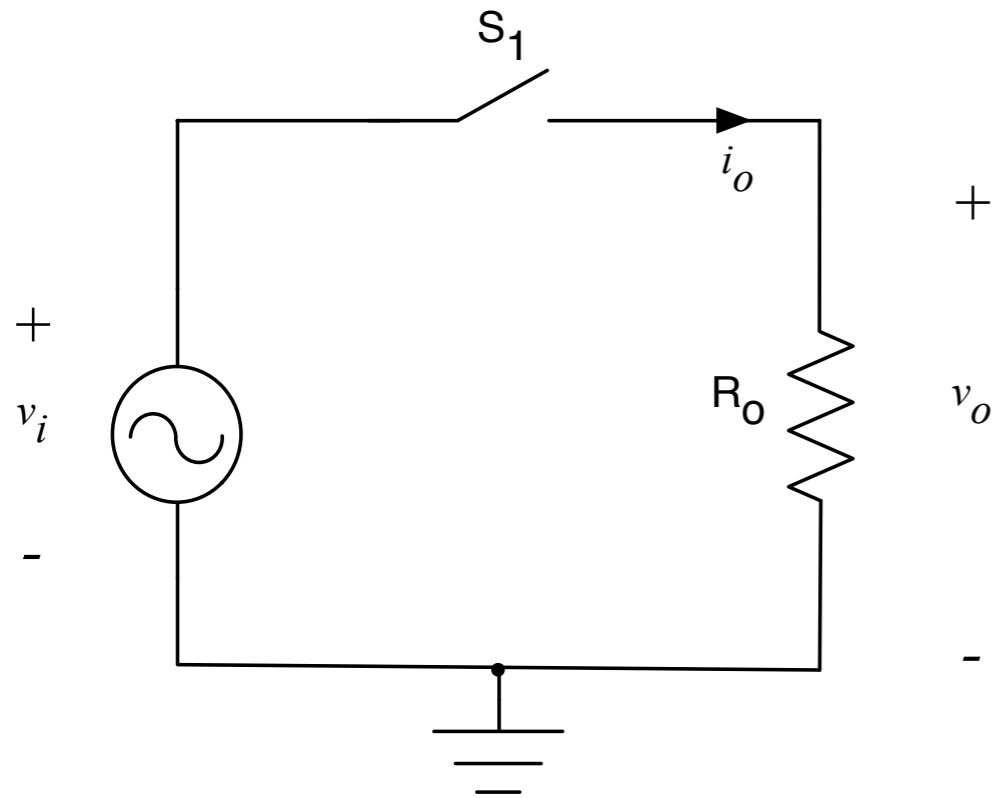
Circuito exemplo

Conversores CA-CA: Comutação por Transistores

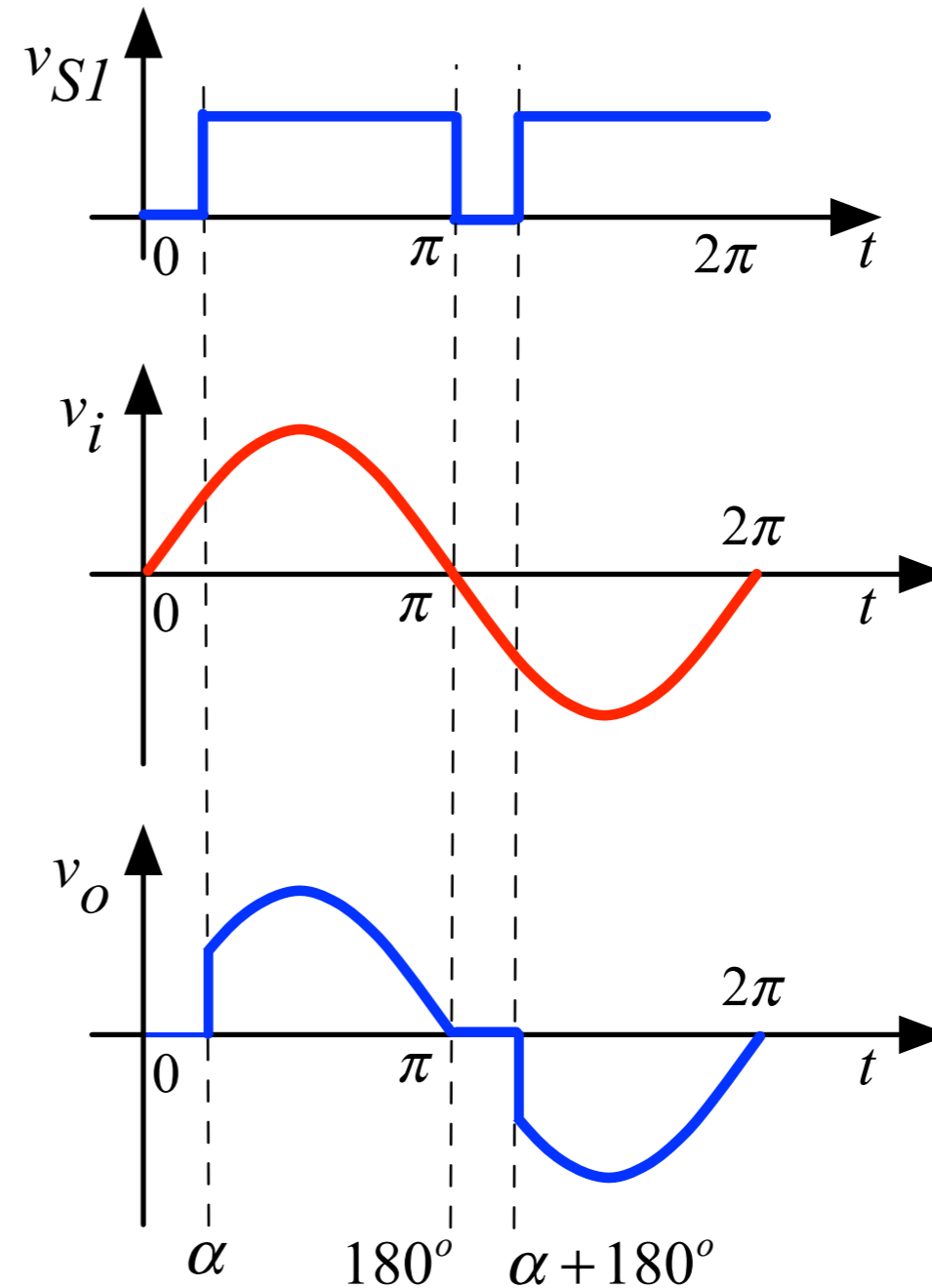


Problema da comutação

Conversores CA-CA: Princípio de Funcionamento

