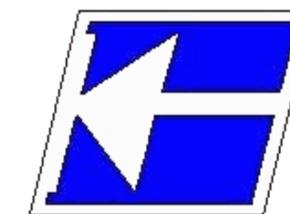




Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Processamento Eletrônico de Energia



Conversores CA-CA

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, setembro de 2020.

Curso Básico de Processamento Eletrônico de Energia

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



<https://www.youtube.com>

Esta aula está organizada em:

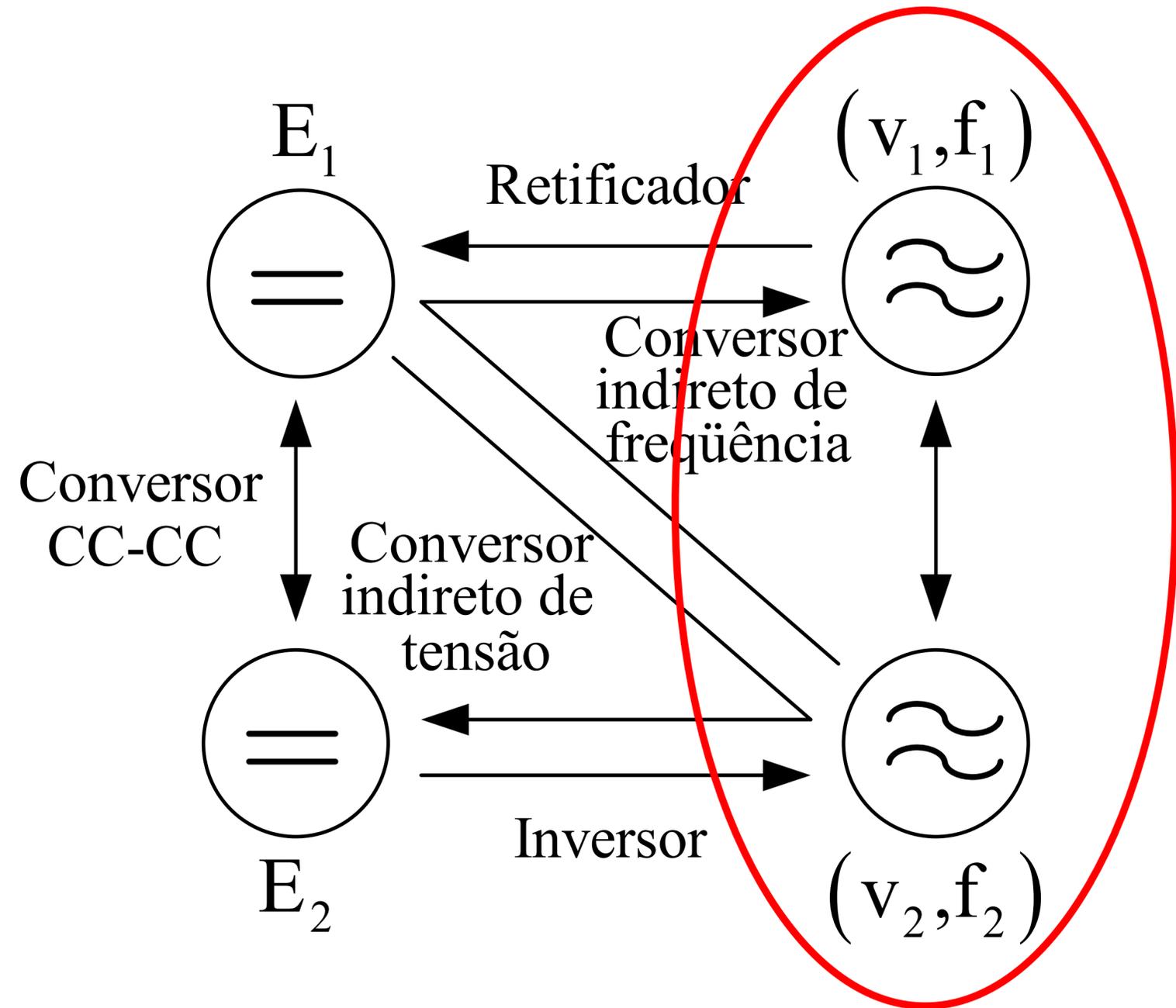
1. Introdução aos conversores ca-ca:
 - Introdução;
 - Principais características;
 - Aplicações.
2. Conversor ca-ca com tiristores;
 - Controle por ângulo de fase;
 - Controle por ciclos inteiros;
 - Gradador ca-ca.
3. Estabilizador ca-ca com relés;
4. Estabilizador ca-ca com tiristores;
5. Estabilizador ca-ca com transistores
6. Conversores ca-ca indiretos.



Os conversores ca-ca são utilizados, por exemplo, para alimentação de cargas sensíveis.



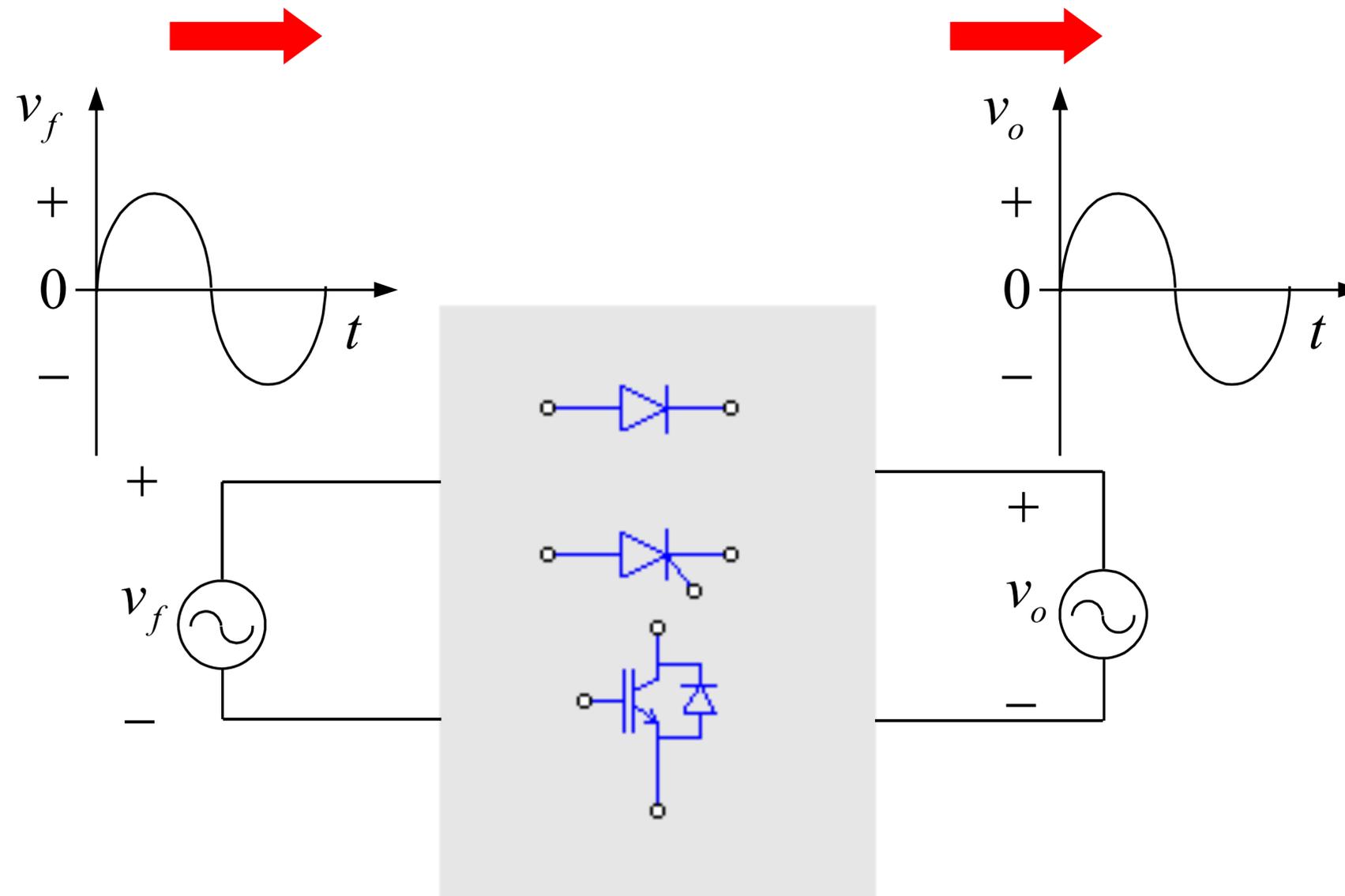
Conversores CA-CA



Conversores CA-CA

Princípio geral:

- Controla o fluxo de potência entre duas fontes de tensão alternada.



Conversores CA-CA

Algumas características:

- Número de fases;
- Direcionalidade do fluxo de energia;
- Frequência de comutação dos interruptores;
- Estratégia de comutação;
- Isolamento;
- Sistema de controle;
- Perdas na comutação;
- Aplicações dos conversores CA-CA.

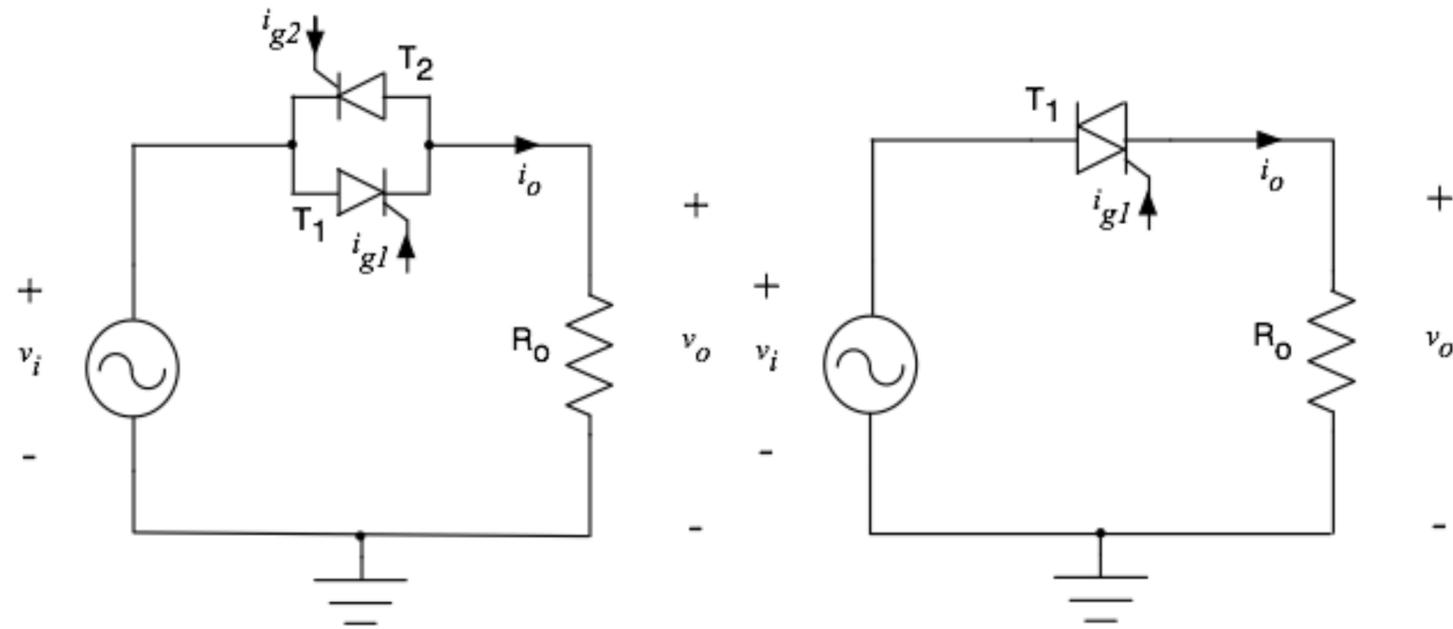


<https://www.amazon.com.br>

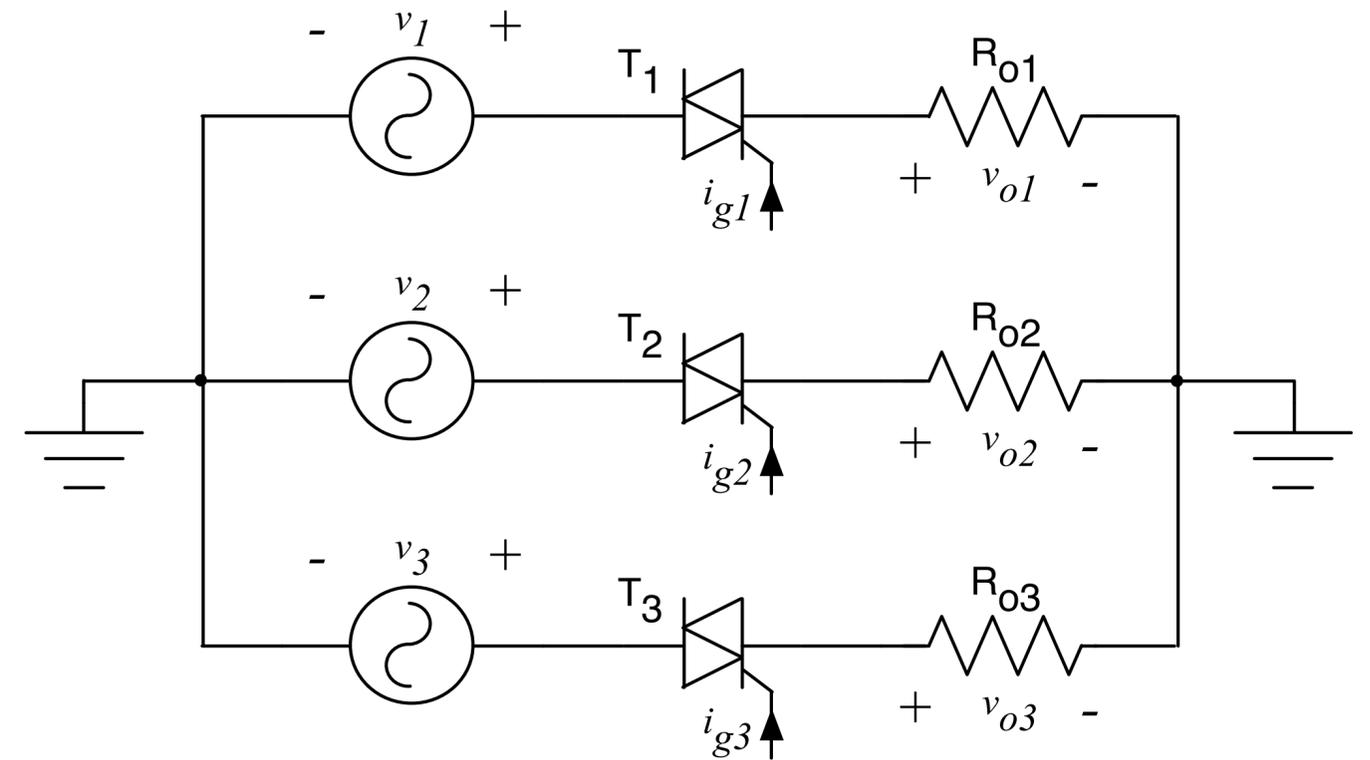
<https://www.americanas.com.br>

Conversores CA-CA

Número de fases:



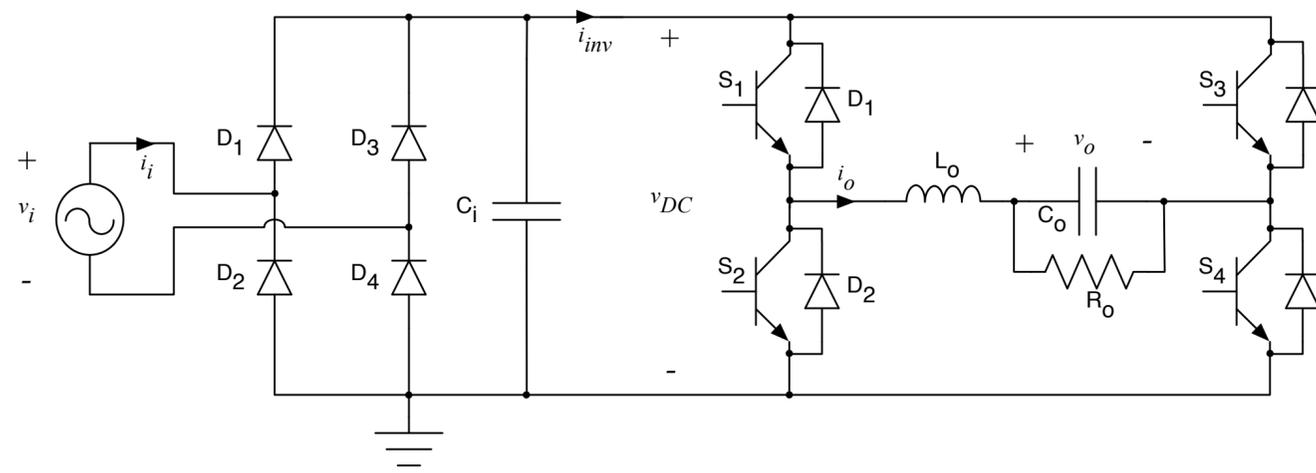
Conversores monofásicos



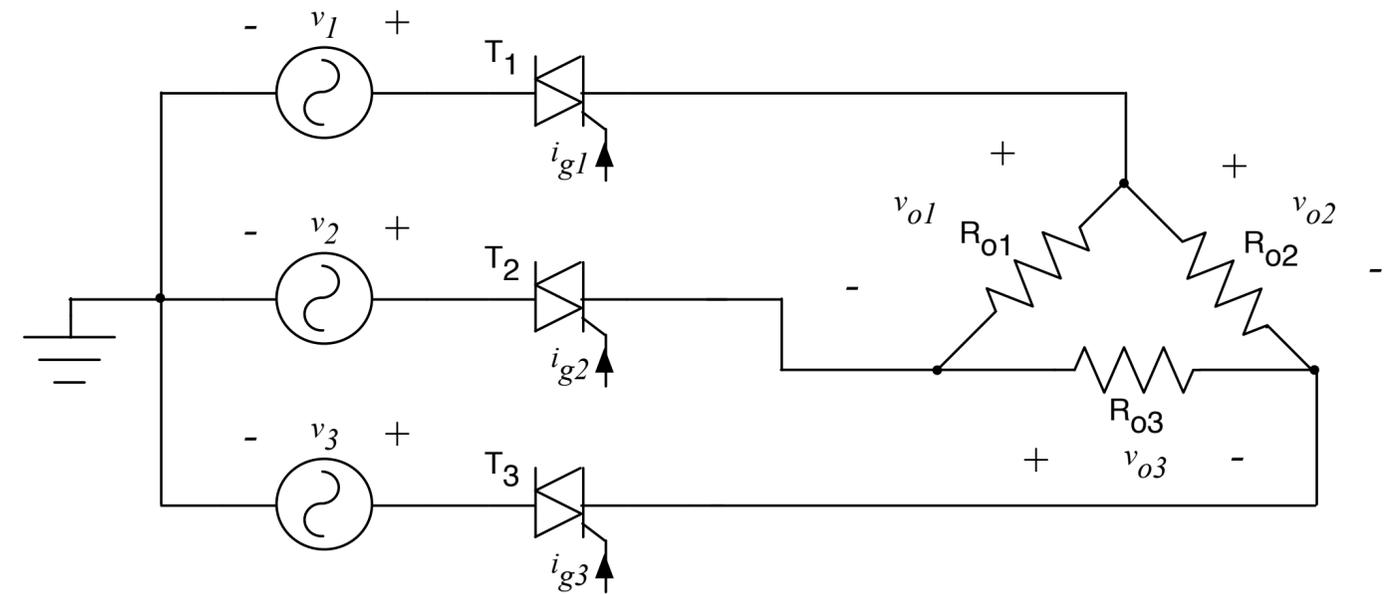
Conversor trifásico

Conversores CA-CA

Fluxo de energia:



