

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Eletrônica Analógica I



# Retificadores com Filtros Capacitivos

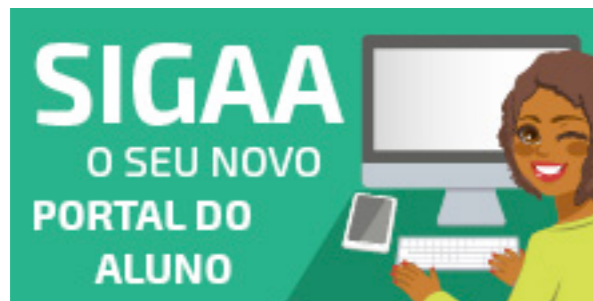
Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, setembro de 2025.

# Eletrônica Analógica I

O material do curso está disponível em:

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



<https://sigaa.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](http://www.ProfessorPetry.com.br)



<https://www.youtube.com>

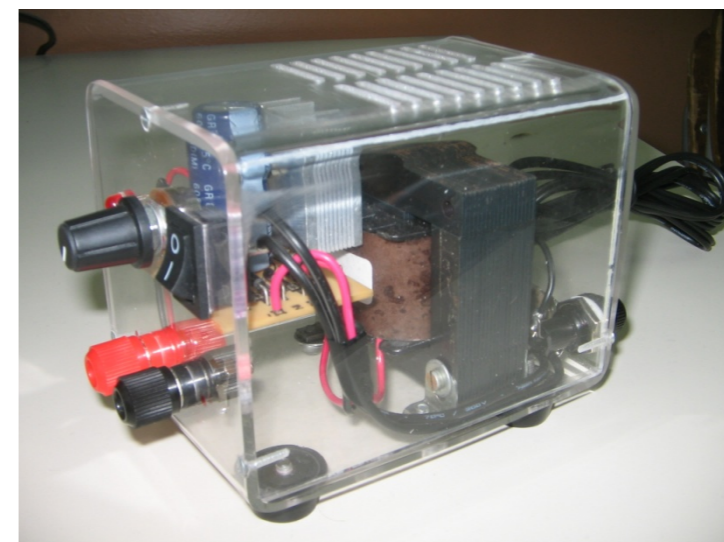
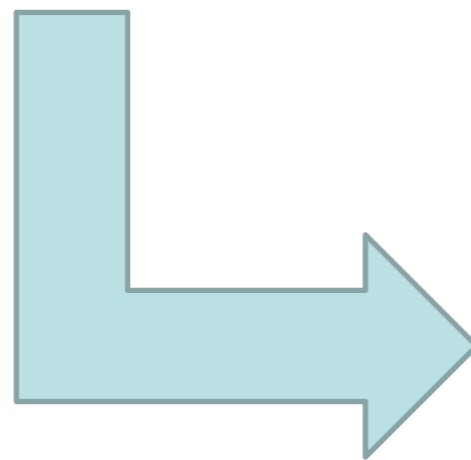
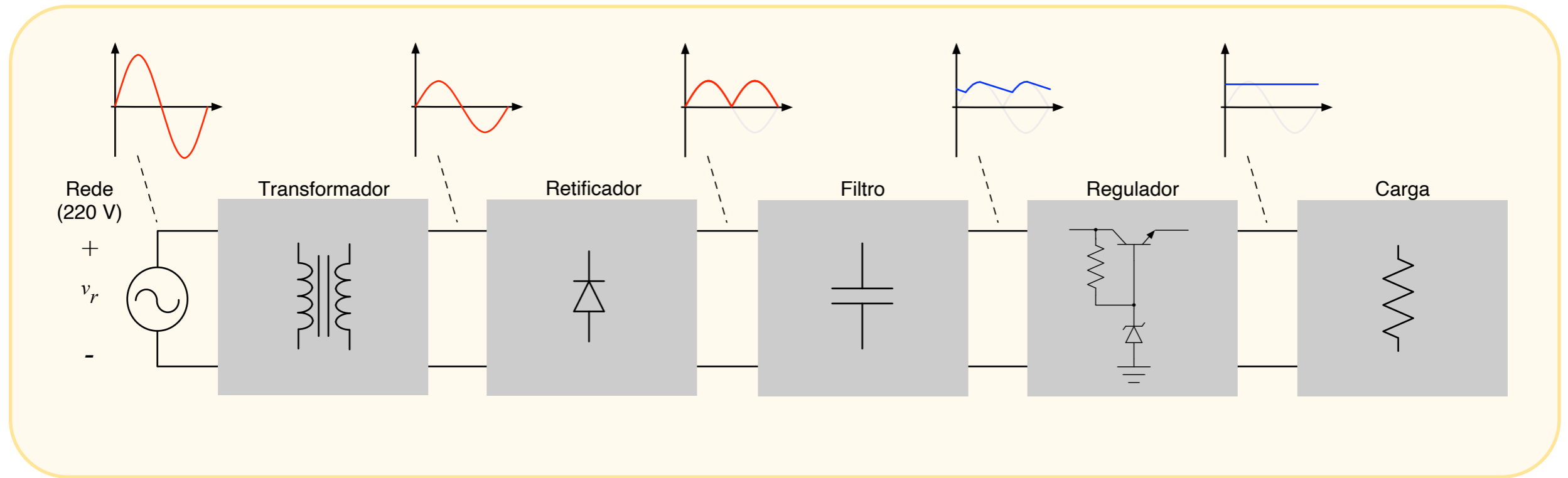
# Agenda