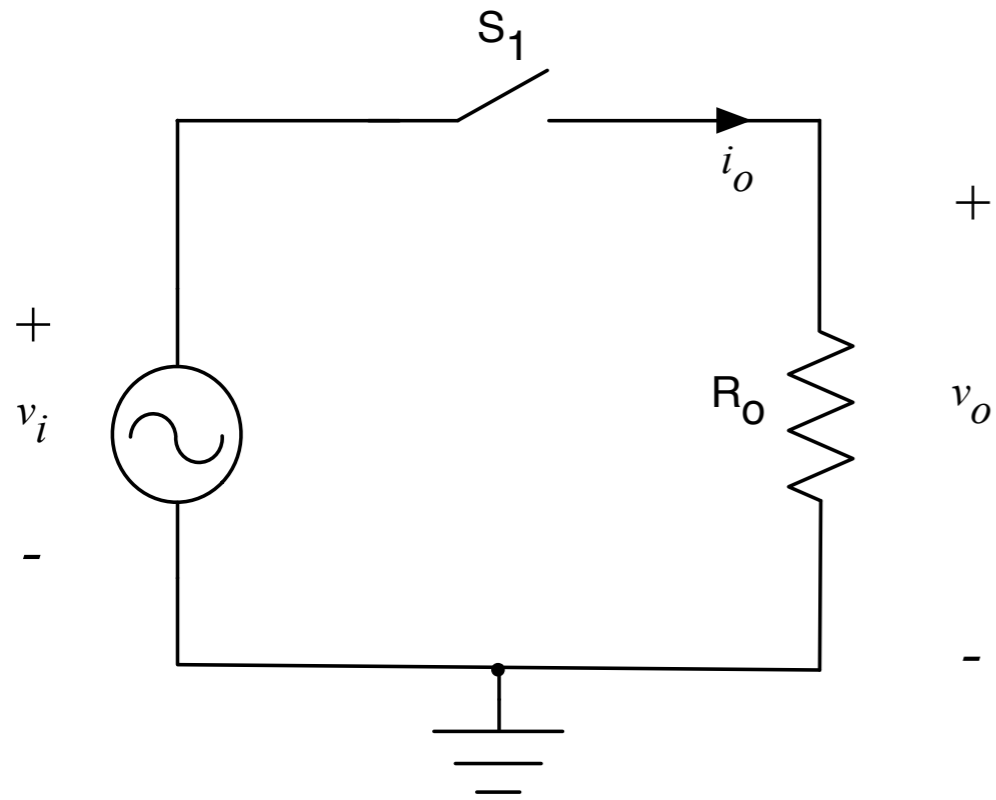


Conversor ca-ca simples

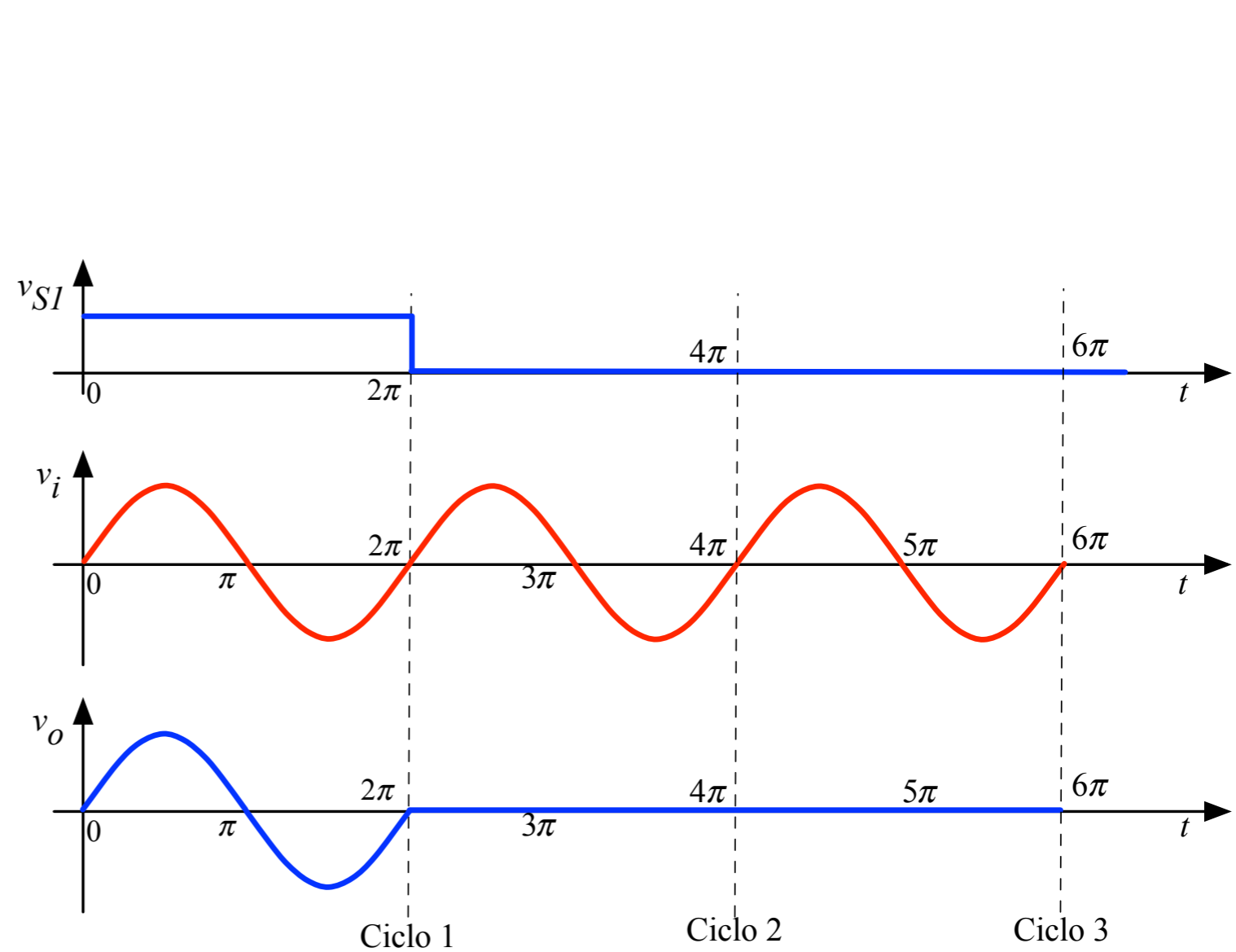


Controle por ângulo de fase

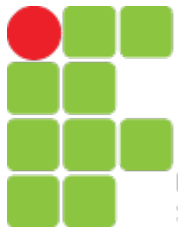
Conversores CA-CA: Princípio de Funcionamento