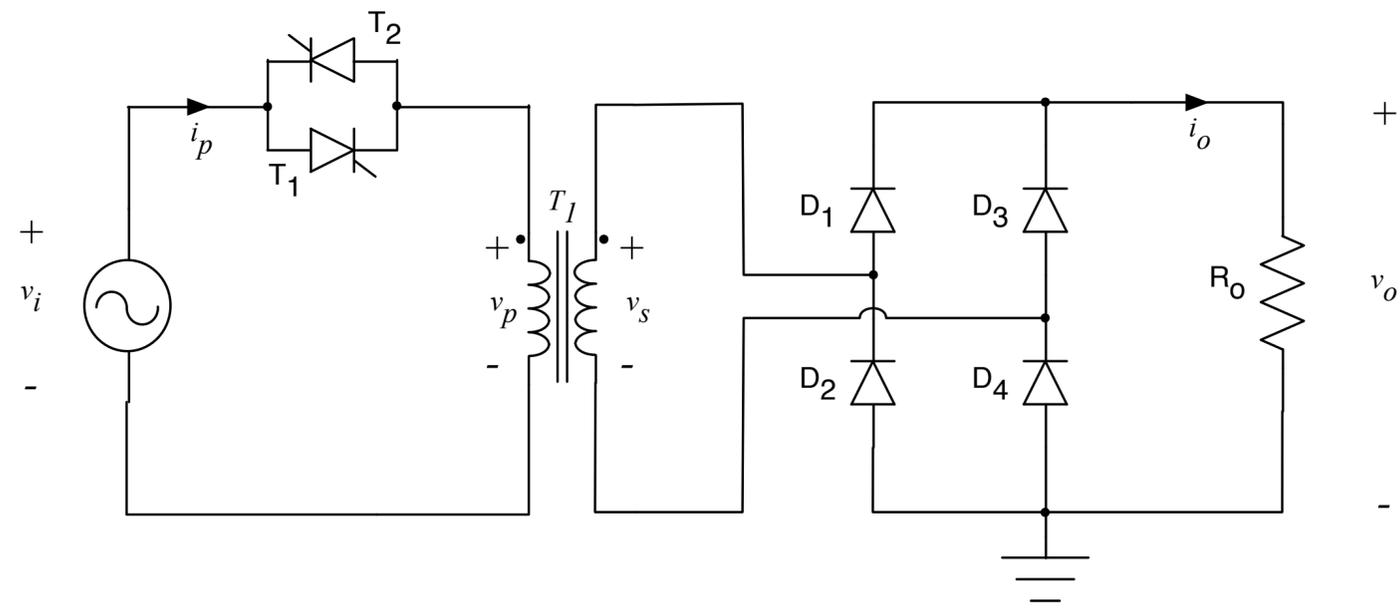
Conversor unidirecional



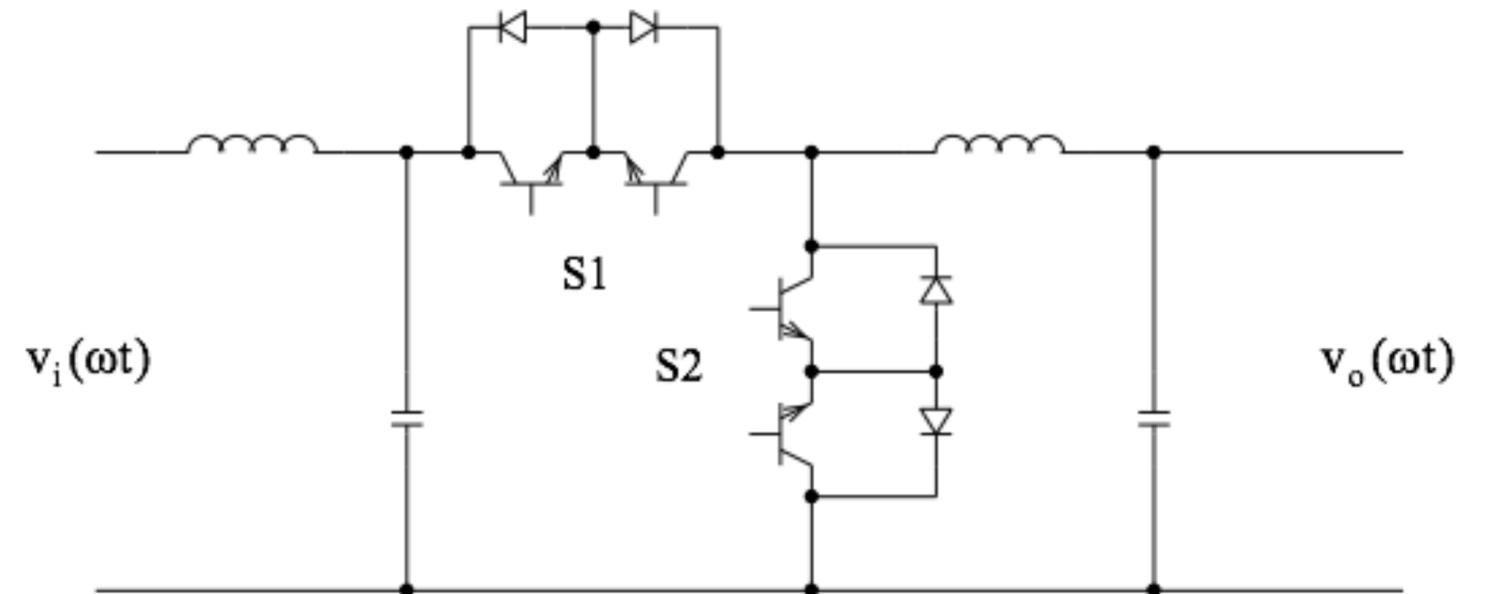
Conversor bidirecional

Conversores CA-CA

Frequência de comutação:



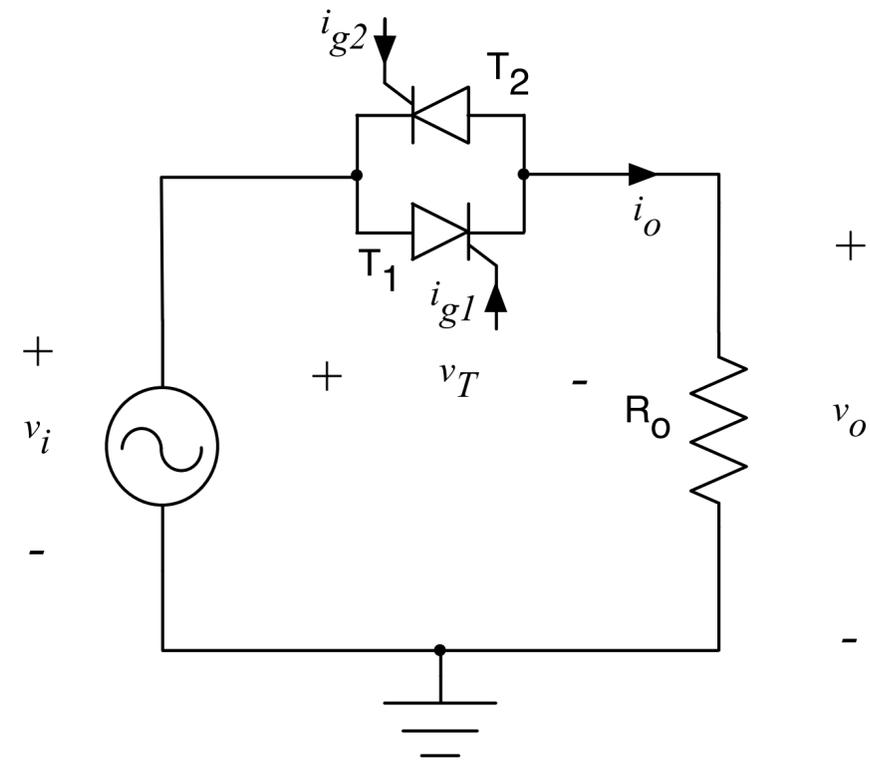
Baixa frequência



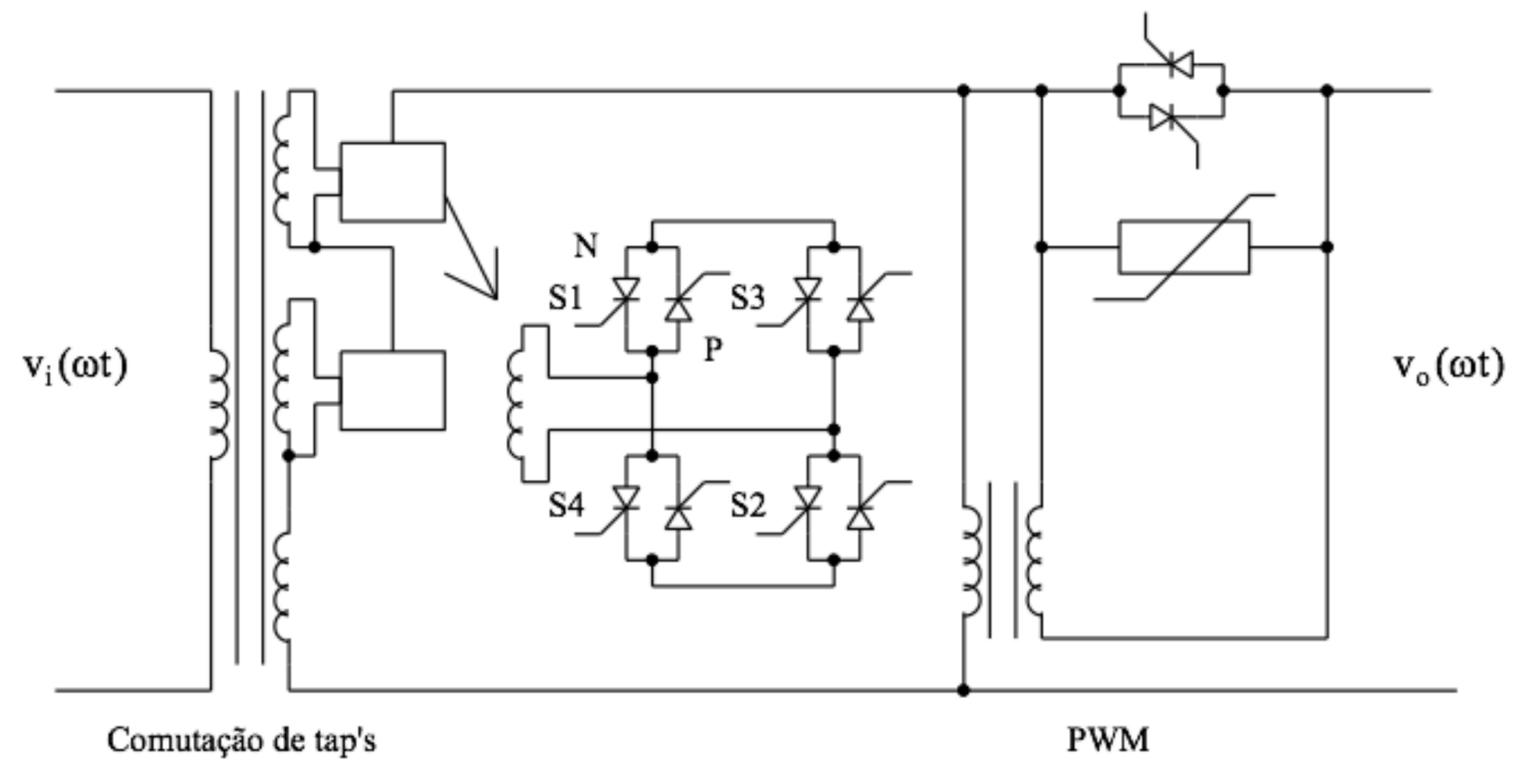
Alta frequência com modulação PWM

Conversores CA-CA

Isolamento:



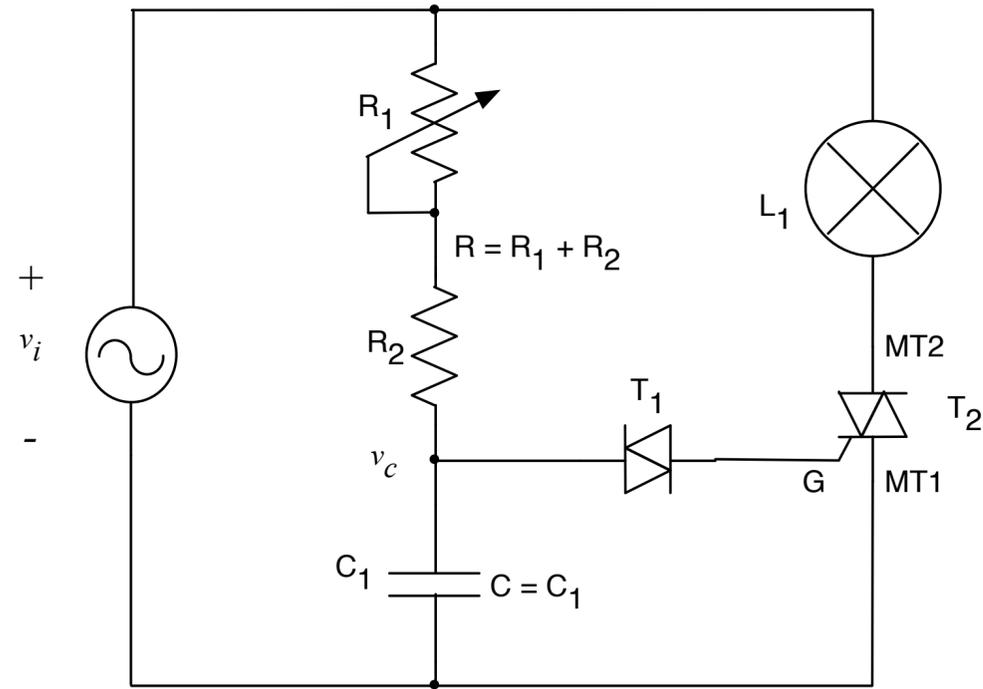
Conversor não-isolado



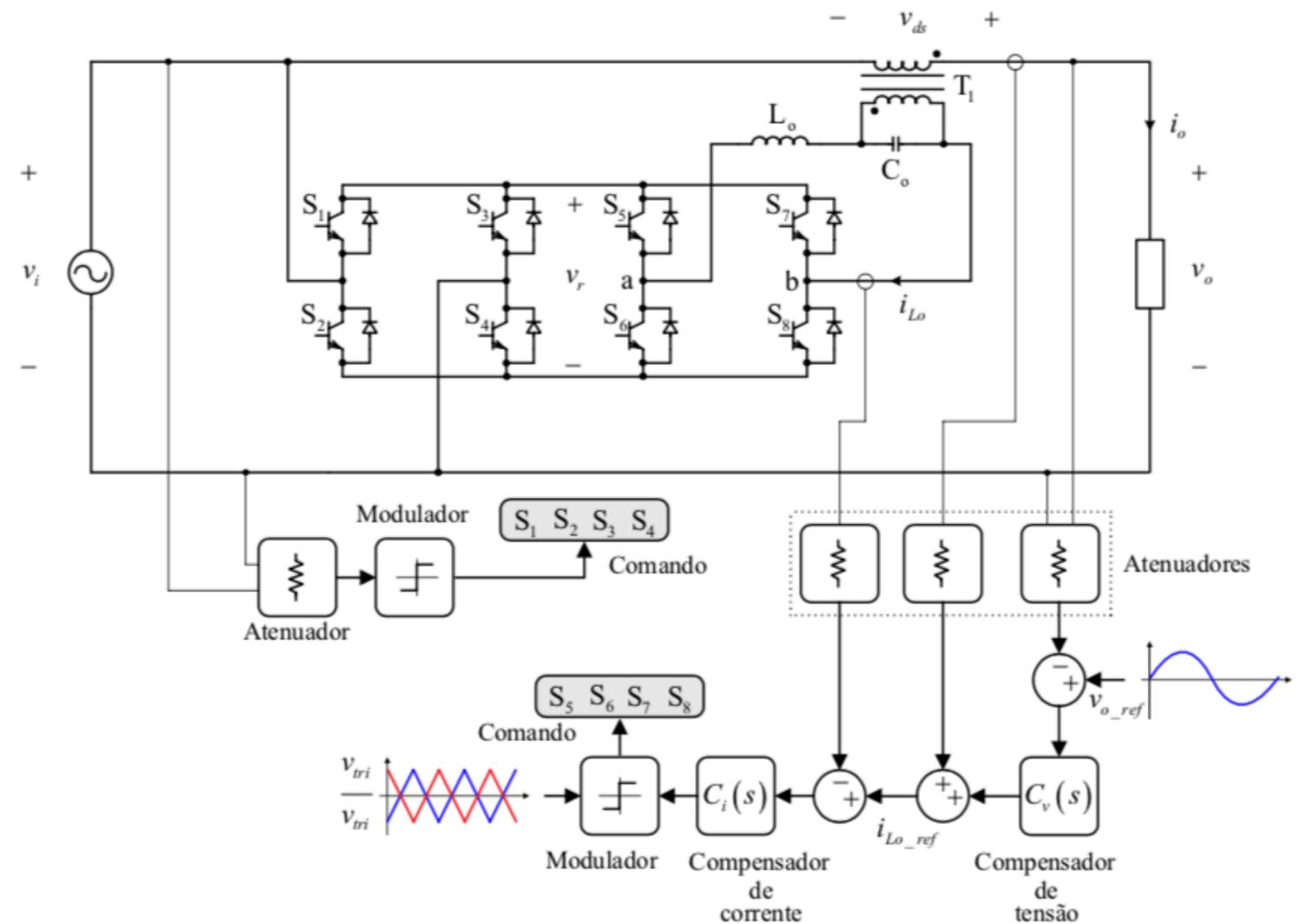
Conversor isolado

Conversores CA-CA

Controle:

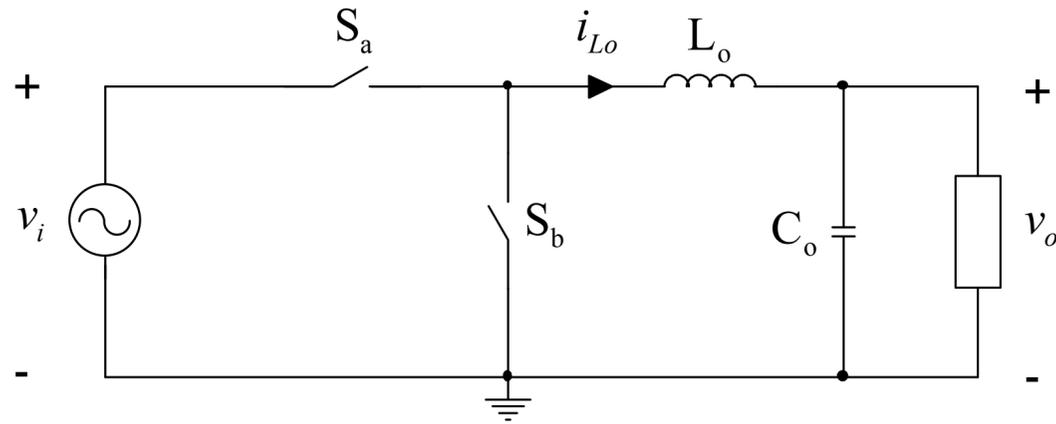


Malha aberta

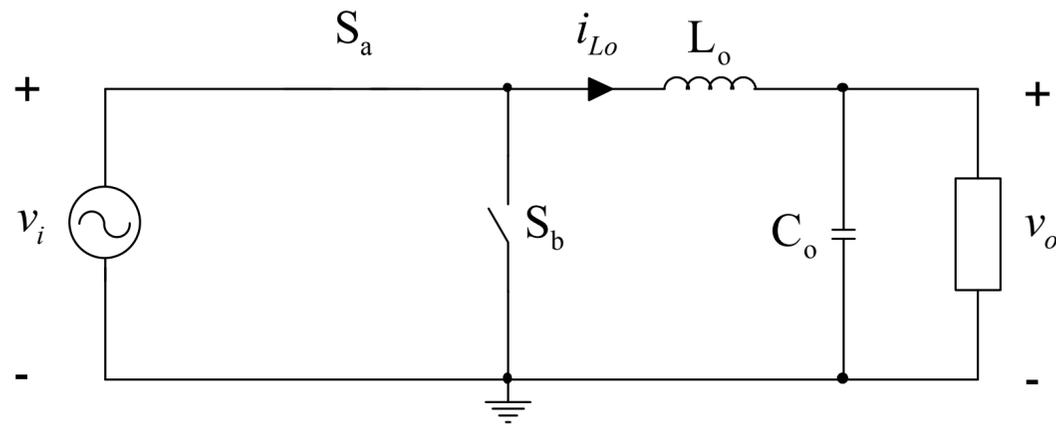


Controle multimalhas

Comutação:

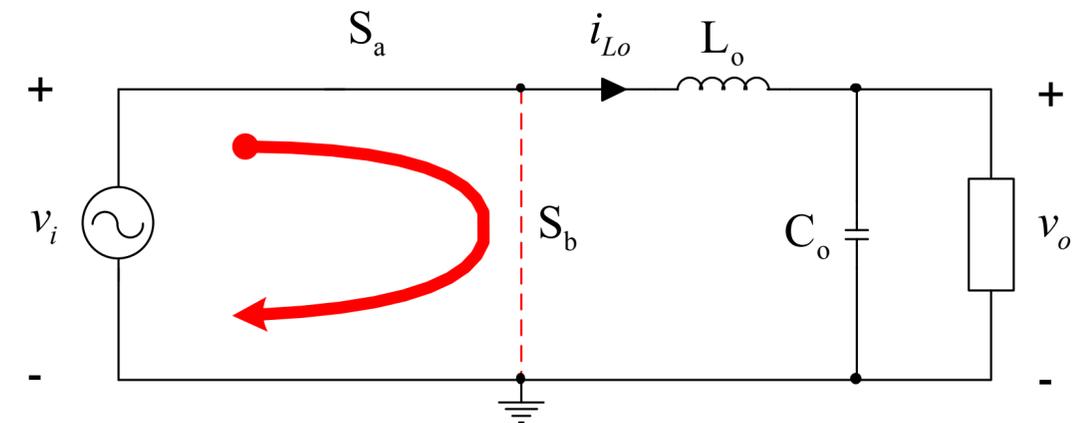


Conversor CA-CA PWM

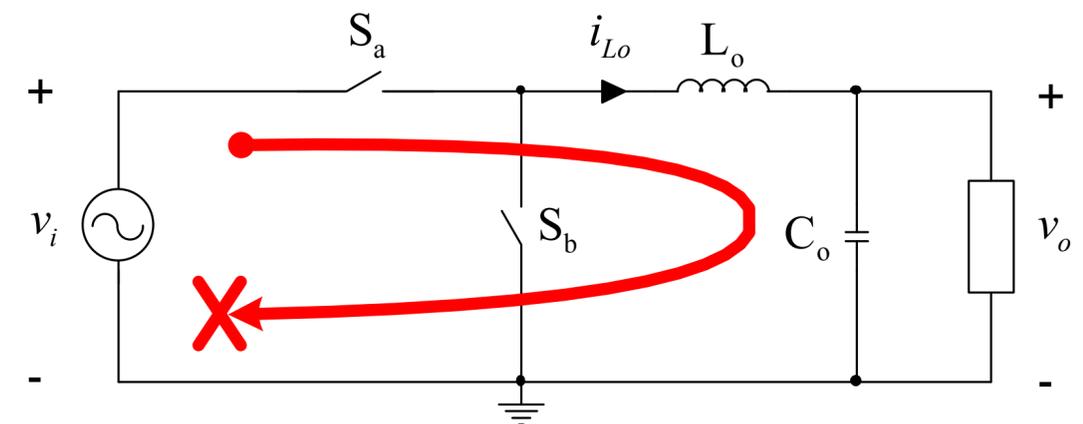


Comutação de S_a para S_b :

1. Abrir S_a e depois fechar S_b ;
2. Fechar S_b e depois abrir S_a .



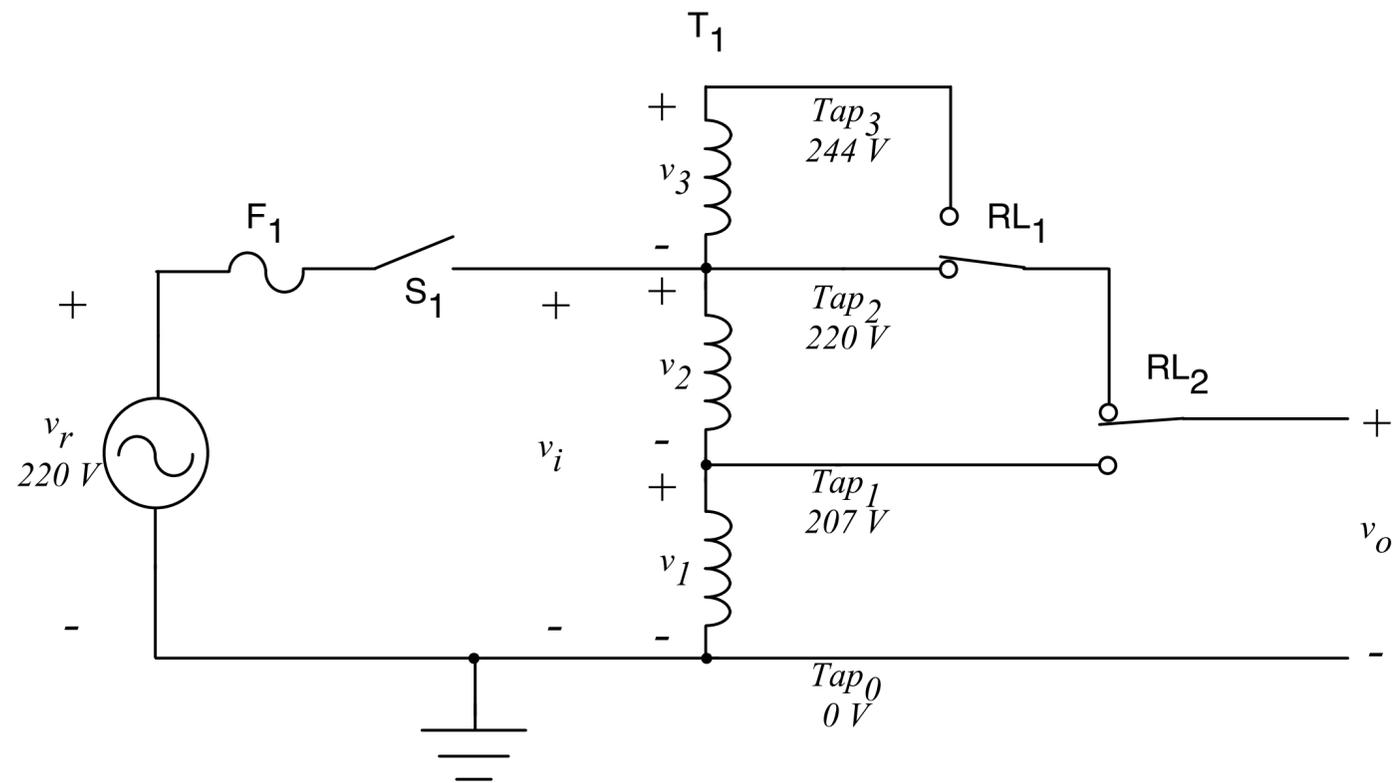
Opção 1: curto-circuito > sobrecorrente



Opção 2: circuito aberto > sobretensão

Conversores CA-CA

Comutação:



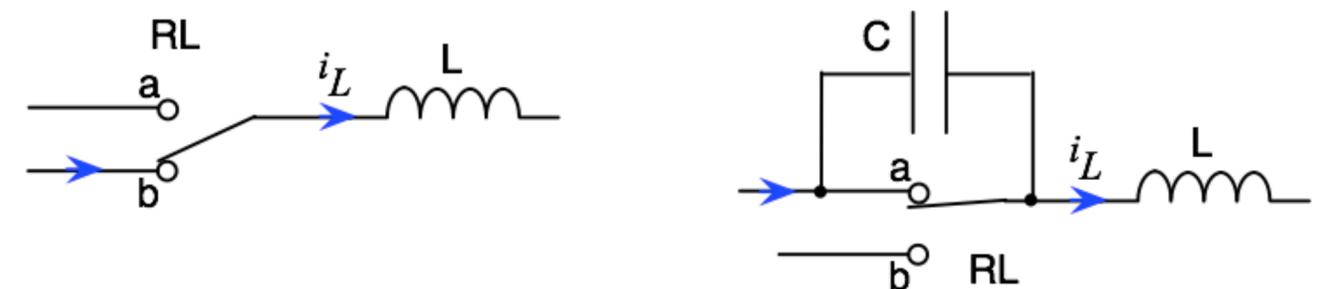
Conversor CA-CA com relés

Problemas x vantagens:

- Tempo de comutação dos relés;
- Espaço entre os contatos, abrindo o circuito;
- Vida útil dos relés;
- Simplicidade do circuito;
- Facilidade de implementação.



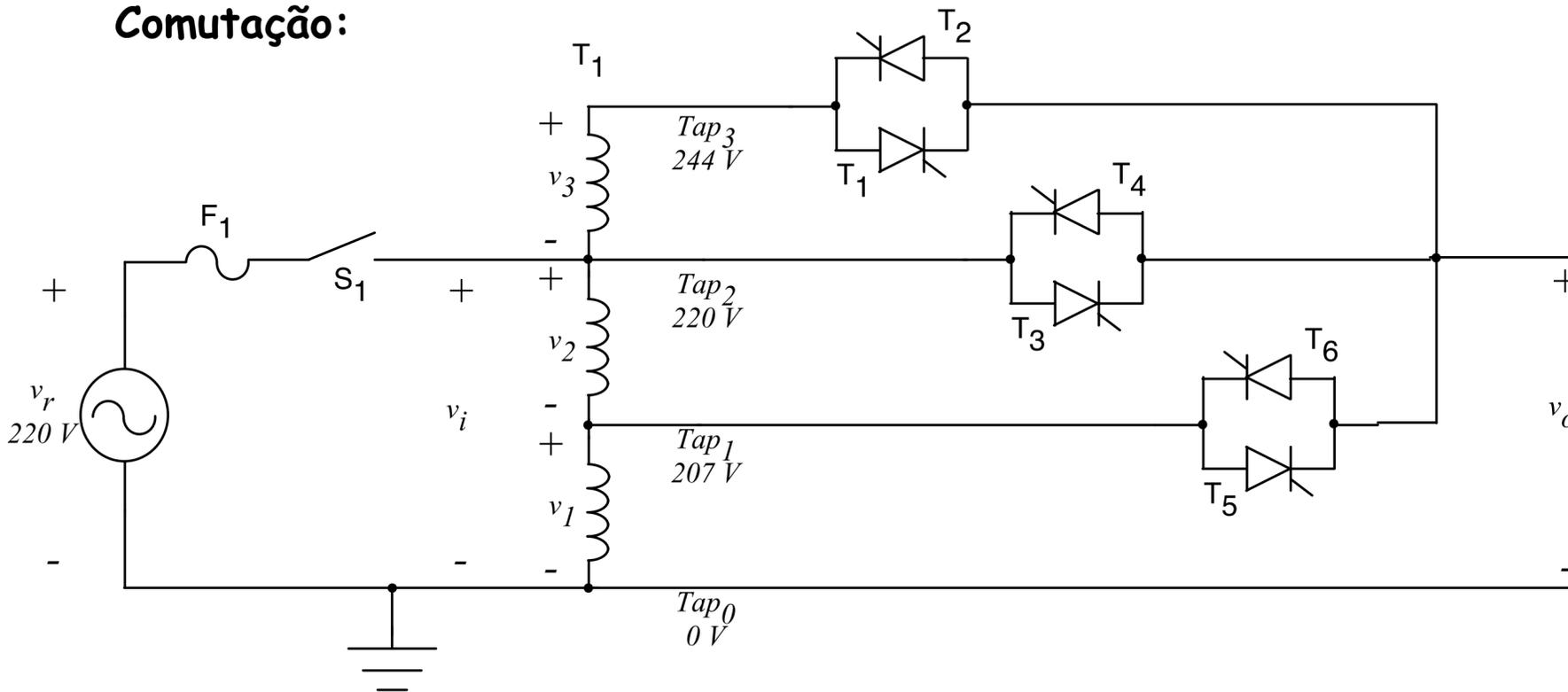
Comutação do relé com carga indutiva



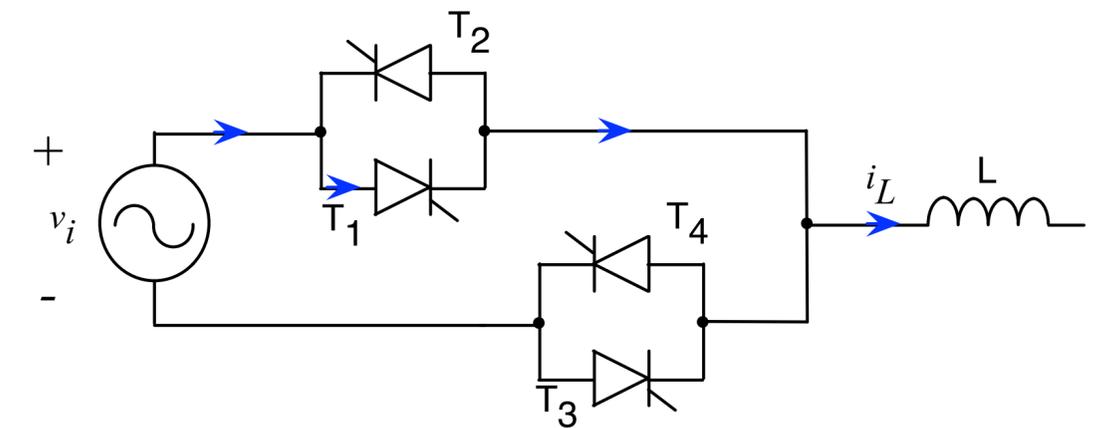
Comutação do relé com carga indutiva

Conversores CA-CA

Comutação:



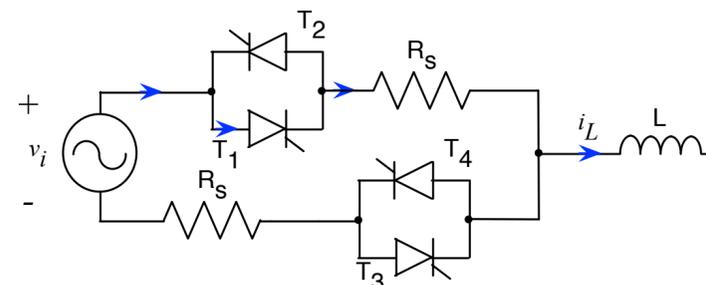
Conversor CA-CA com tiristores



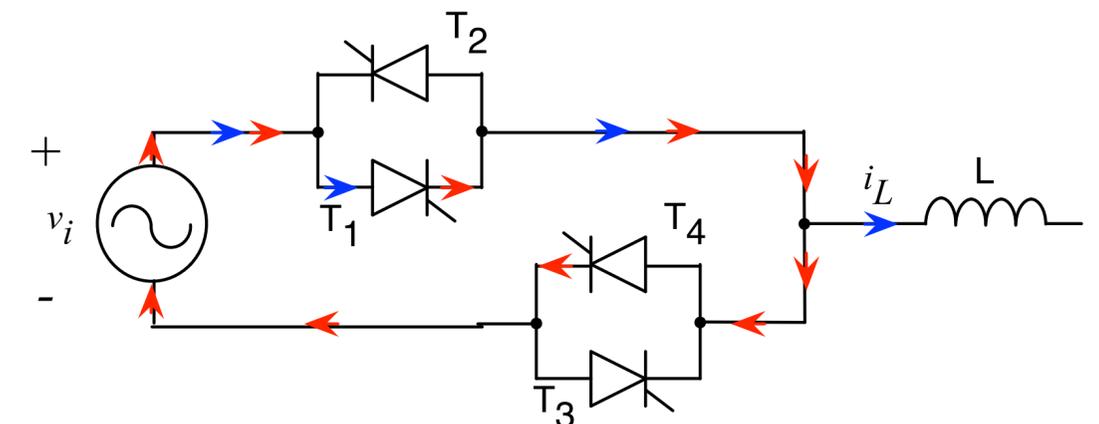
Comutação dos tiristores com carga indutiva

Problemas x vantagens:

- Atraso no bloqueio dos tiristores (quando a corrente se anula);
- Tempo de comutação dos tiristores;
- Robustez dos semicondutores;
- Preço dos componentes;
- Capacidade de potência dos componentes.



Uso de resistência em série



Curto-circuito gerado na comutação dos tiristores

Aplicações de Conversores CA-CA

Algumas aplicações:

- Controle de intensidade luminosa;
- Controle de temperatura;
- Controle de velocidade de motores de indução;
- Limitação da corrente de partida de motores de indução;
- Estabilizadores de tensão;
- Filtros ativos;
- Pré-estabilização em fontes de alimentação e UPS;
- Economia de energia;
- Sistemas de potência;
- Entre outras.



<https://hydra-corona.com.br/>



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



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



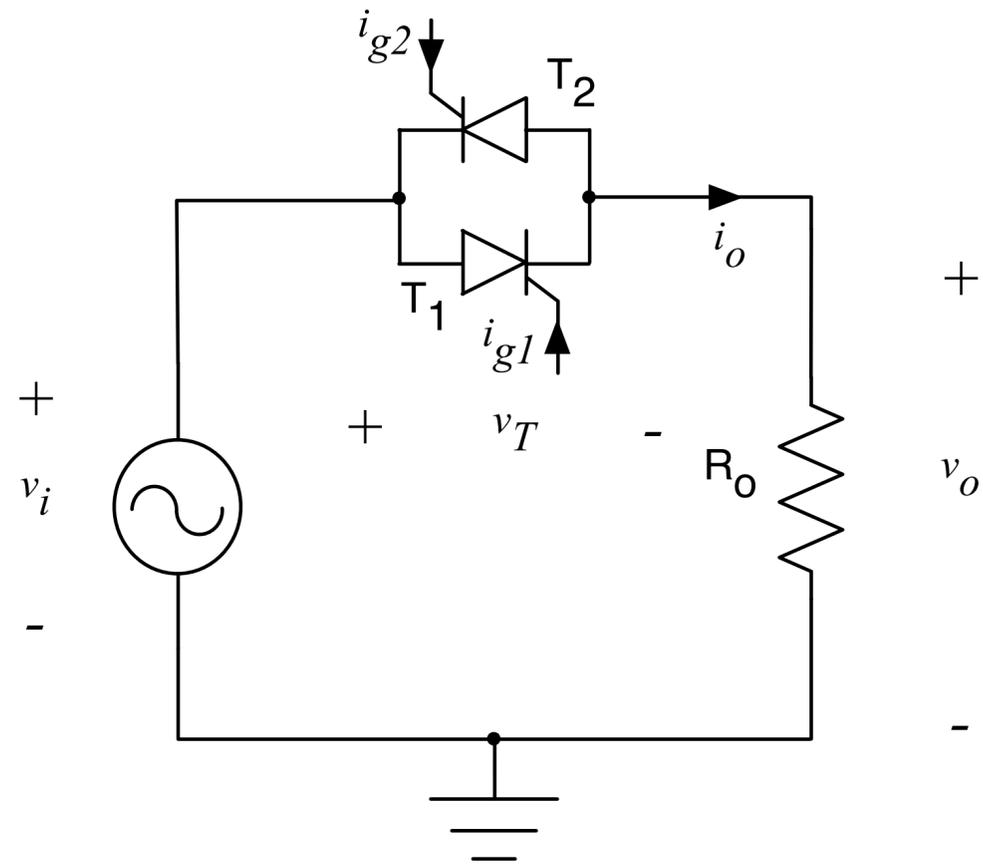
<https://www.zael.com.br/>



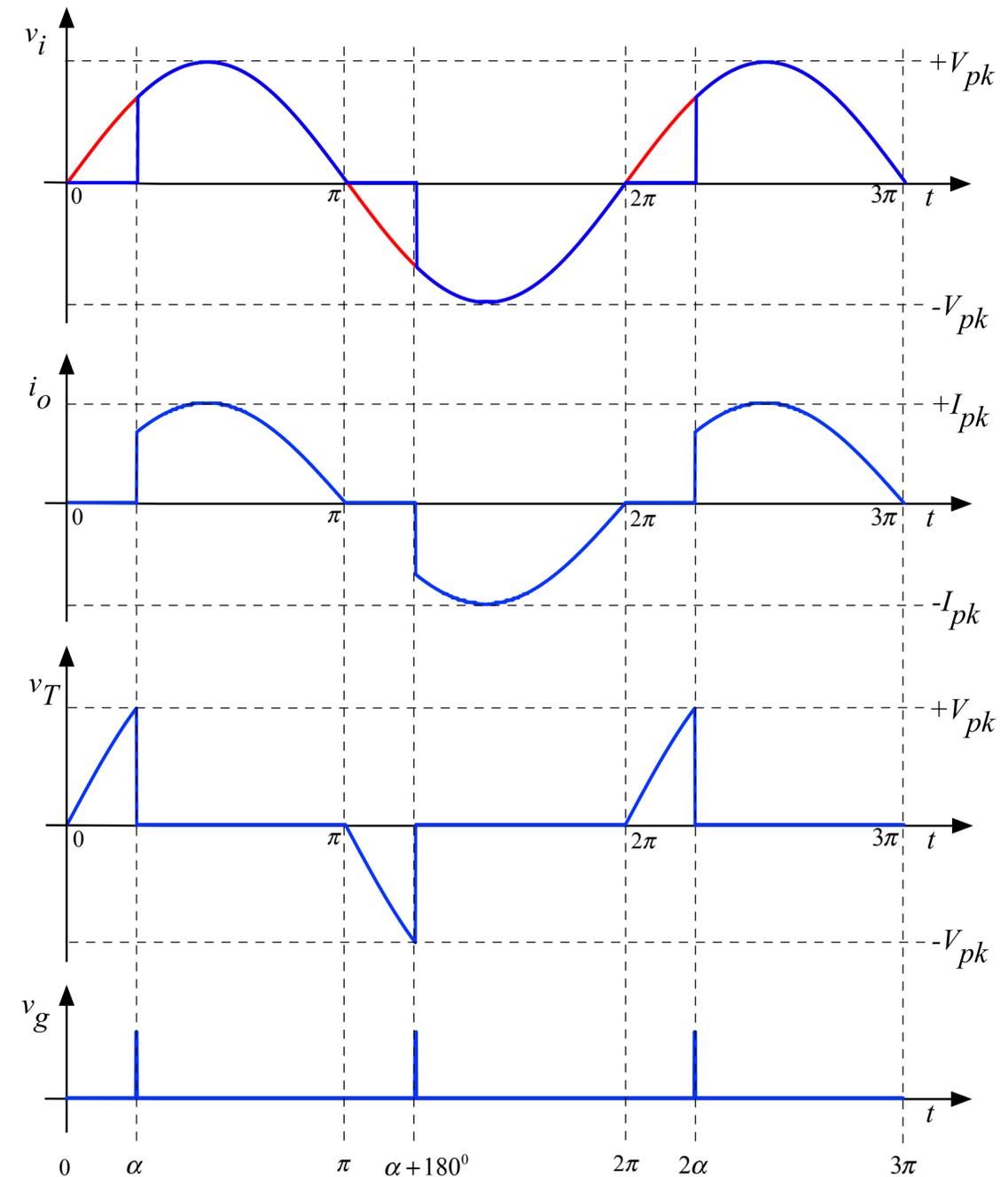
<https://www.weg.net/>

Conversor CA-CA com Tiristores

Conversor ca-ca - controle por ângulo de fase:

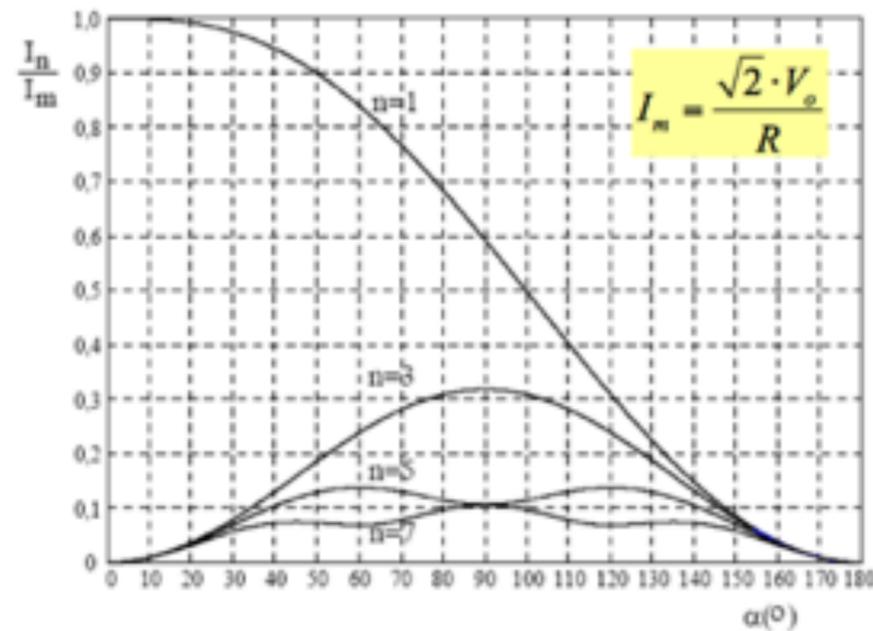


$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\text{seno}(2 \cdot \alpha)}{2 \cdot \pi}}$$



Conversor CA-CA com Tiristores

Conversor ca-ca - controle por ângulo de fase:



Conteúdo harmônico da corrente
Fonte: Barbi, 2005.

Exemplo de chuveiro com controle eletrônico:

- Tensão de 220 V;
- Potência de 4800 W.



<https://hydra-corona.com.br/>

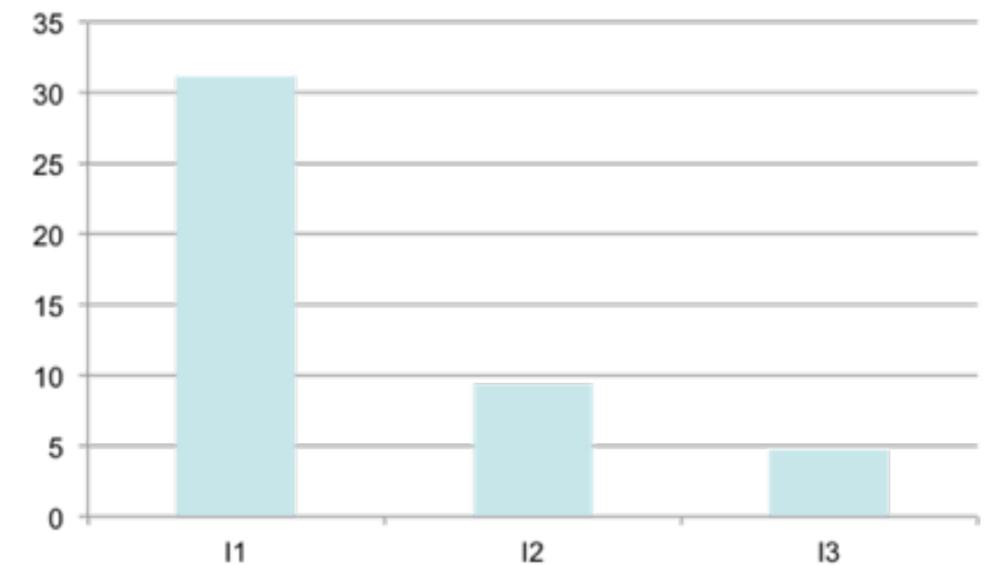
$$I_{o(ef)} = \frac{P_o}{V_{o(ef)}} = \frac{4800}{220} = 21,8 A$$

$$I_{o(pk)} = \sqrt{2} \cdot I_{o(ef)} = \sqrt{2} \cdot 21,8 = 30,8 A$$

$$I_1 = I_{(f=60Hz)} = I_{o(pk)} = 30,8 A$$

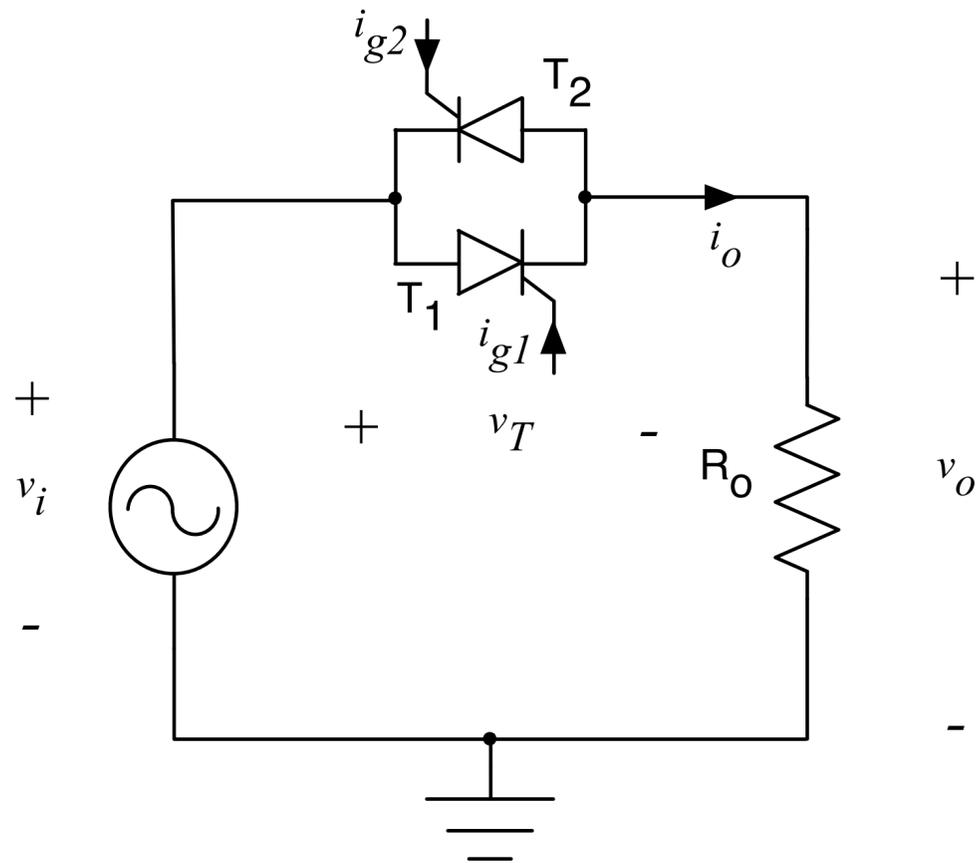
$$I_3 = I_{(3f=180Hz)} \cong 0,3 \cdot I_{o(pk)} = 9,24 A$$