Esta aula está organizada em:

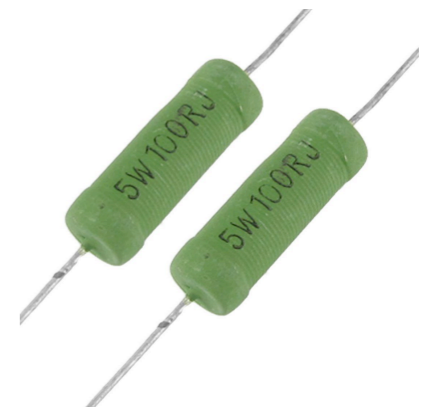
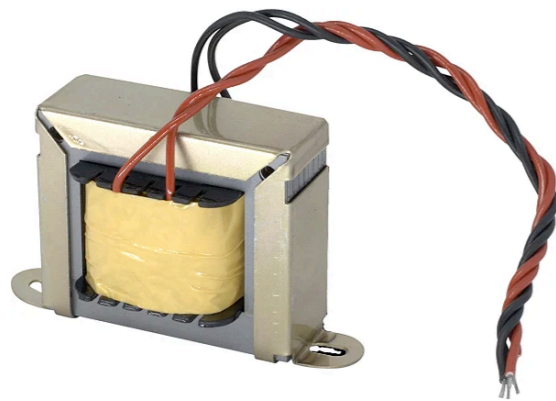
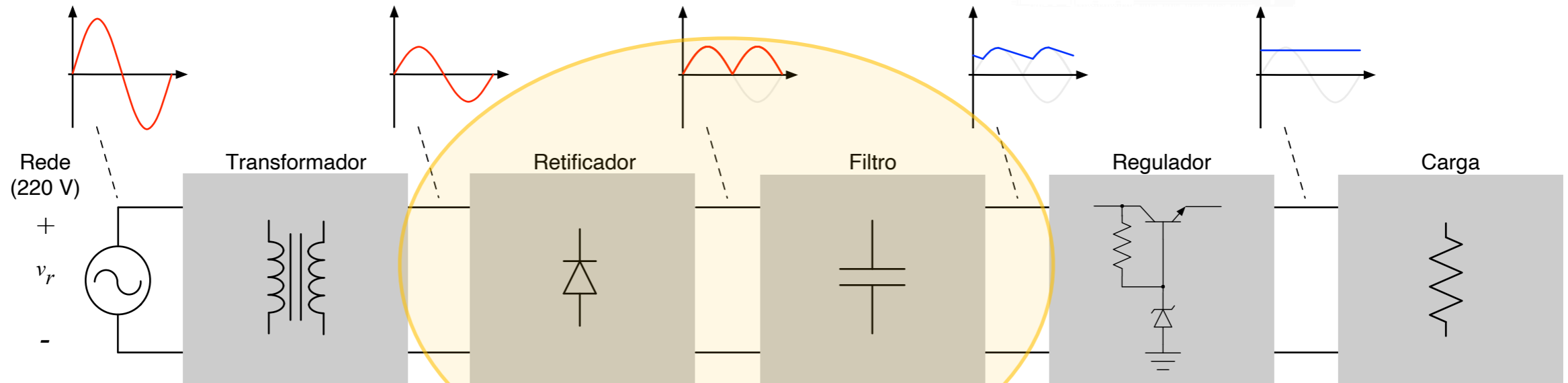
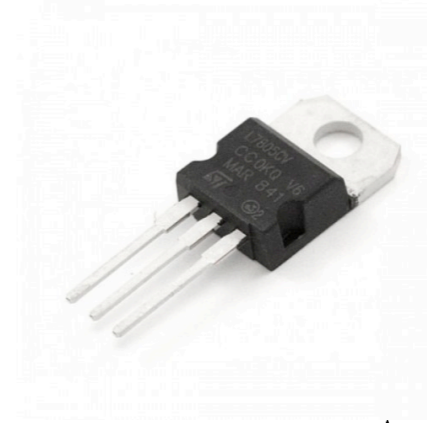
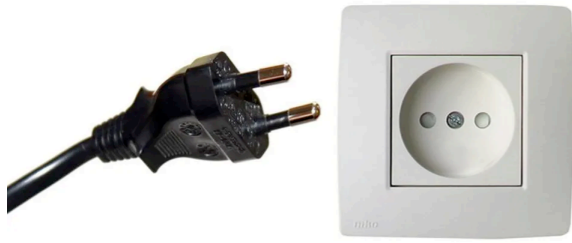
1. Resumo dos retificadores;
2. Fator de ripple;
3. Aproveitamento do transformador;
4. Regulação de um transformador;
5. Filtros capacitivos.