Conversor ca-ca simples

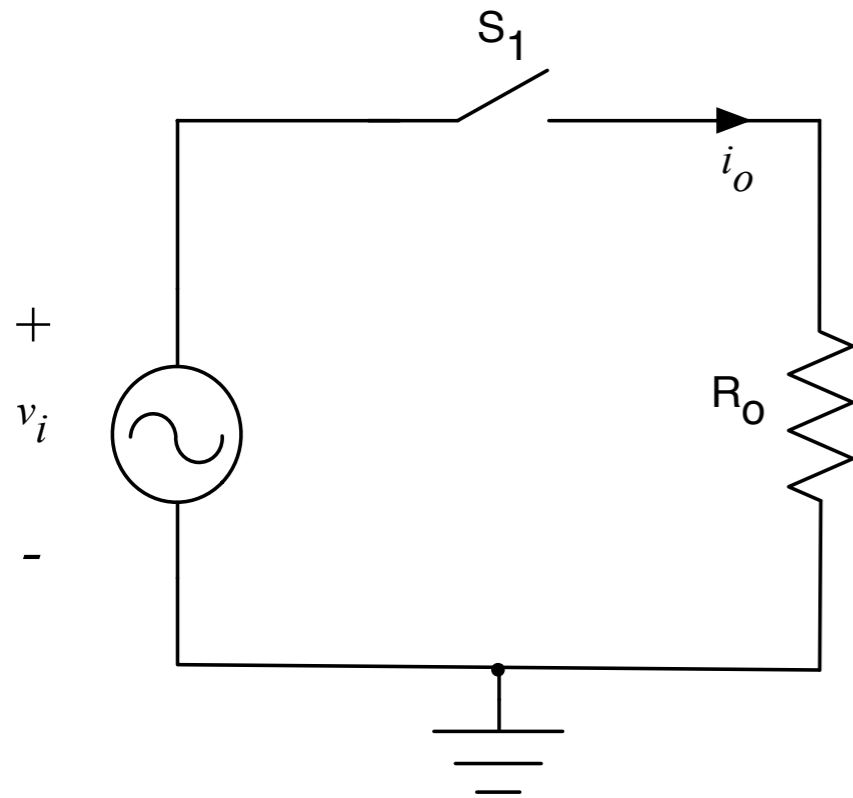


Controle por ciclos inteiros

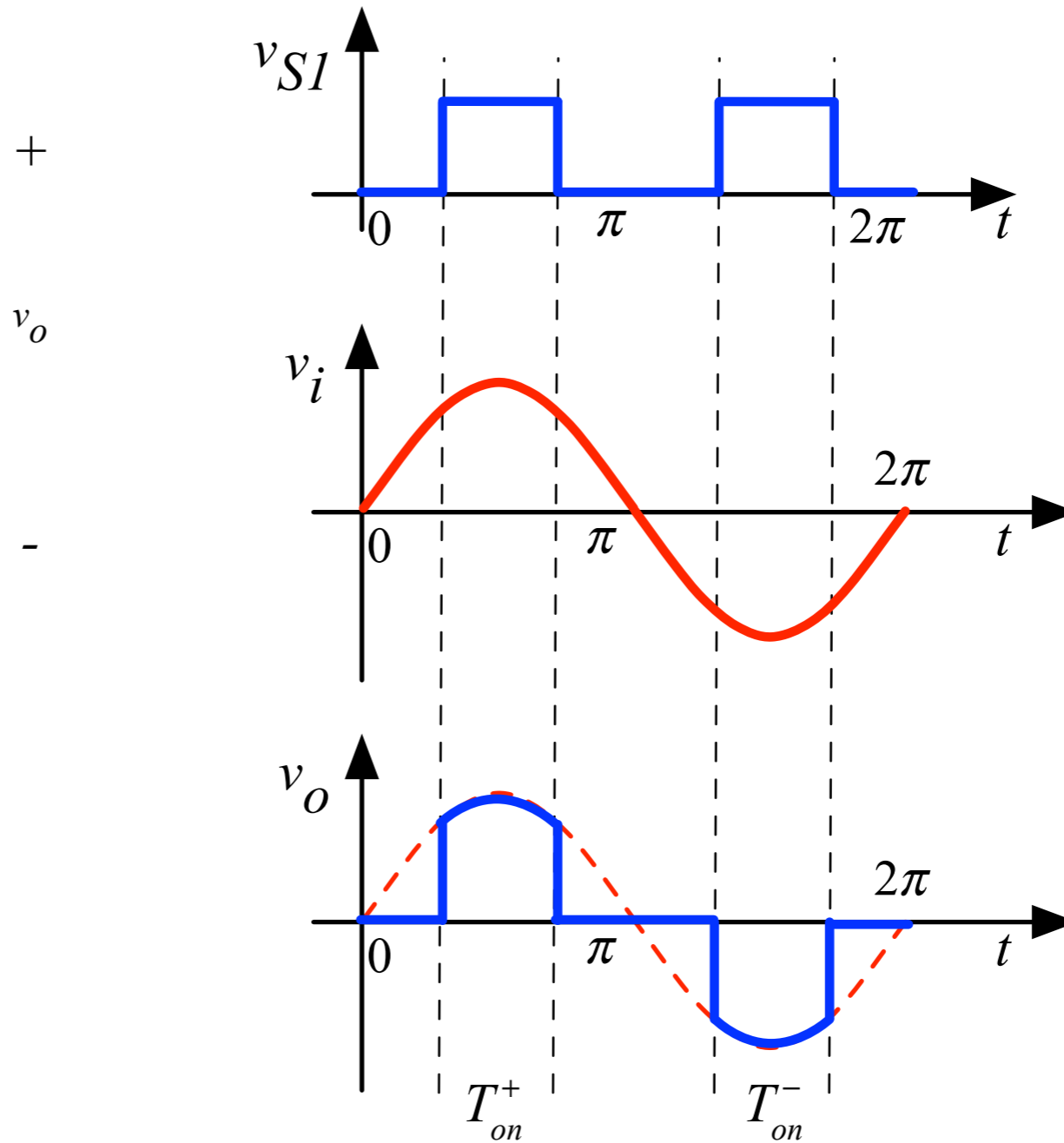


INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Conversores CA-CA: Princípio de Funcionamento