$$I_5 = I_{(5f=300Hz)} \cong 0,15 \cdot I_{o(pk)} = 4,62 A$$

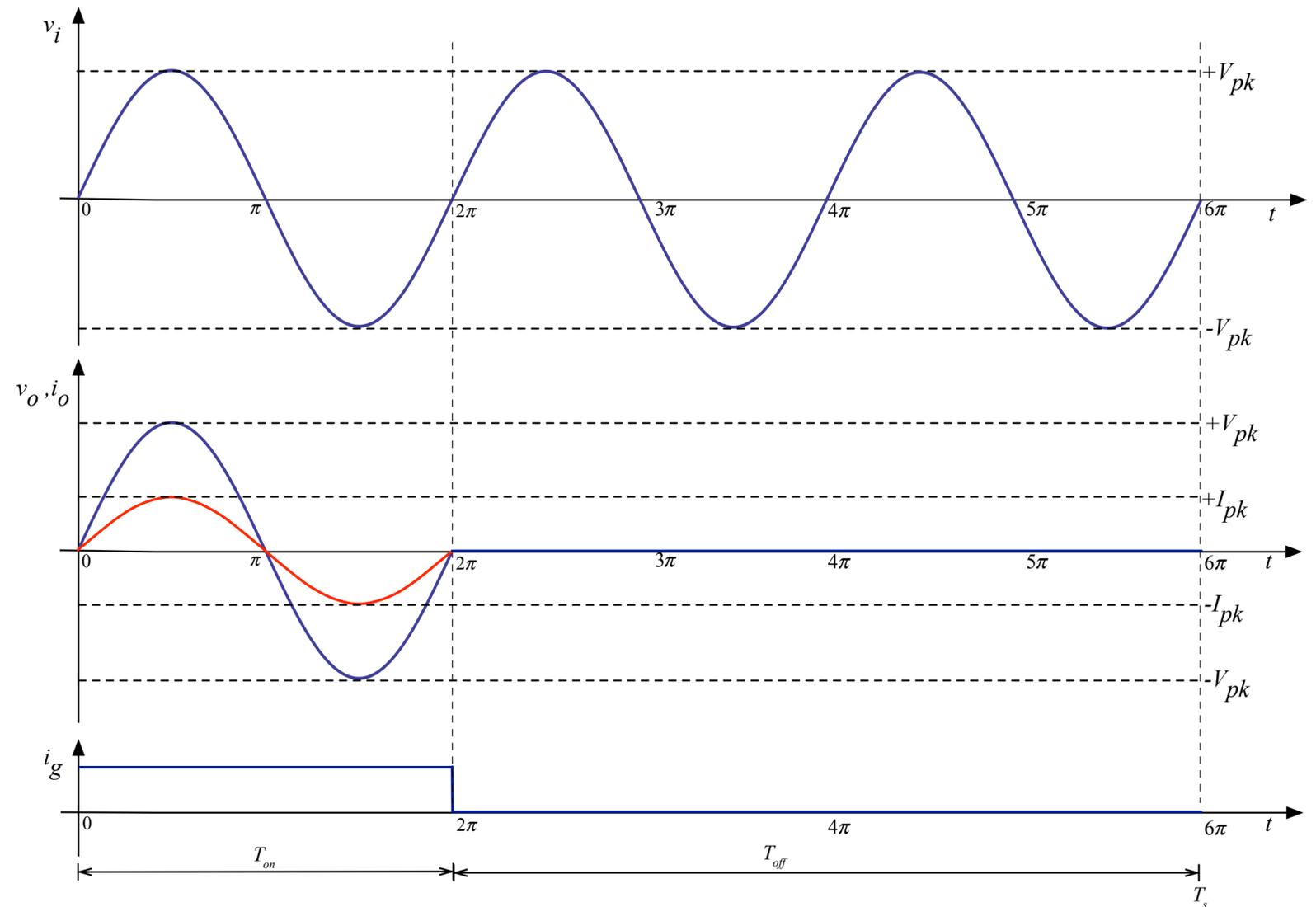


Conversor CA-CA com Tiristores

Conversor ca-ca - controle por ciclos inteiros:

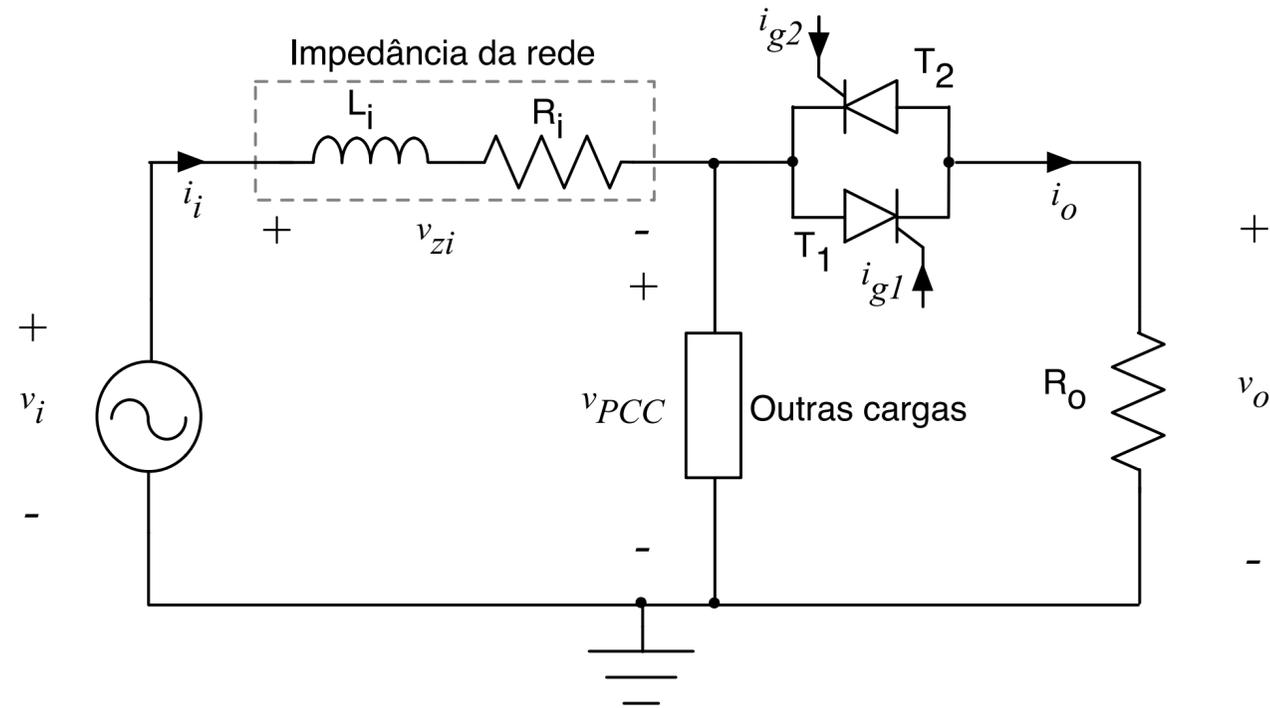


$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot \sqrt{\frac{m}{M}}$$

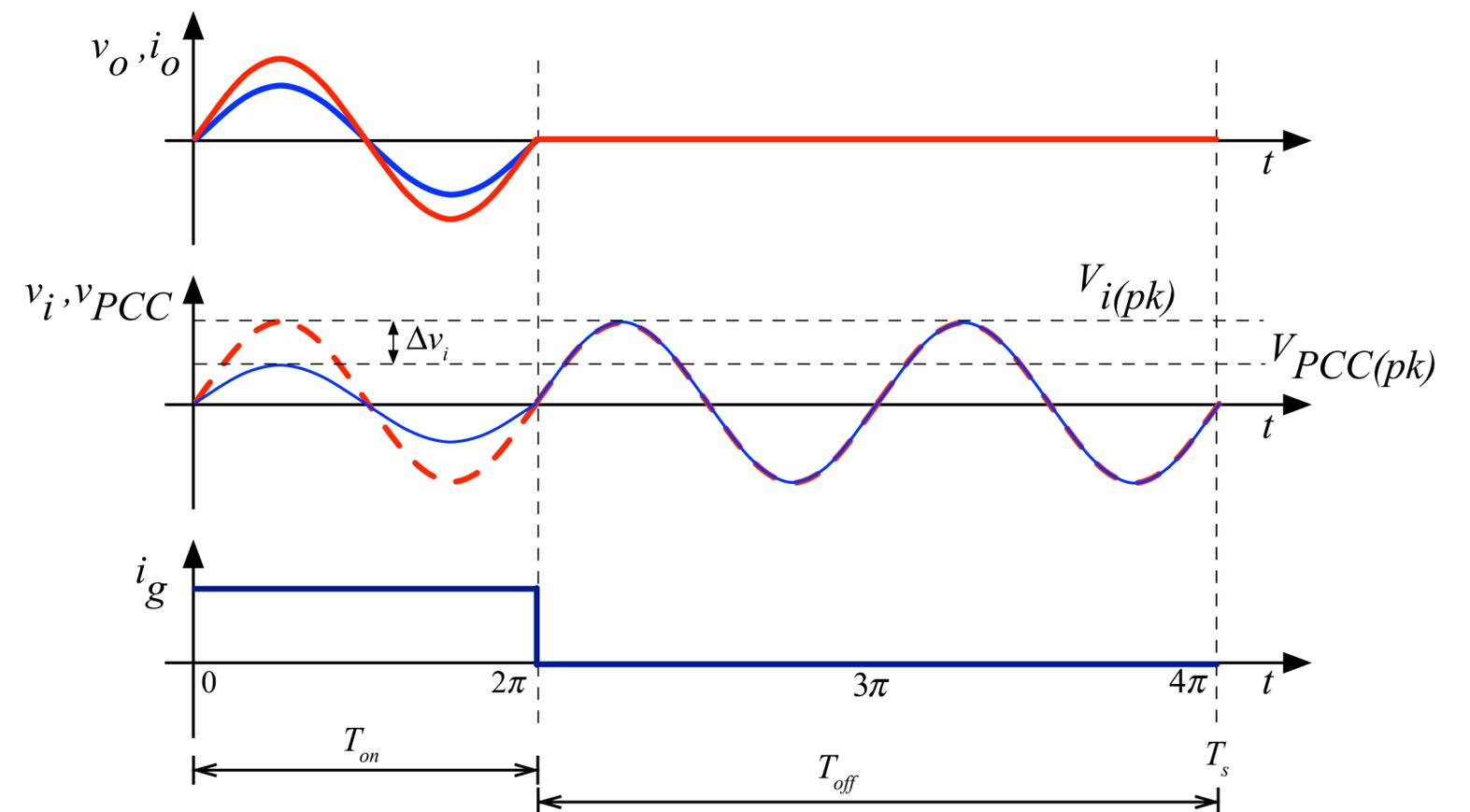


Conversor CA-CA com Tiristores

Conversor ca-ca - controle por ciclos inteiros:

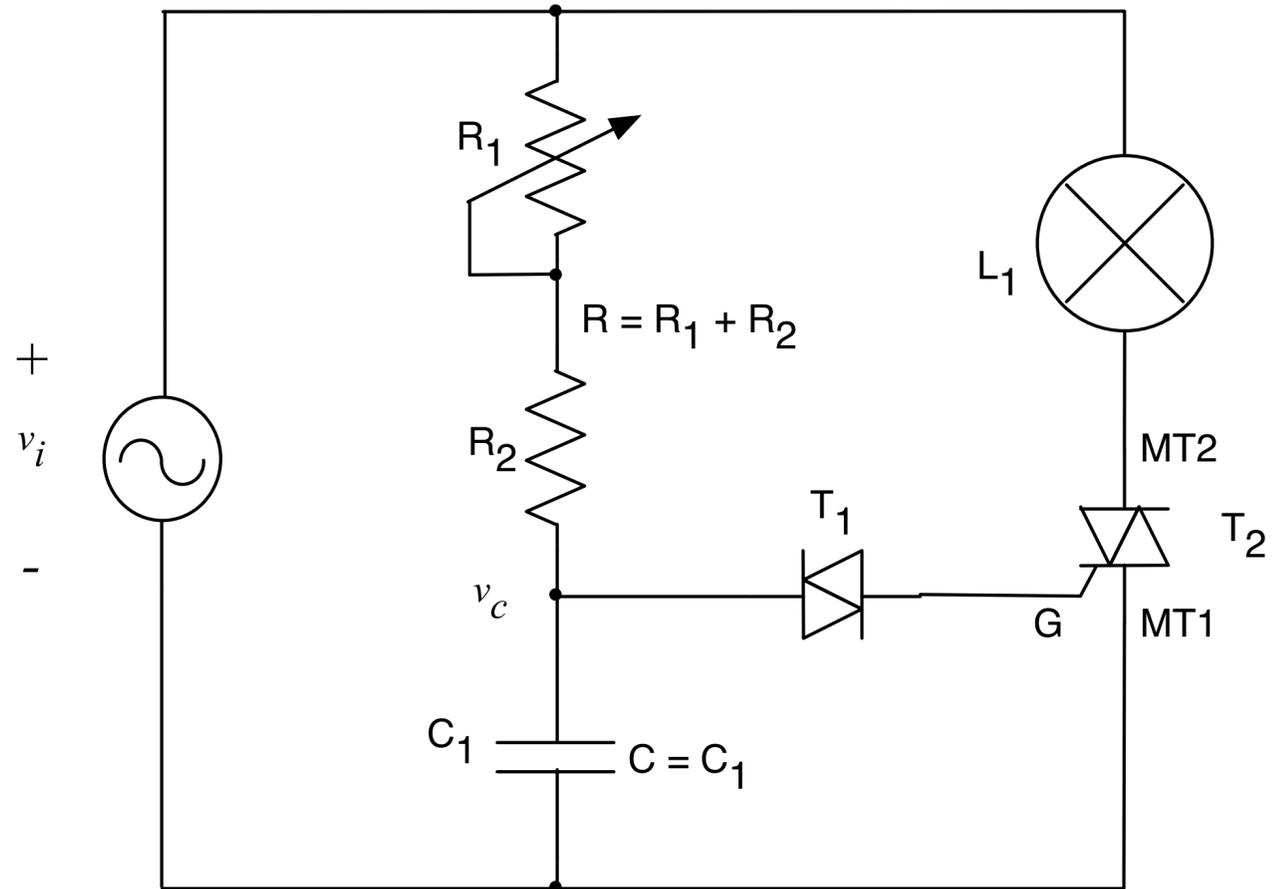


Circuito para estudo do efeito de cintilação

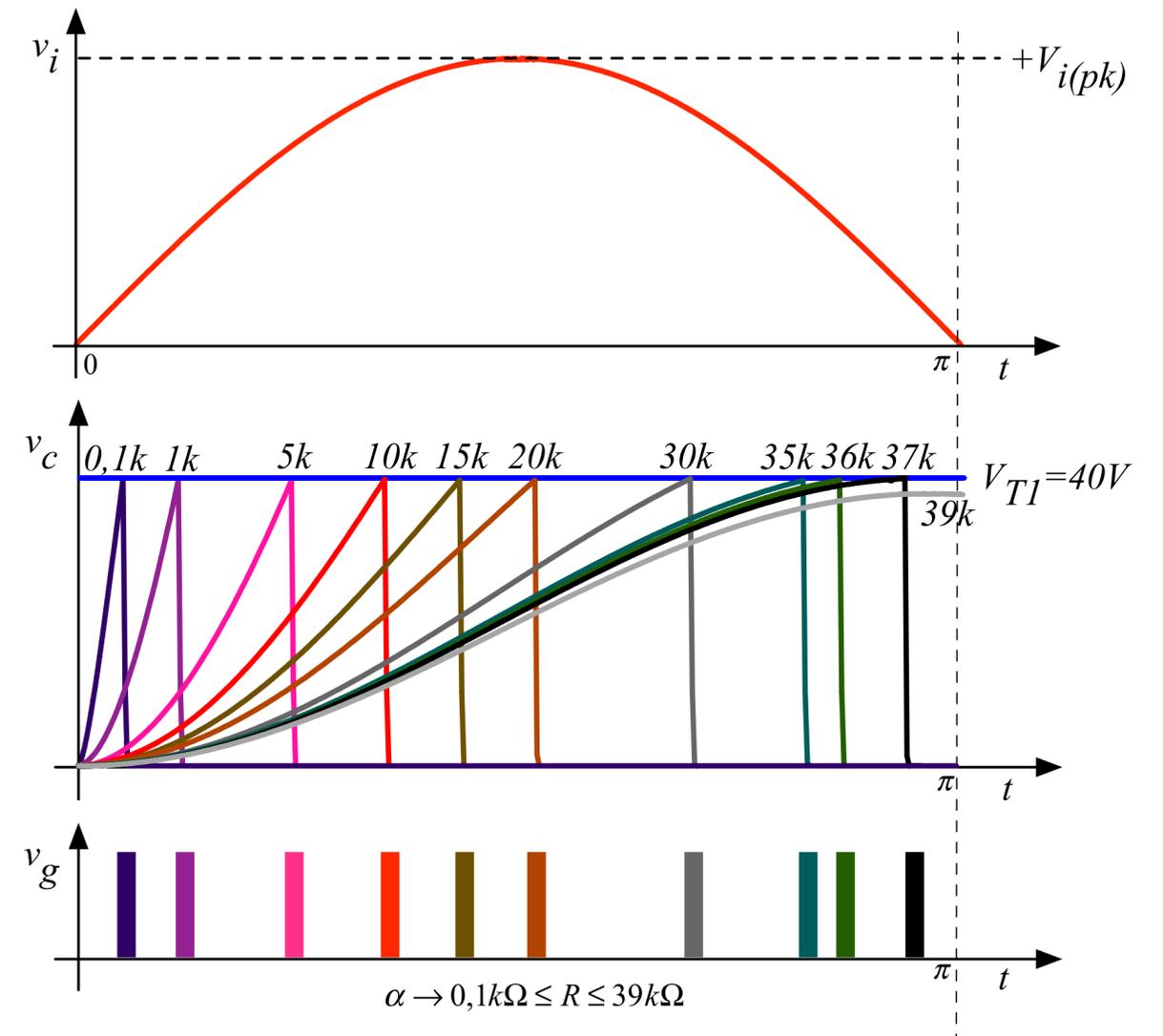


Conversor CA-CA com Tiristores

Gradador - controle por ângulo de fase:



Tensão de saída é função de R e C



Estabilizadores de Tensão CA-CA

Estabilizadores de tensão:

- 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.
- Aplicações de estabilizadores de tensão:
 - Cargas sensíveis;
 - Equipamentos médicos;
 - Laboratórios de ensaios;
 - Indústria de transformação e fabricação;
 - Proteção de cargas de alto valor agregado.