# Fonte Linear

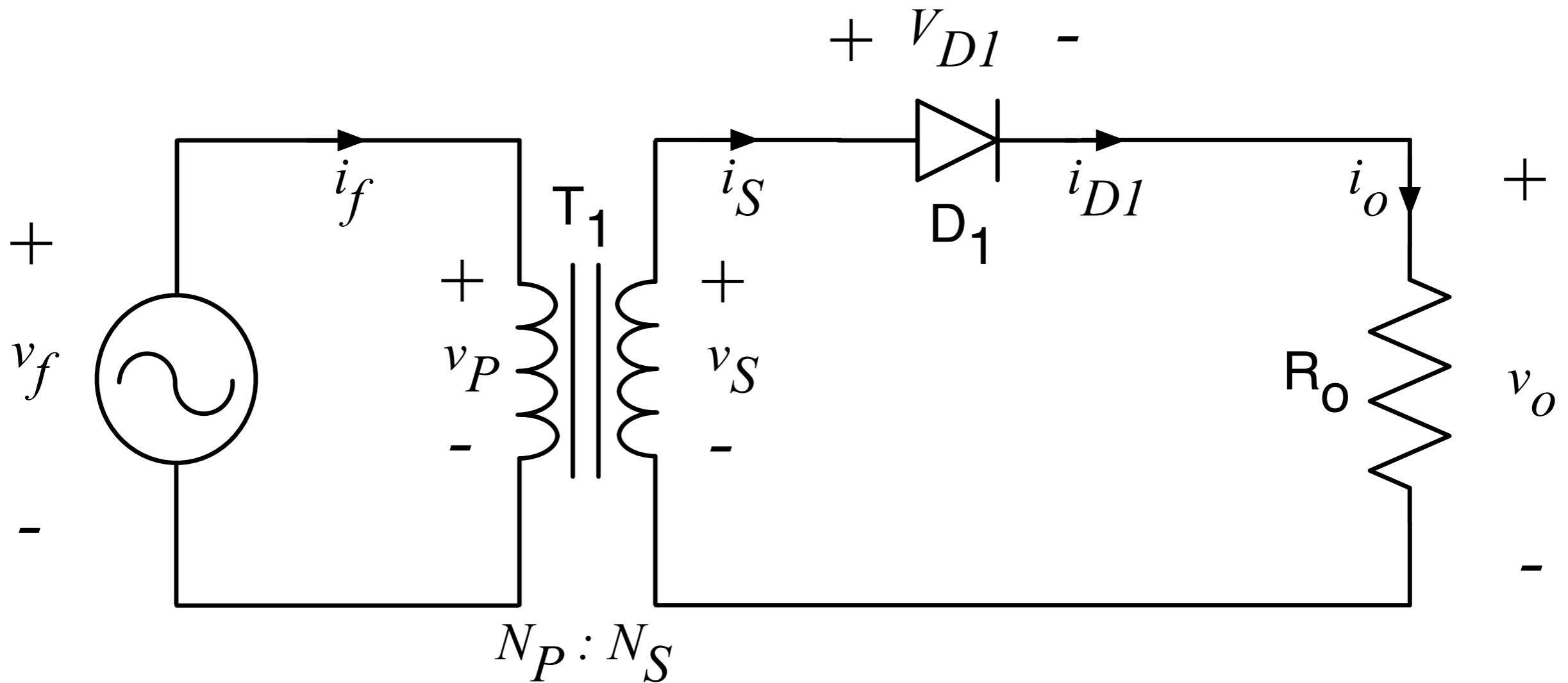