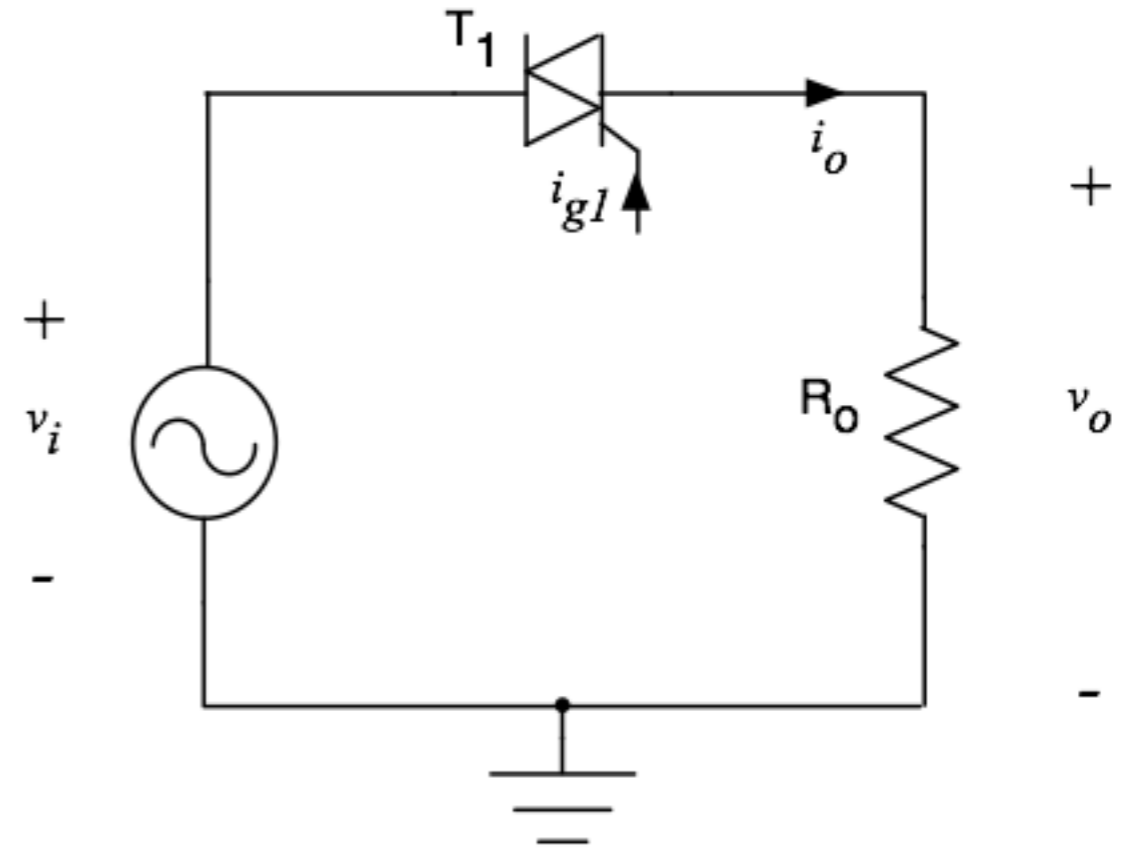
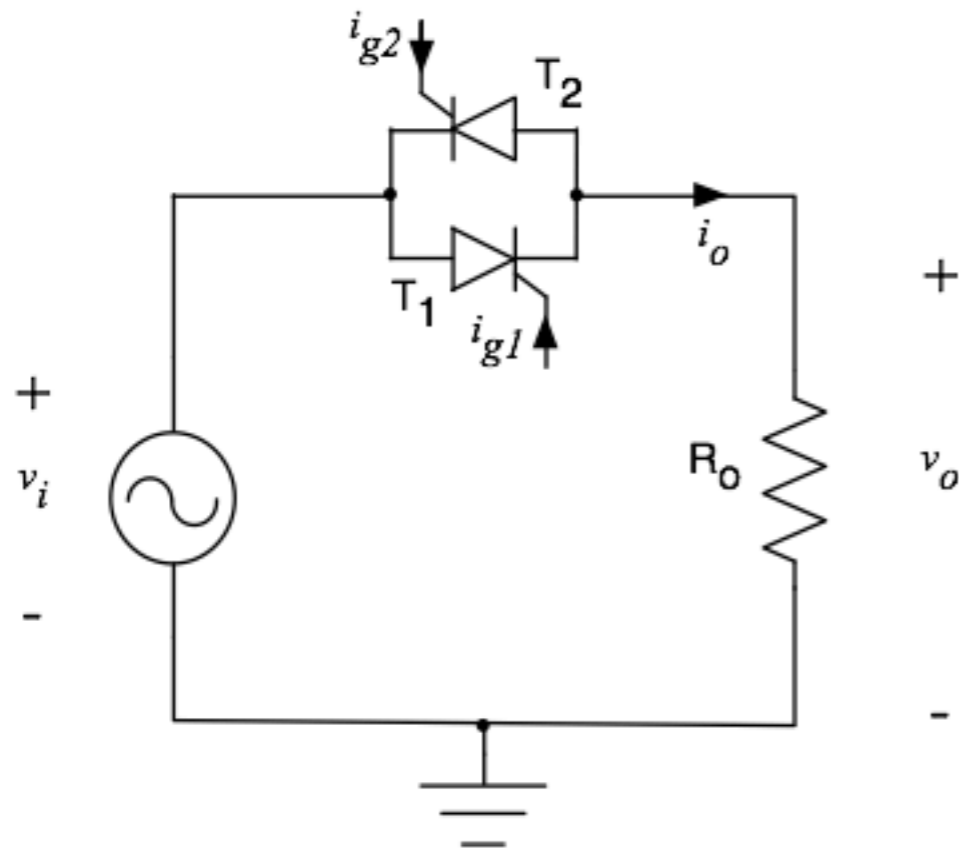