<https://www.se.com/br/pt/product-range/61878-estabilizadores/>



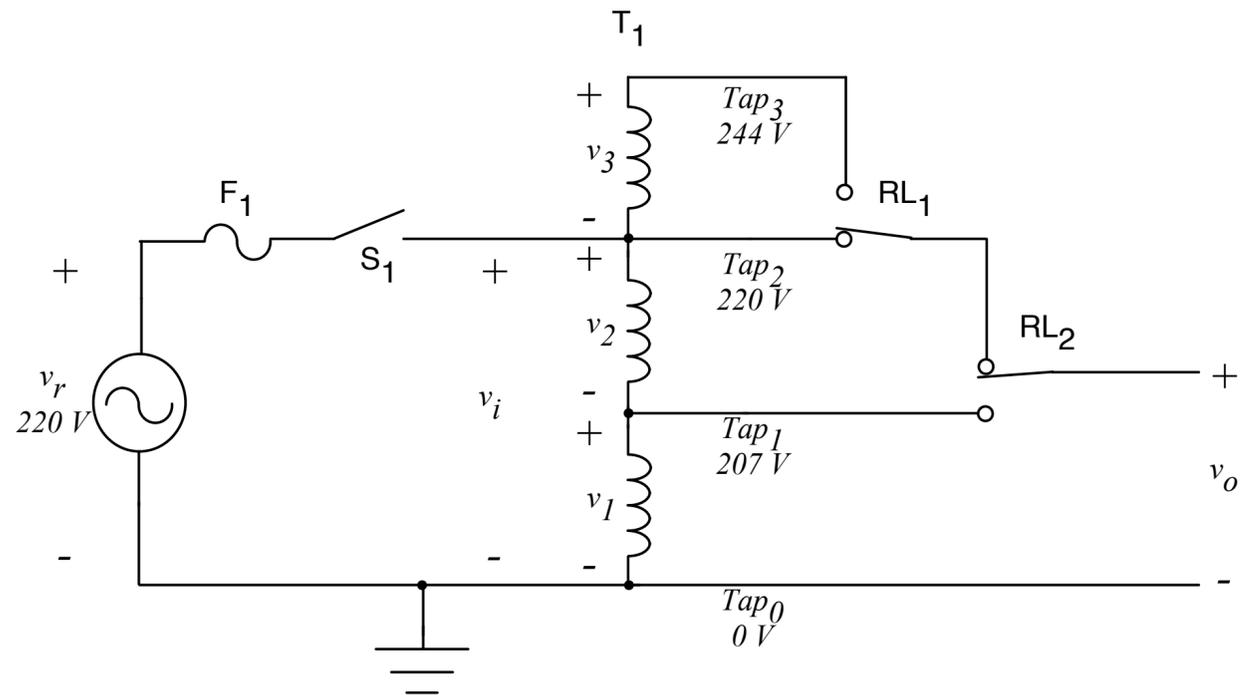
<https://www.engeblu.com.br/>



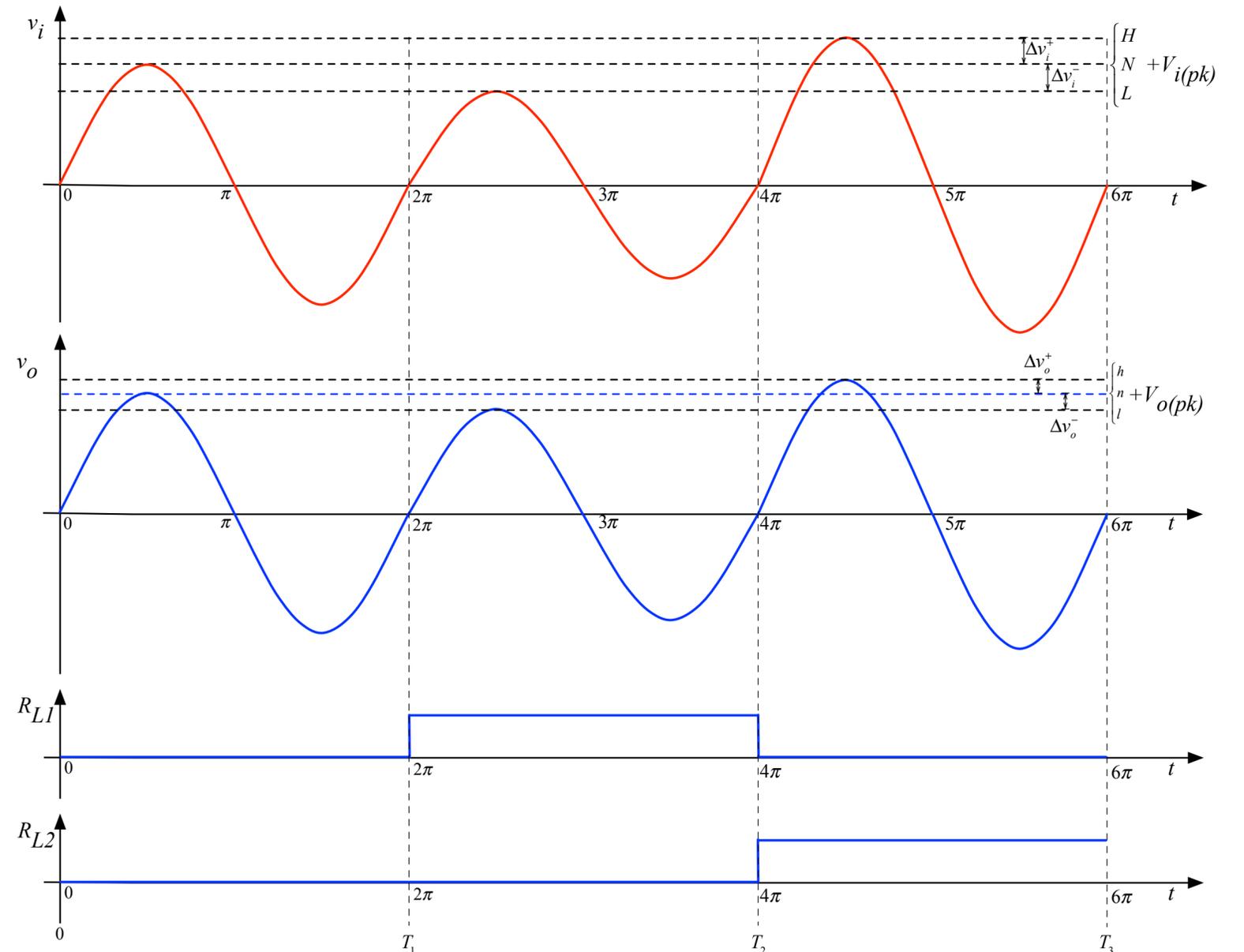
<https://www.zael.com.br/>

Estabilizadores de Tensão CA-CA

Estabilizador de tensão com relés:

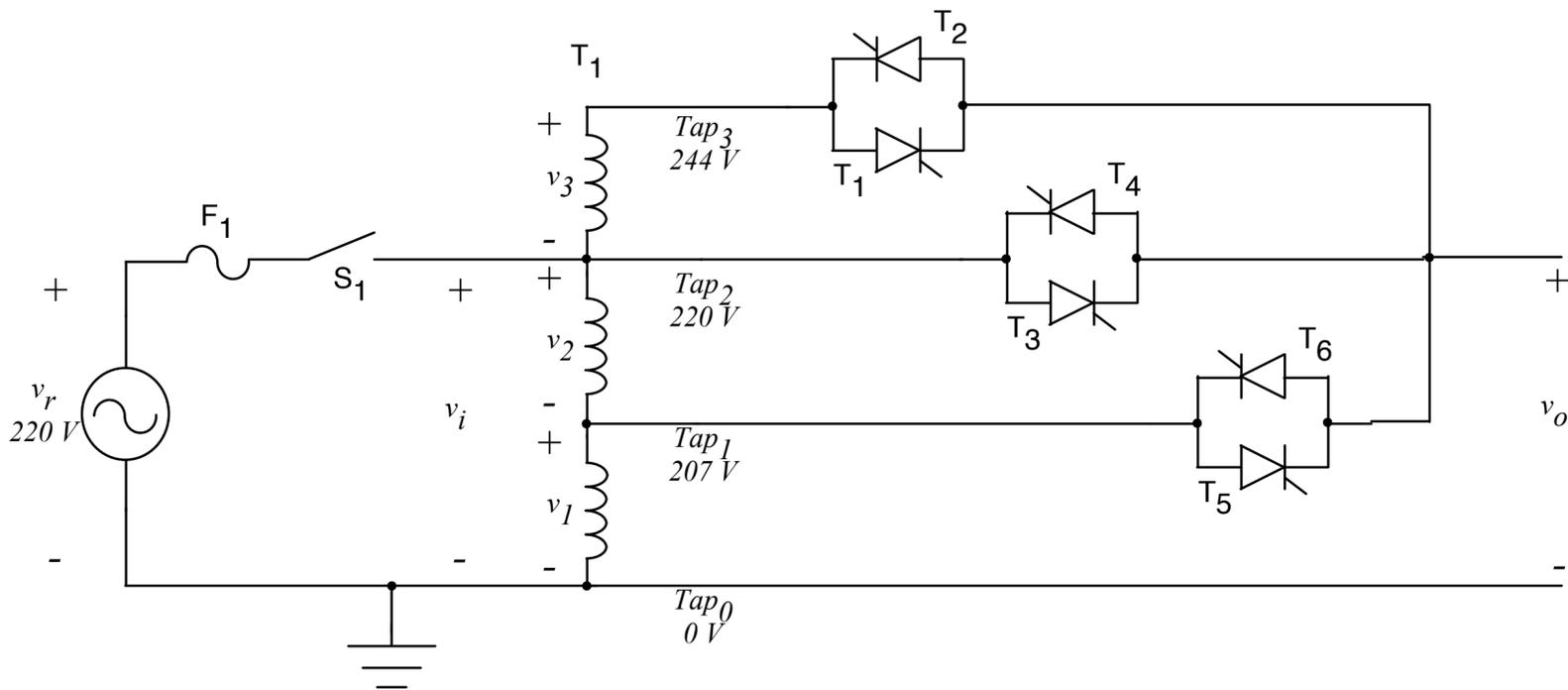


$$v_o = \begin{cases} v_o = v_i \rightarrow R_{L1} \text{ e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i + v_3 \rightarrow R_{L1} \text{ on e } R_{L2} \text{ off} \\ v_o = v_i - v_2 \rightarrow R_{L1} \text{ off e } R_{L2} \text{ on} \end{cases}$$

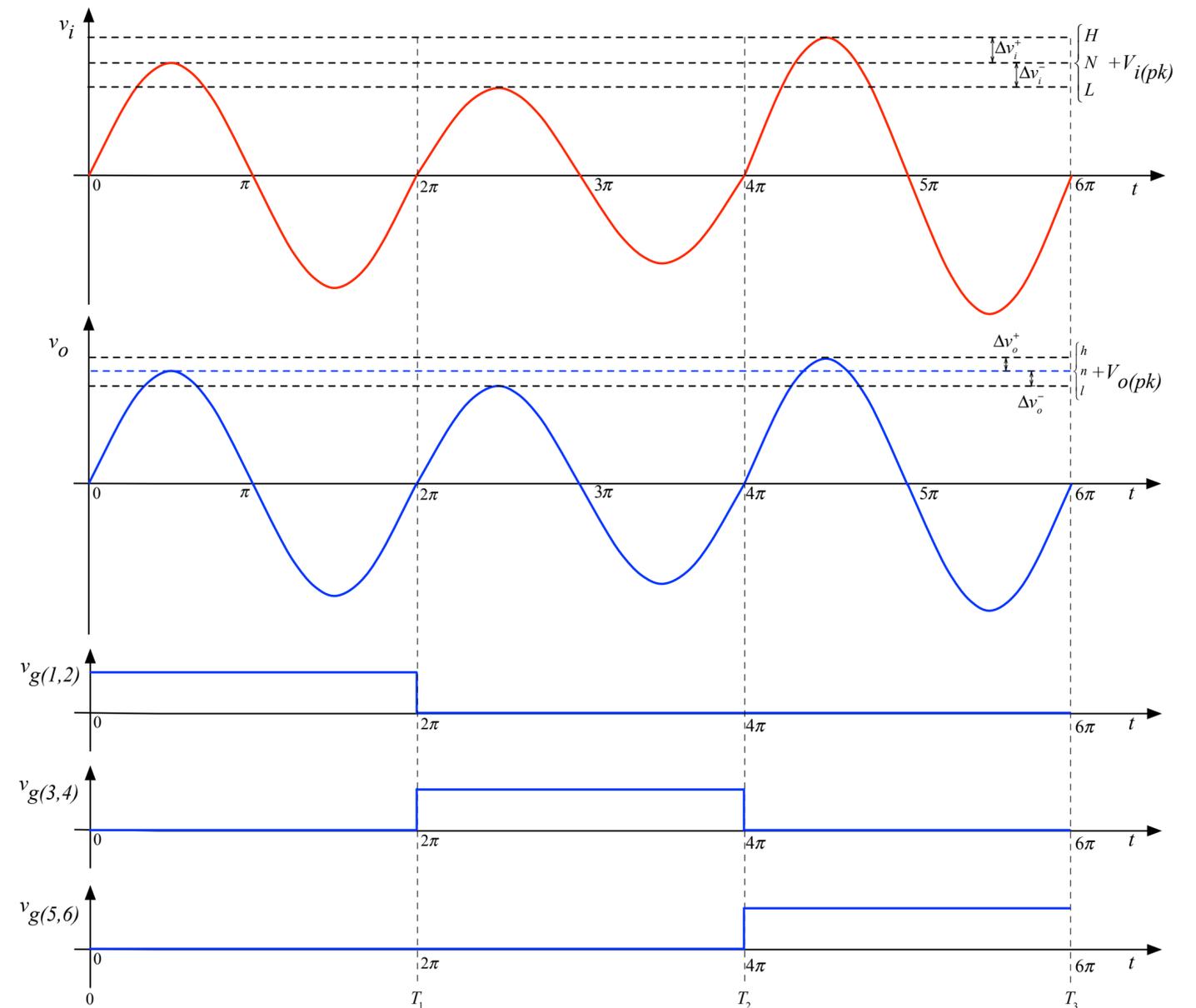


Estabilizadores de Tensão CA-CA

Estabilizador de tensão com tiristores:

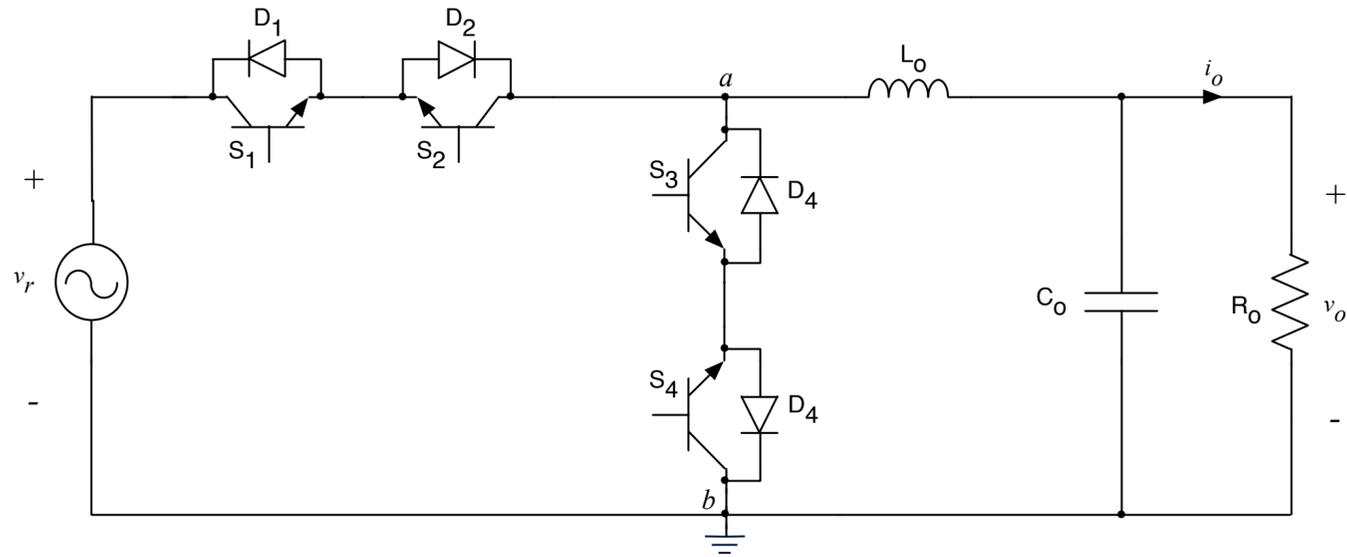


$$v_o = \begin{cases} v_o = v_i \rightarrow T_3 \text{ e } T_4 \text{ on} \\ v_o = v_i + v_3 \rightarrow T_1 \text{ e } T_2 \text{ on} \\ v_o = v_i - v_2 \rightarrow T_5 \text{ e } T_6 \text{ on} \end{cases}$$

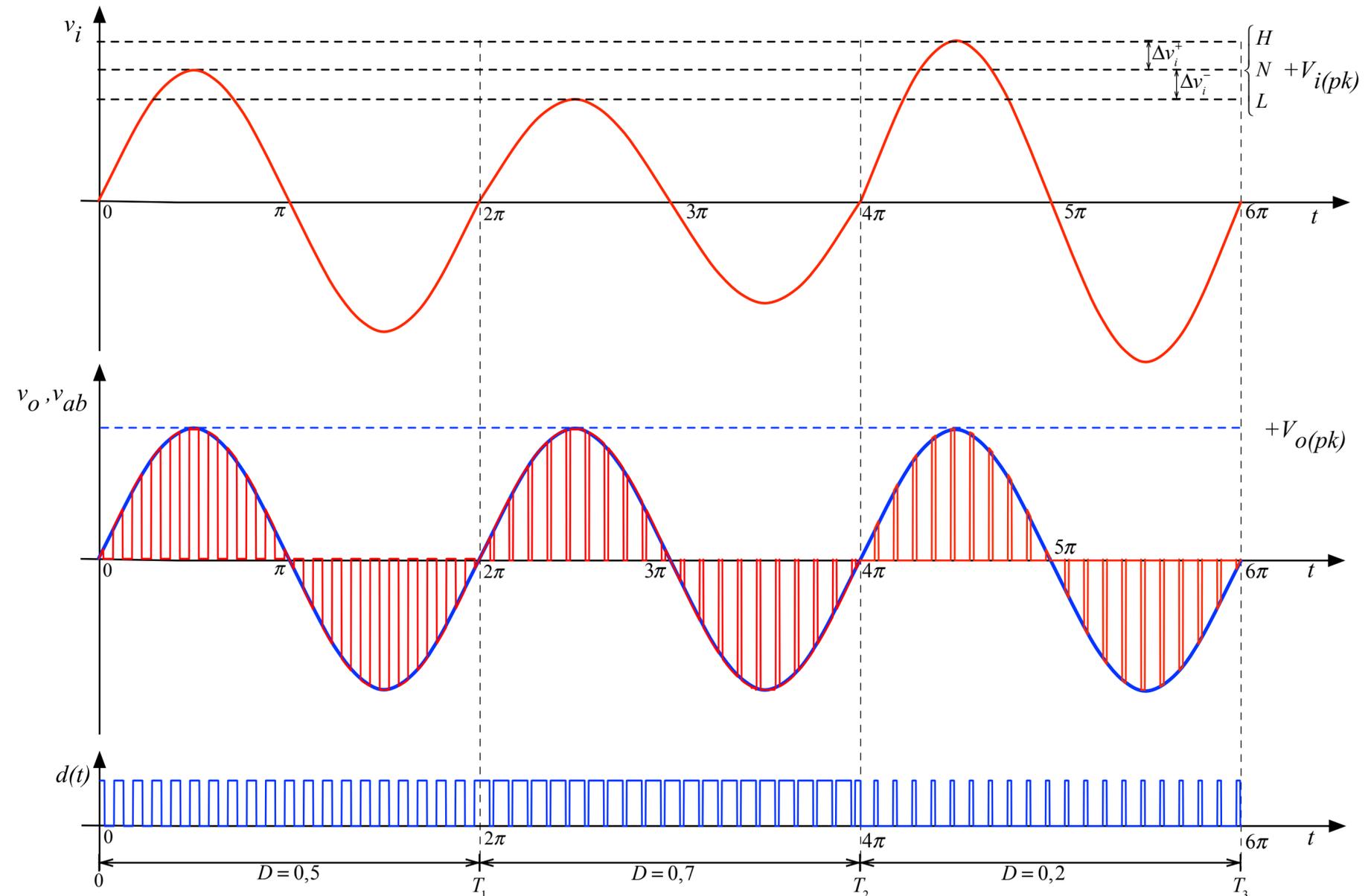


Estabilizadores de Tensão CA-CA

Estabilizador de tensão com transistores:

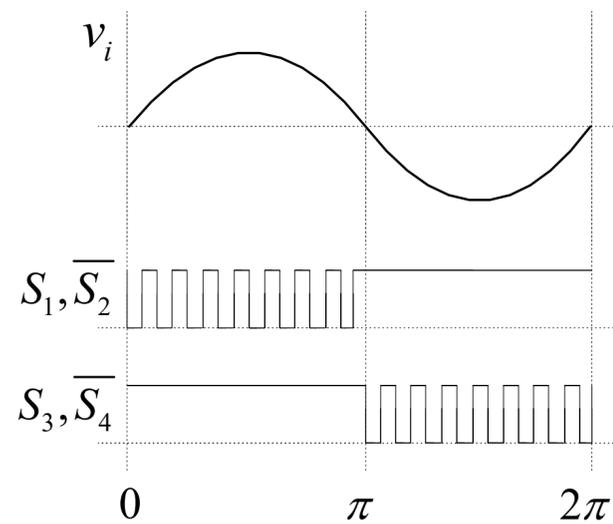
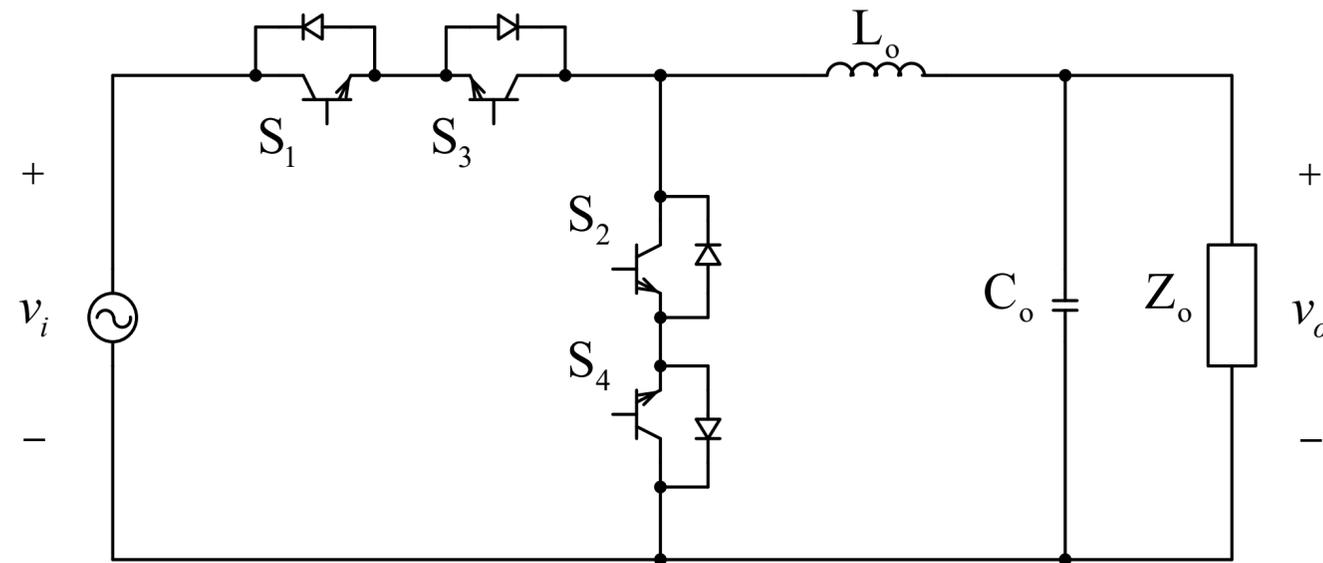


$$V_{o(ef)} = V_{i(ef)} \cdot D$$

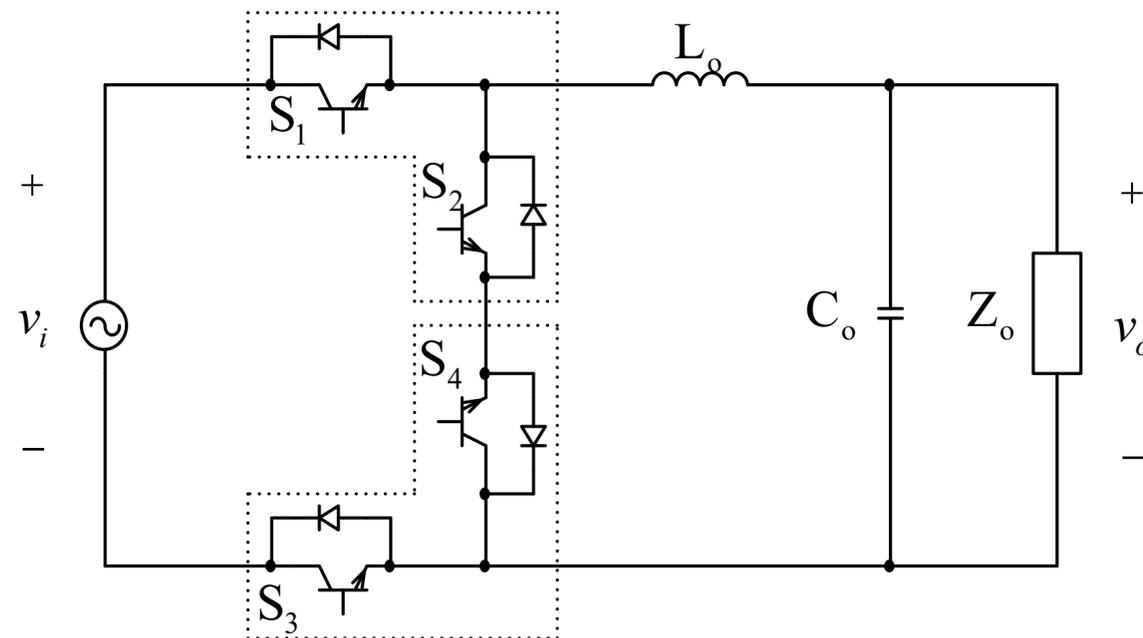


Estabilizadores de Tensão CA-CA

Estabilizador de tensão com transistores:



	$v_i > 0$	$v_i < 0$
S_1	<i>pwm</i>	<i>on</i>
S_2	<i>pwm</i>	<i>on</i>
S_3	<i>on</i>	<i>pwm</i>
S_4	<i>on</i>	<i>pwm</i>

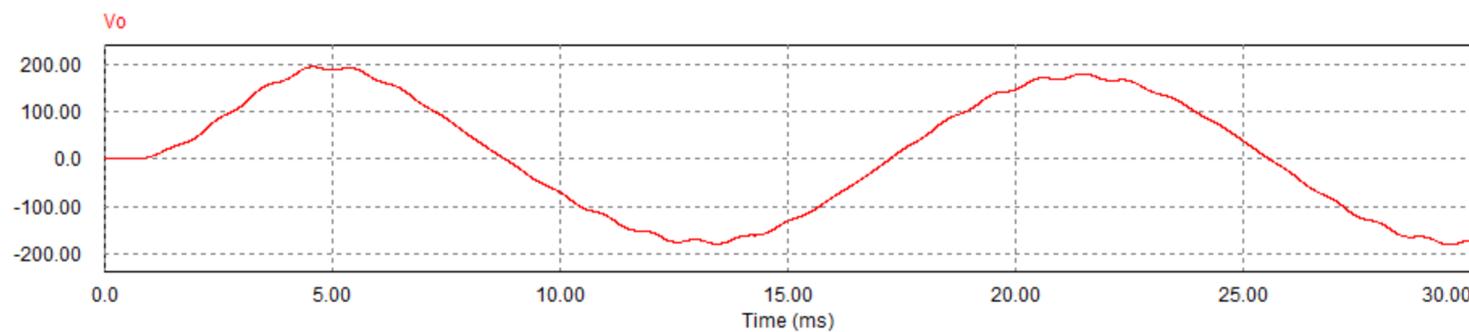
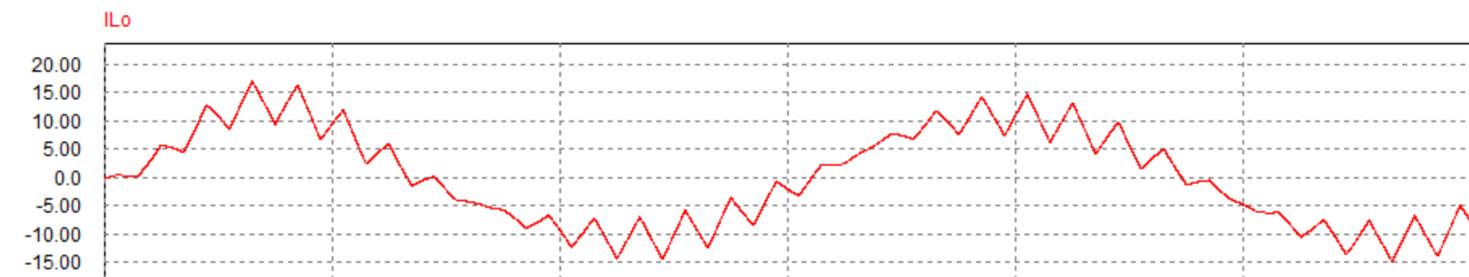
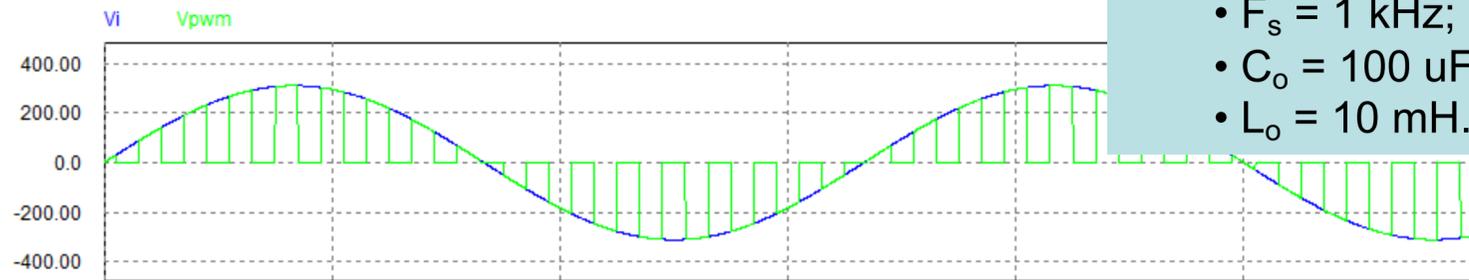


Estabilizadores de Tensão CA-CA

Estabilizador de tensão com transistores:

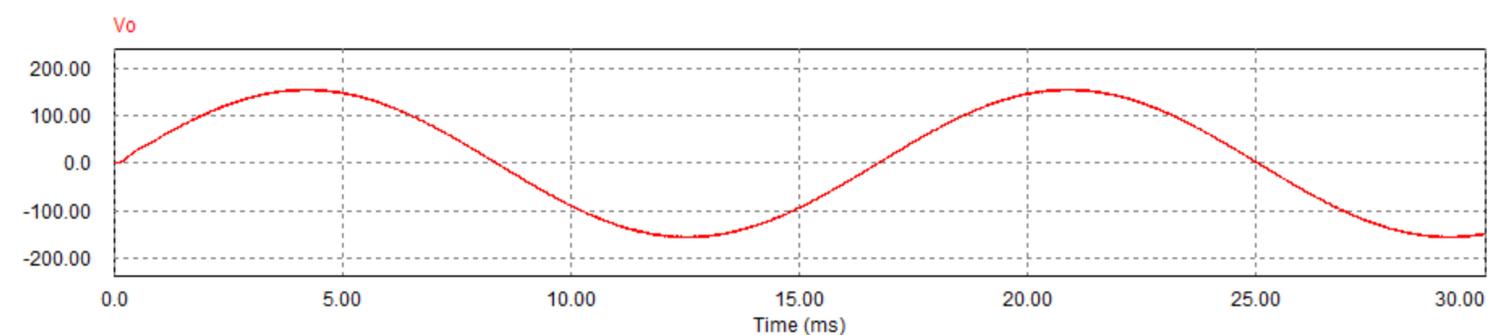
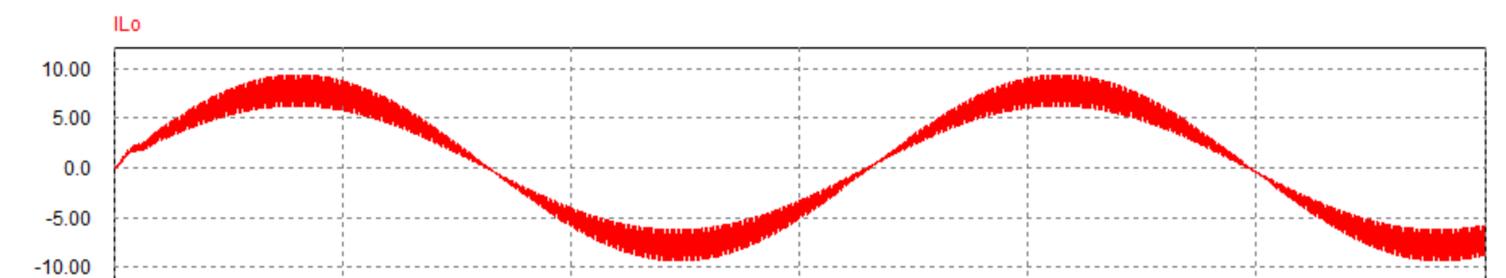
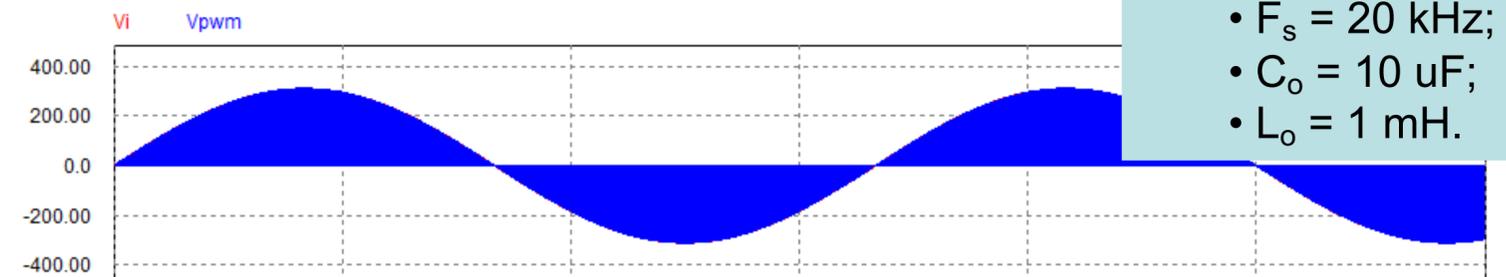
Dados da simulação:

- $F_s = 1 \text{ kHz}$;
- $C_o = 100 \text{ }\mu\text{F}$;
- $L_o = 10 \text{ mH}$.