Conversor ca-ca simples



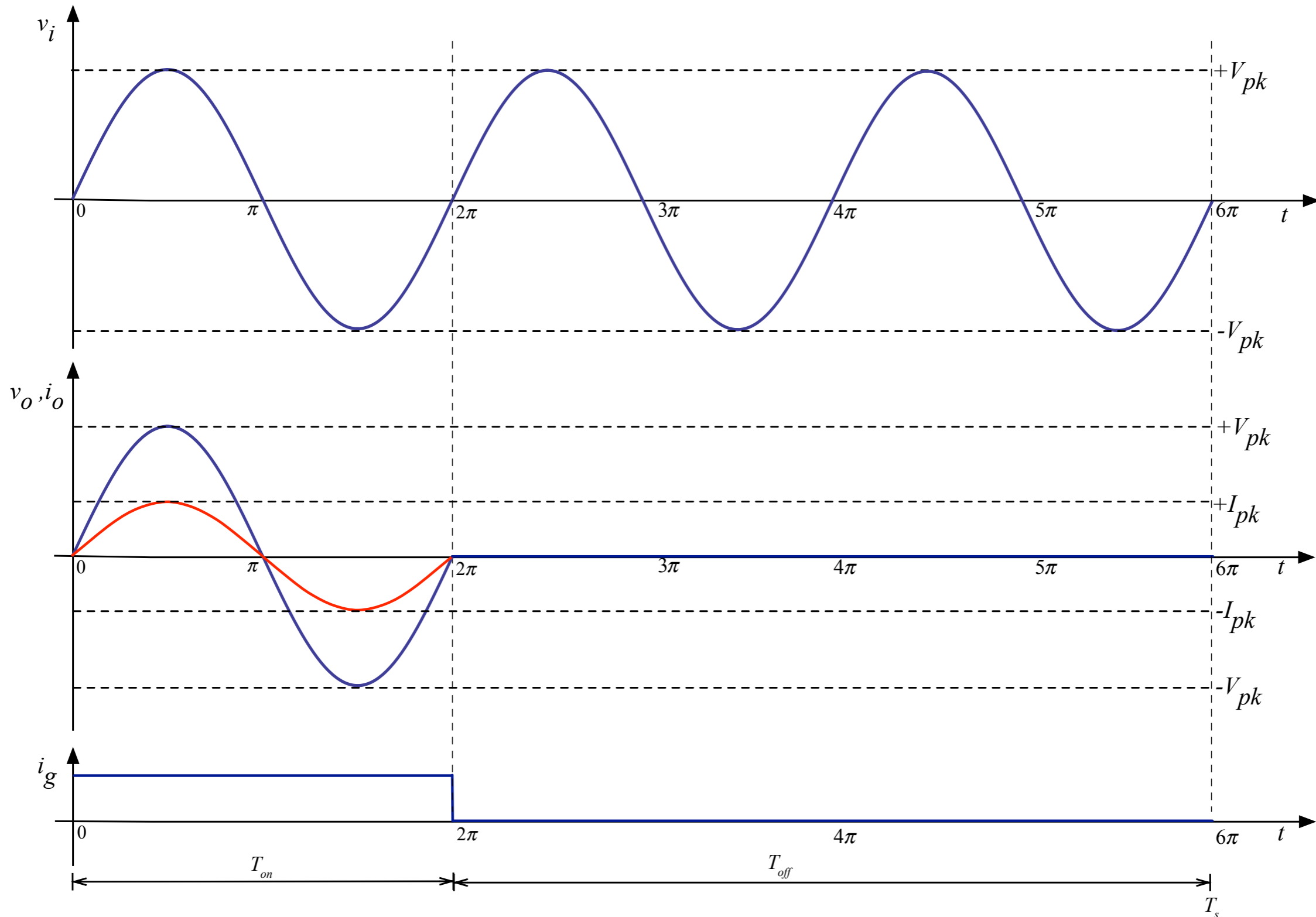
Modulação PWM

Conversores CA-CA: Controle por Ciclos Inteiros

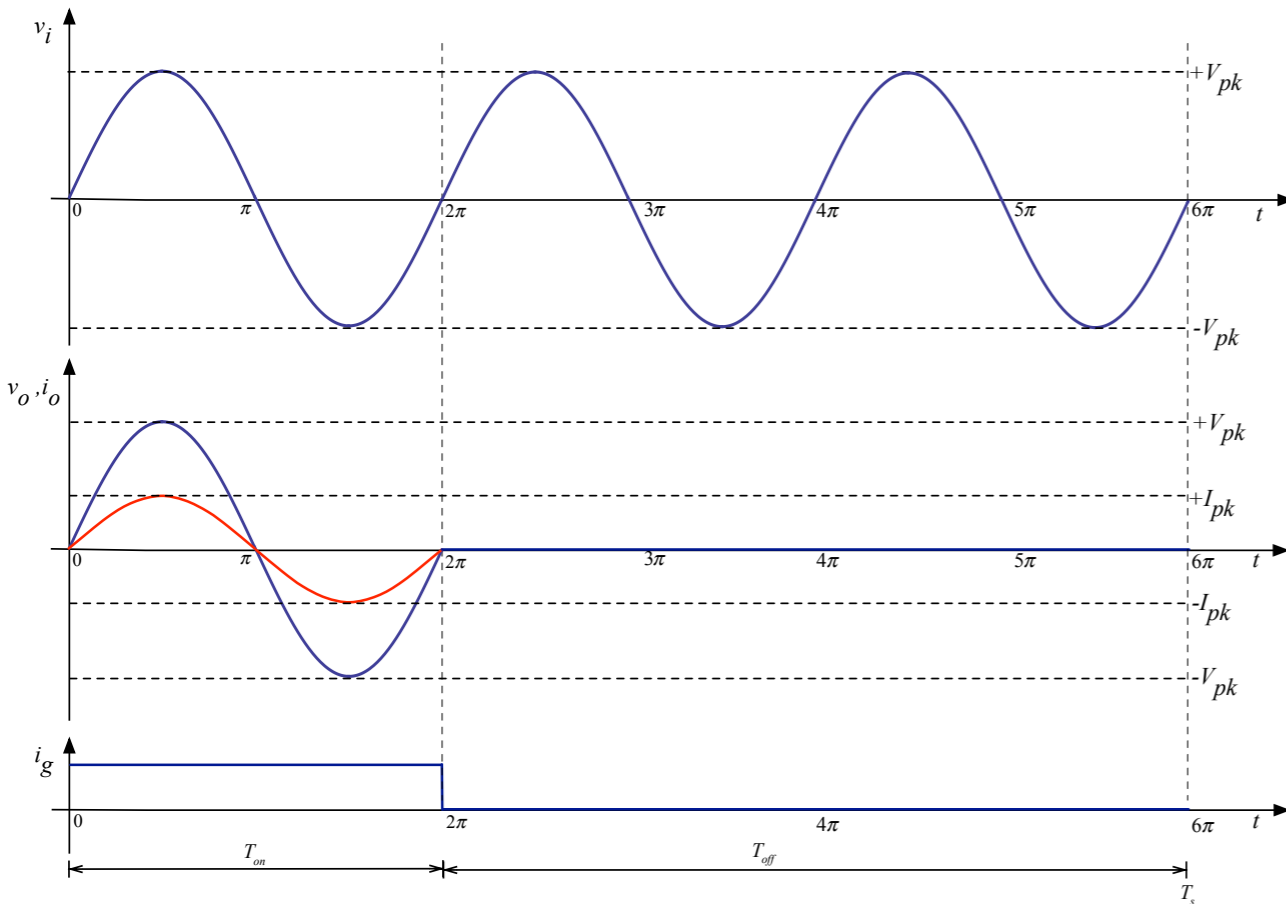


Conversores ca-ca com tiristores

Conversores CA-CA: Controle por Ciclos Inteiros



Conversores CA-CA: Controle por Ciclos Inteiros



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