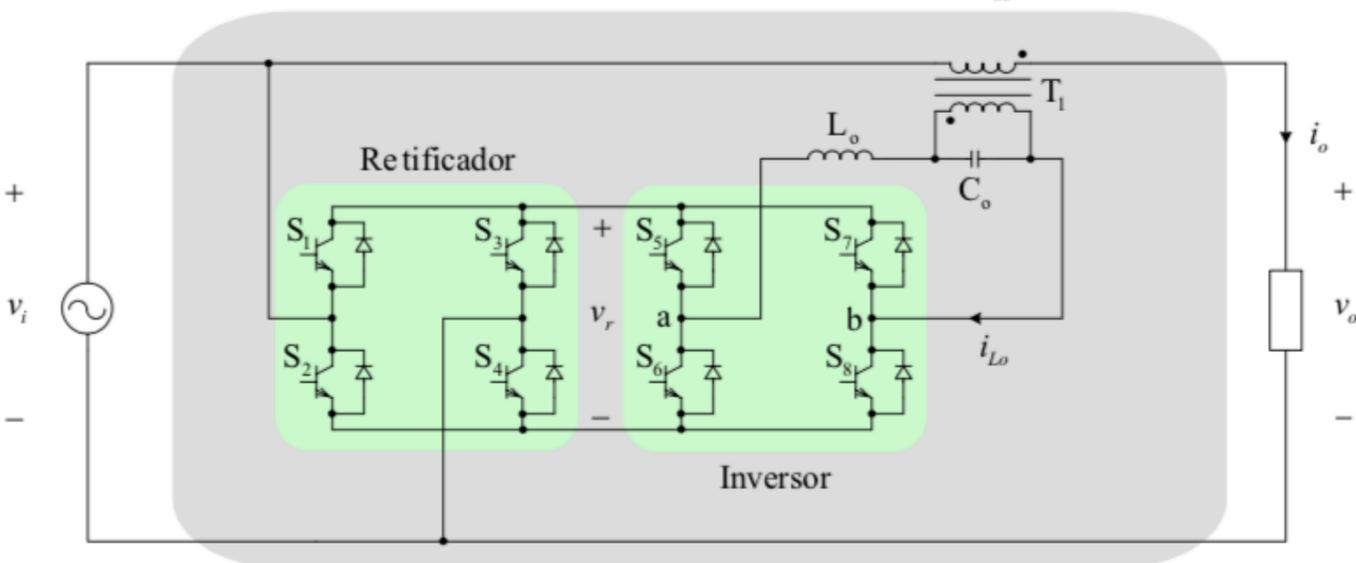
Dados da simulação:

- $F_s = 20 \text{ kHz}$;
- $C_o = 10 \text{ }\mu\text{F}$;
- $L_o = 1 \text{ mH}$.



Conversores CA-CA Indiretos

Condicionador de tensão com modulação PWM:



Condicionador de 10 kW, 20 kHz
Fonte: Petry, 2005.

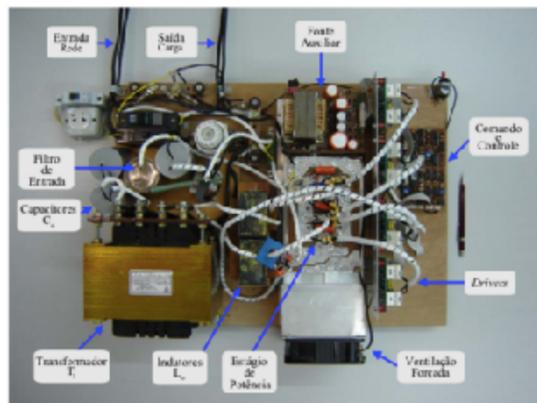
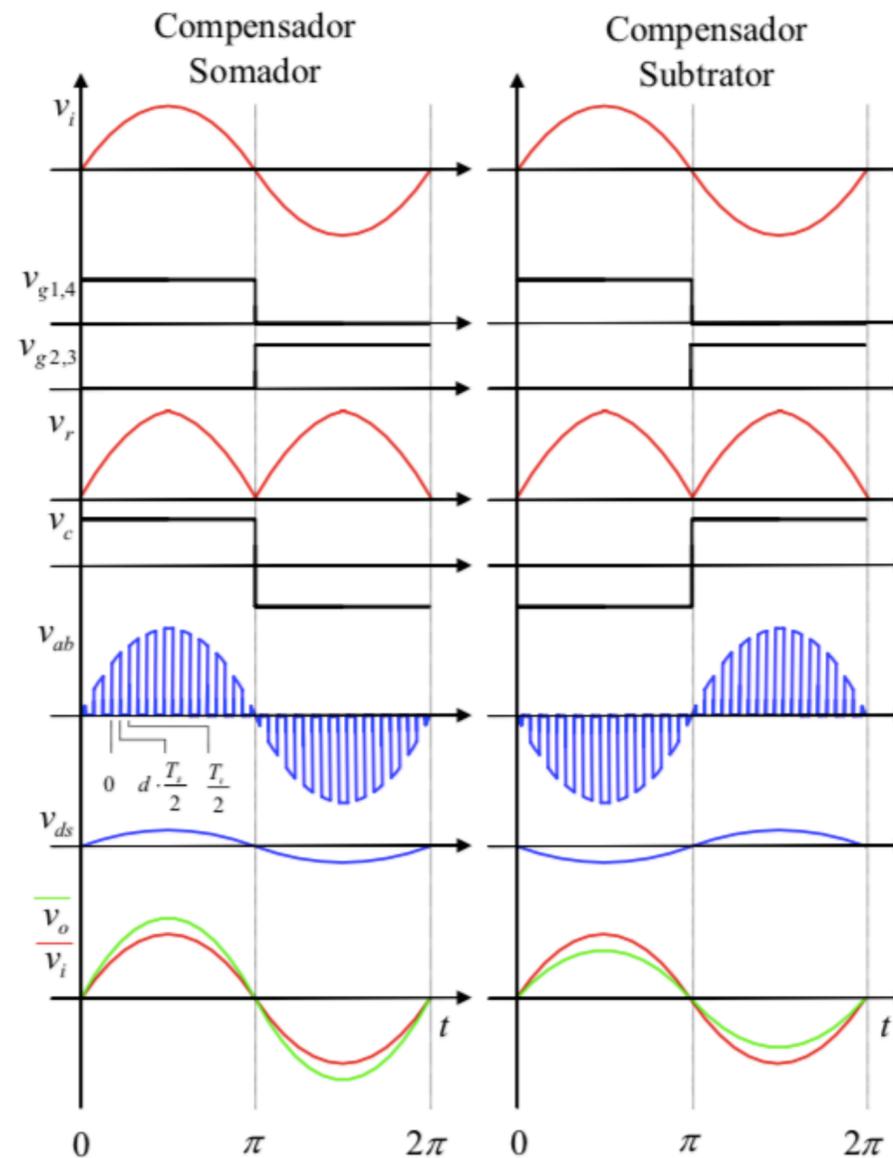
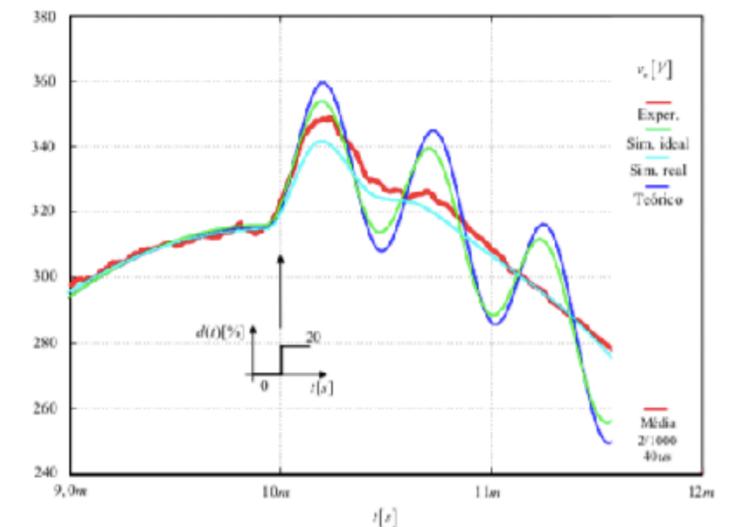


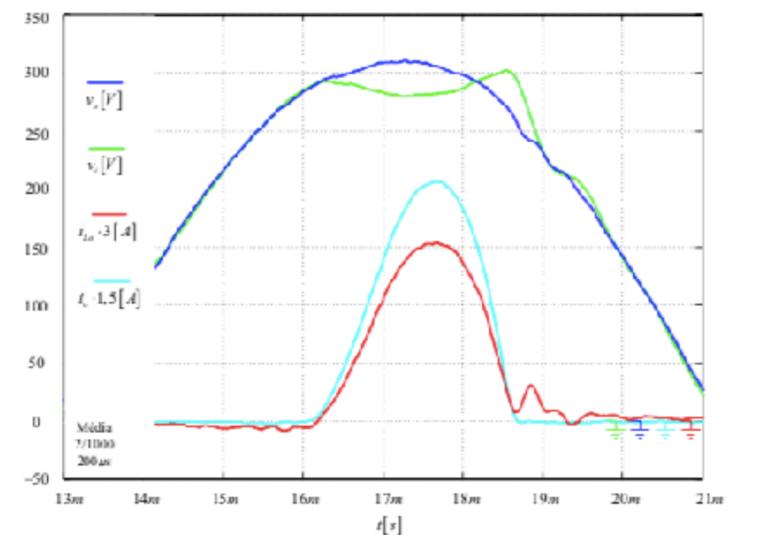
Foto do protótipo



Principais formas de onda



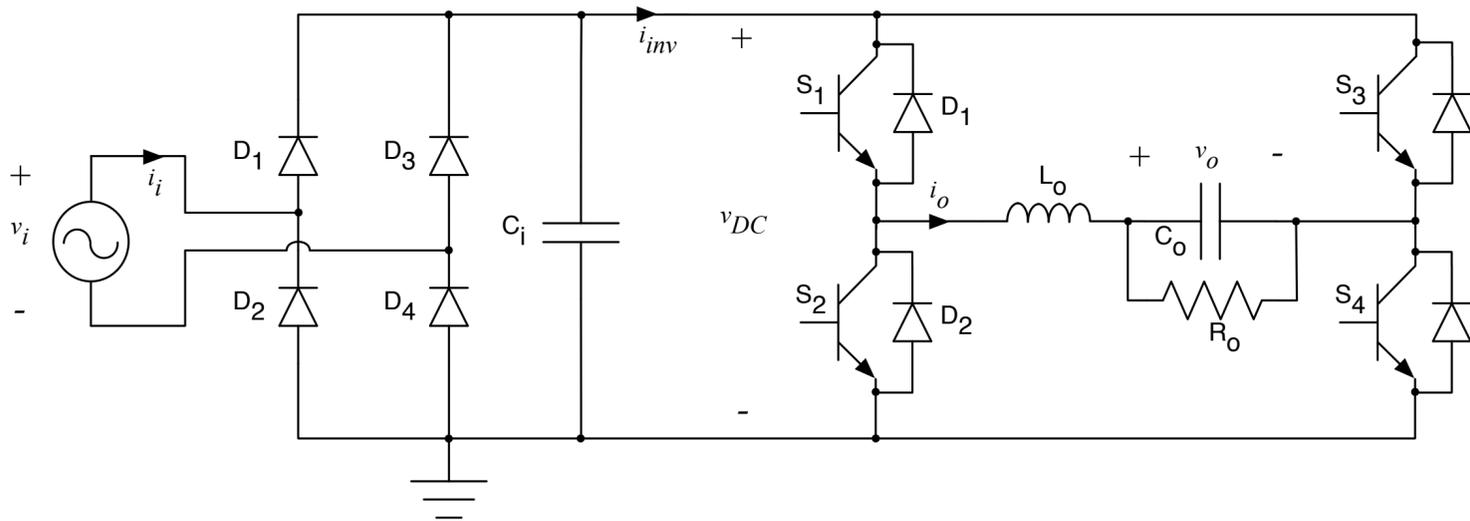
Resposta ao degrau



Operação com carga não-linear

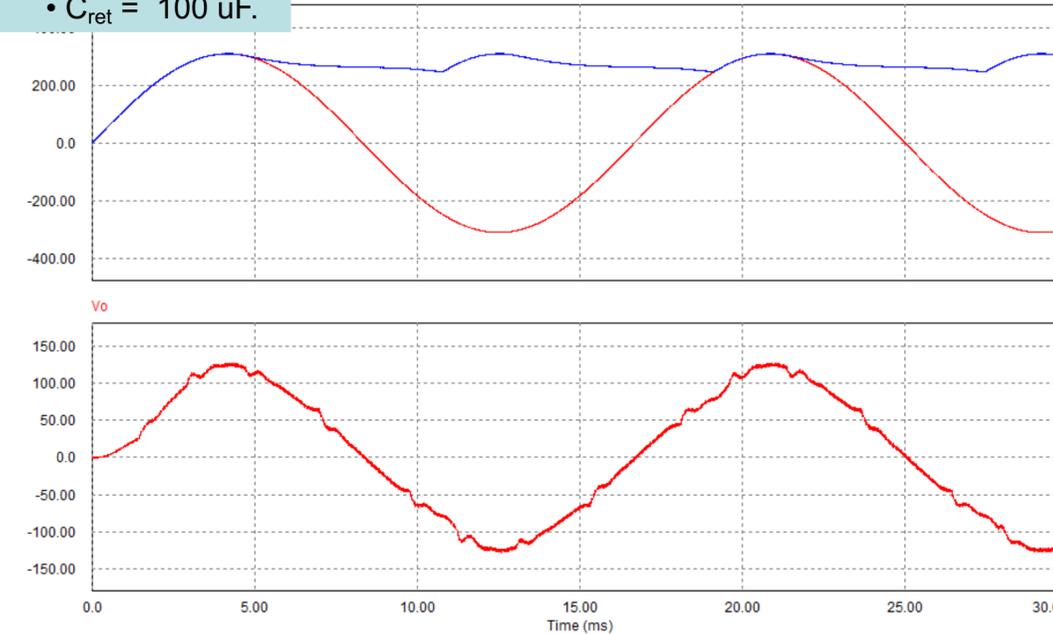
Conversores CA-CA Indiretos

Conversores implementados a partir do inversor ponte completa:

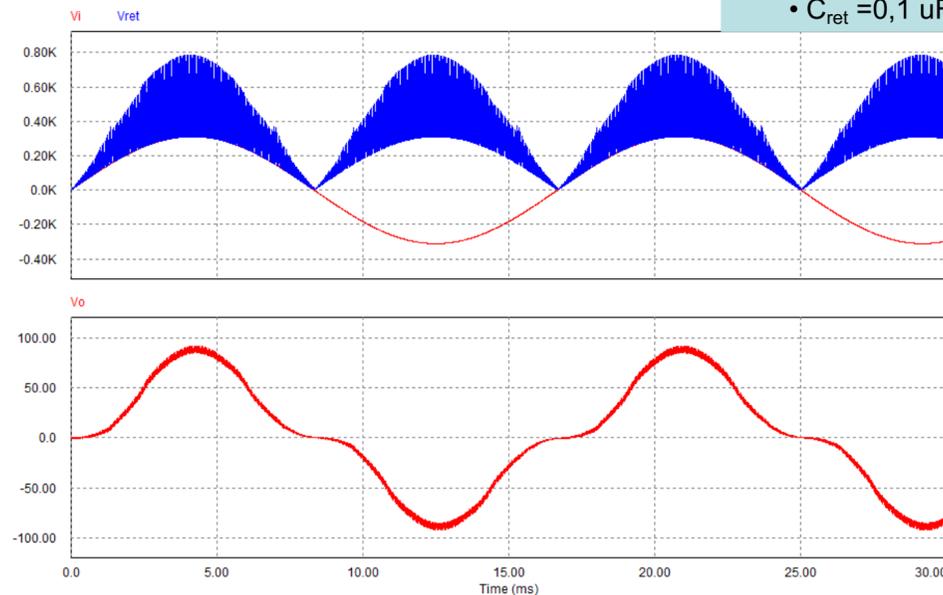


Conversor ponte completa ca-ca PWM senoidal

Dados da simulação:
• $C_{ret} = 100 \mu F$.



Dados da simulação:
• $C_{ret} = 0,1 \mu F$.



Dados da simulação:
• $C_{ret} = 1 \mu F$.