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

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

$\phi \rightarrow$ ângulo de defasagem

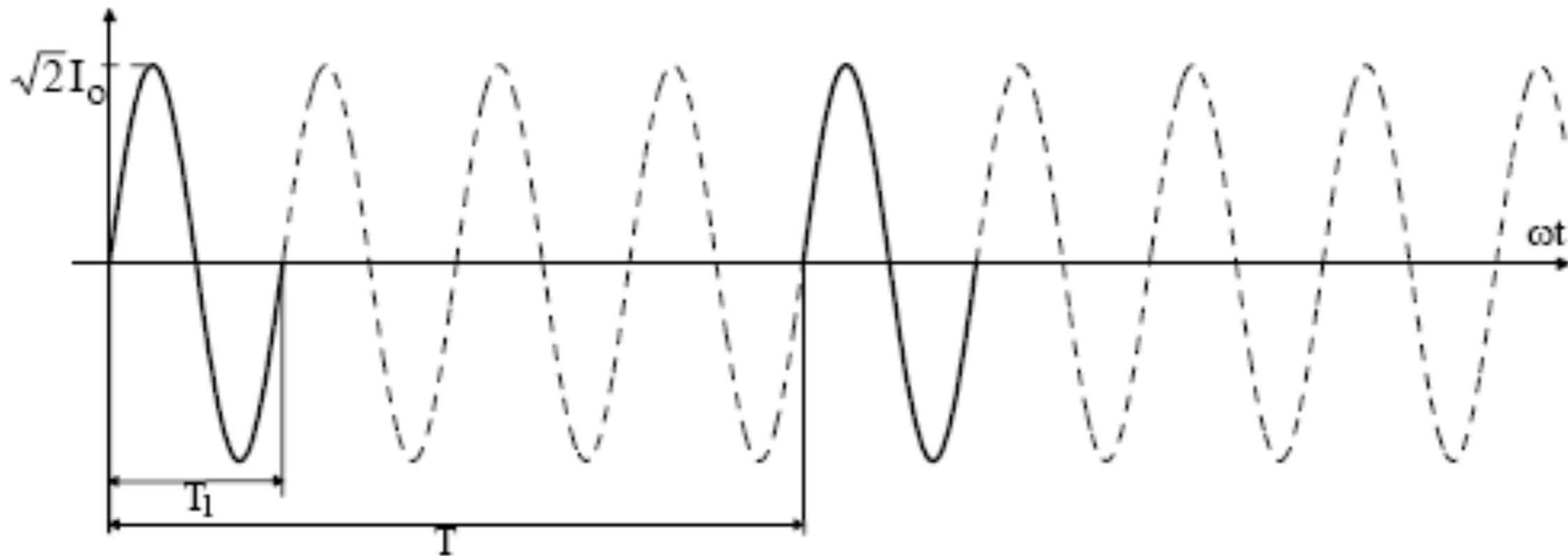
$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{\frac{m}{M}}$$

Conversores CA-CA: Controle por Ciclos Inteiros

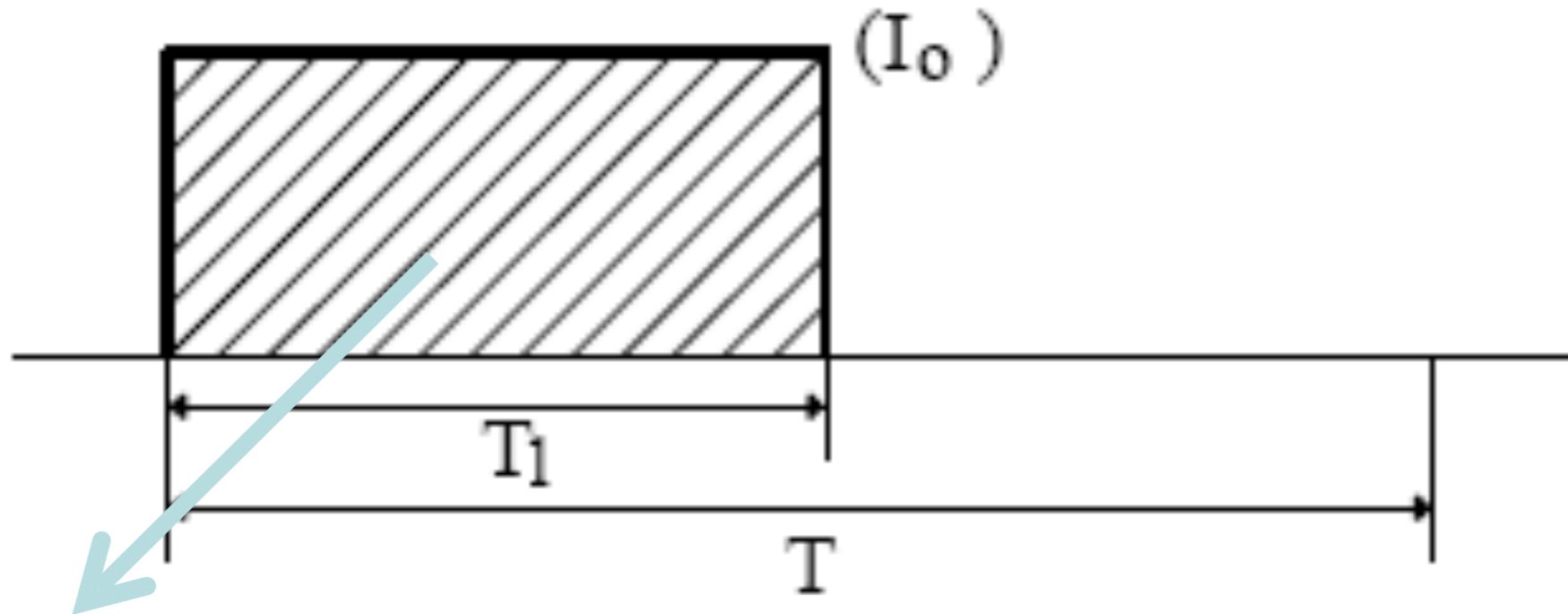
Deficiências dos gradadores:

1. Introduzem harmônicas significativas de corrente na rede;
2. Para ângulos de disparo (α) elevados o fator de potência é baixo.

Controle por ciclos inteiros:



Conversores CA-CA: Controle por Ciclos Inteiros



$$W_1 = R \cdot I_o^2 \cdot T_1$$

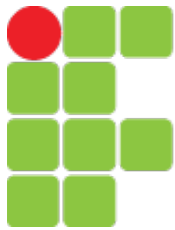
$$W_2 = R \cdot I^2 \cdot T$$

m = número de ciclos aplicados à carga;
 M = número de ciclos da rede.

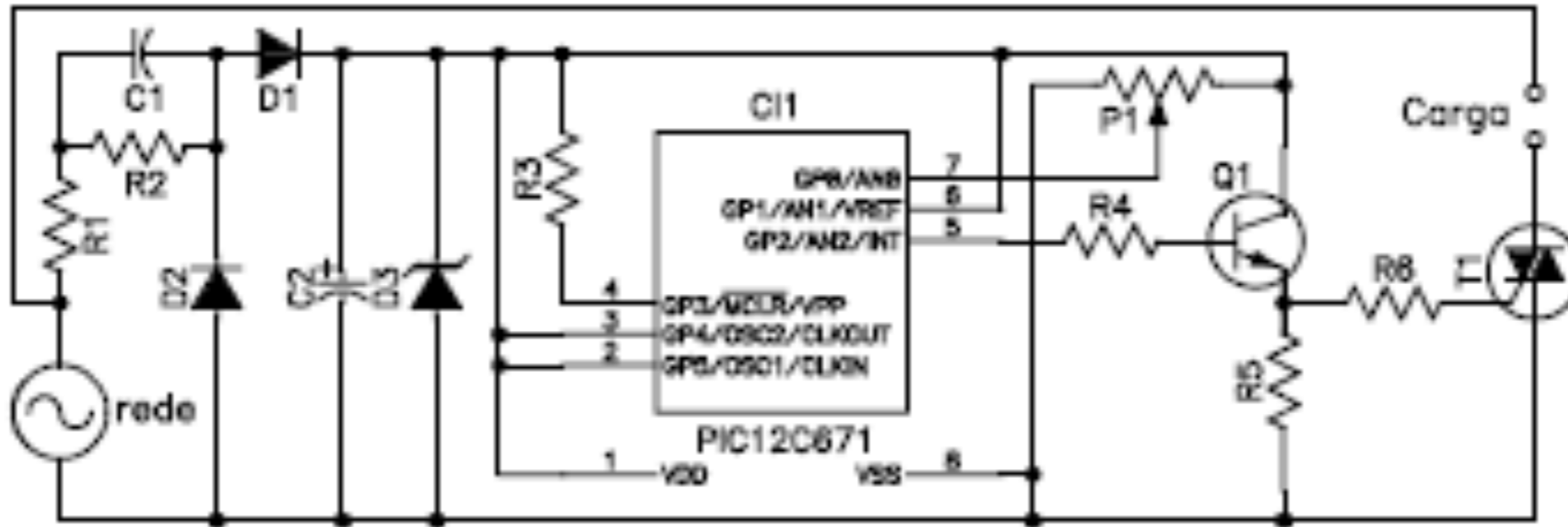
$$W_1 = W_2$$

$$R \cdot I_o^2 \cdot T_1 = R \cdot I^2 \cdot T$$

$$I = \sqrt{\frac{T_1}{T}} \cdot I_o = \sqrt{\frac{m}{M}} \cdot I_o$$



Conversores CA-CA: Controle por Ciclos Inteiros



A New Topology for Power Control of AC Loads Using AC-AC Converters

Paulo Mario dos Santos Dias de Moraes, Ivo Barbi e Arnaldo José Perin

Instituto Federal de Santa Catarina
DEP. Engenharia de Eletrônica, Departamento de Engenharia Elétrica
CEP 88.040-970 - Caixa Postal 717
Itajaí - SC - Brasil

ABSTRACT - This work describes the theory of hard firing power control and how it can be implemented applied to AC-AC converter circuits with the aid of a dedicated microcontroller. It emphasizes the advantages that hard firing has over the traditional phase control, and presents two practical examples of application where the hard firing technique successfully replaces phase control. It then discusses the filter problems which is inherently associated with the hard firing technique and proposes a new topology to avoid the problems related both to phase control and to hard firing control.

INTRODUÇÃO
O controle por ciclos inteiros é uma técnica de controle da potência transferida a uma carga utilizada nos gradadores. O controle por ciclos inteiros, em relação ao já tradicional controle de fase (por ângulo de disparo), tem as vantagens de não introduzir harmônicas de corrente na rede de alimentação e de possuir fator de potência sempre unitário.

A análise de circuitos integrados dedicados à implementação do controle de gradadores por ciclos inteiros e a crescente popularização, evolução e redução de custos dos microcontroladores tornam a opção por um controle digital não apenas uma alternativa viável mas a preferível para o problema em questão. O emprego de um microcontrolador pode trazer ao circuito um alto grau de compactação, precisão e confiabilidade, e dar ao projetista flexibilidade durante a etapa de desenvolvimento, tanto na realização de testes como de modificações no projeto.

2. CONTROLE POR CICLOS INTEIROS

2.1. Princípio de funcionamento [1]

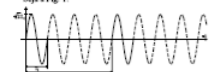
Seja a Fig. 1:


Fig. 1 - Formato dos pulsos de controle por ciclos inteiros.
Durante o intervalo T_1 , o valor eficaz da corrente na carga é igual a I_m . Durante o intervalo $(T-T_1)$ o valor eficaz da corrente é nulo. Definindo-se como o número de semiciclos aplicados à carga durante o tempo T_1 , e M o número de semiciclos da rede durante o tempo T , o valor eficaz da corrente I na carga para o período T pode ser calculado por:

$$I = \sqrt{\frac{T_1}{T}} I_m \quad (1)$$

$$M = \frac{T_1}{T} = \frac{2\pi m}{2\pi M} \quad (2)$$

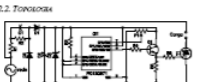
$$\text{com } (2) \text{ em } (1): I = \sqrt{\frac{2\pi m}{2\pi M}} I_m \quad (3)$$

$$A \text{ expressão } (3) \text{ indica que, se o número de ciclos } 2M \text{ for mantido constante, a potência transferida à carga pode ser controlada pelo número de pulsos } 2m: \quad (4)$$

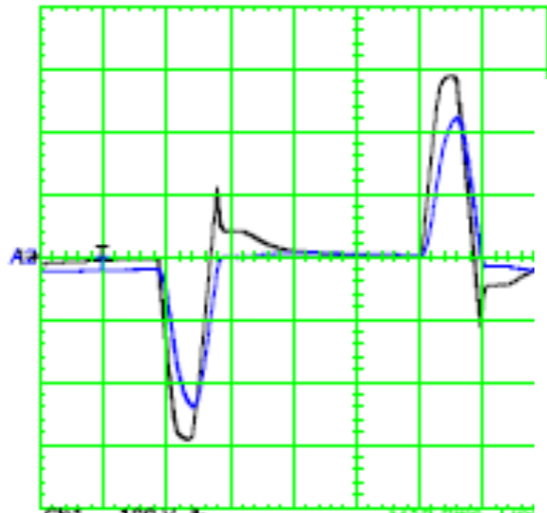
$$P = R I^2 = \frac{2\pi m}{2\pi M} R I_m^2$$

$$\text{Seja: } P_1 = R I_1^2 \quad (5)$$

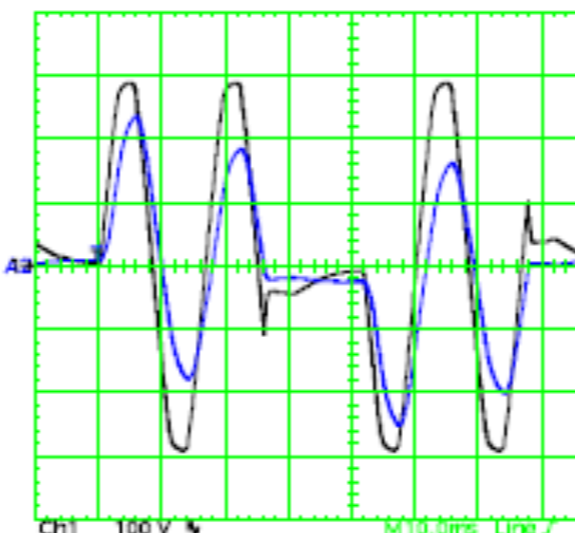
$$\text{Então: } \frac{P}{P_1} = \frac{2\pi m}{2\pi M} \quad (6)$$



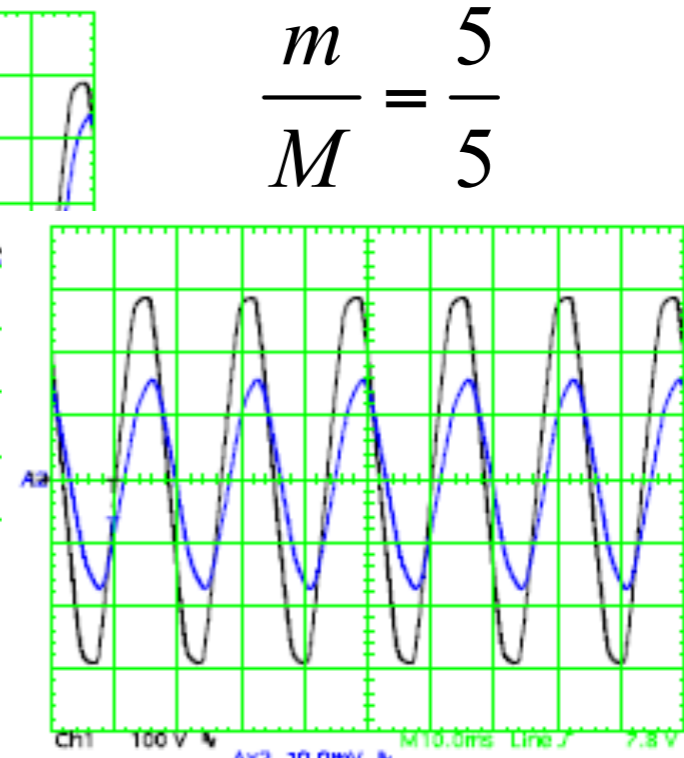
O diagrama esquemático do circuito é mostrado na Fig. 2. A energia é fornecida à carga através do triac T1. R4, R5, R6 e Q1 formam um estágio amplificador que atua o gate de T1 com um nível adequado de corrente, a partir do sinal de comando fornecido pelo microcontrolador (pino GP2). A fonte de alimentação do circuito [3] é fornecida por R1, R2, C1, C2, D1, D2 e D3. Além do pino GP2, sendo como saída, outros dois pinos do microcontrolador são usados como entrada: GP3, utilizado na detecção da passagem por zero da tensão da rede [4] e AN1, entrada analógica utilizada para a leitura da posição do potenciômetro P1. E a partir desta entrada que se obtém o valor de m (semiciclos transmitidos à carga), sendo o valor de M (número total de semiciclos) estabelecido no programa do microcontrolador. O controle é realizado sobre os meios ciclos da rede, o que permite um ajuste mais fino da potência. Em contrapartida, a aplicação de um número ímpar de semiciclos à carga (valores ímpares de m) pode levar à presença de valores médios não nulos de corrente, o que pode ser controlado com o uso de um valor de M ímpar.



$$\frac{m}{M} = \frac{1}{5}$$



$$\frac{m}{M} = \frac{3}{5}$$



$$\frac{m}{M} = \frac{5}{5}$$

Próxima Aula

Conversores ca-ca:

- Controle por ângulo de fase.



<https://www.apc.com/>



<http://upsai.com.br/>



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

www.ProfessorPetry.com.br