# Fonte Linear



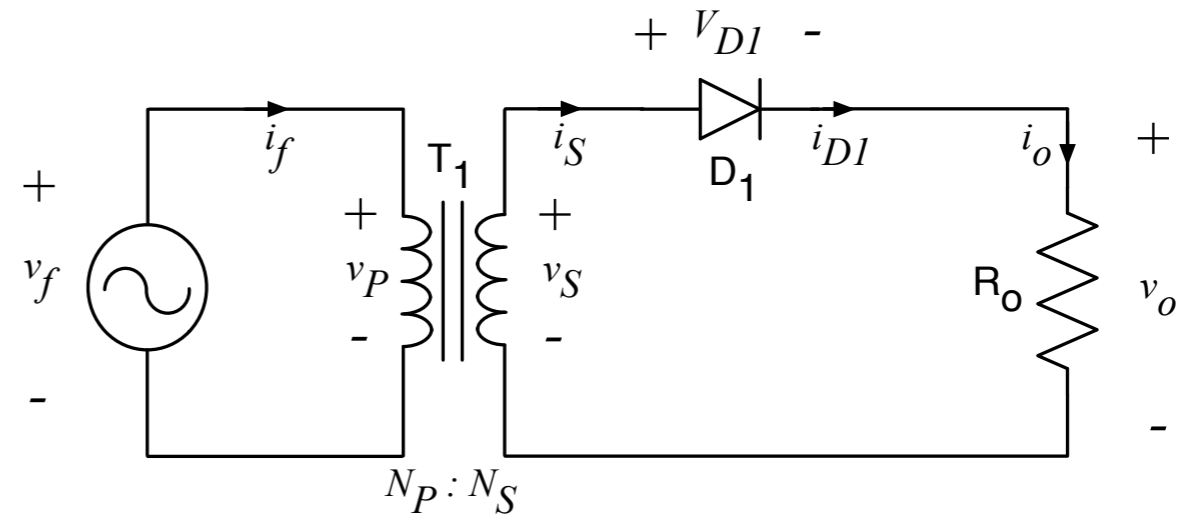
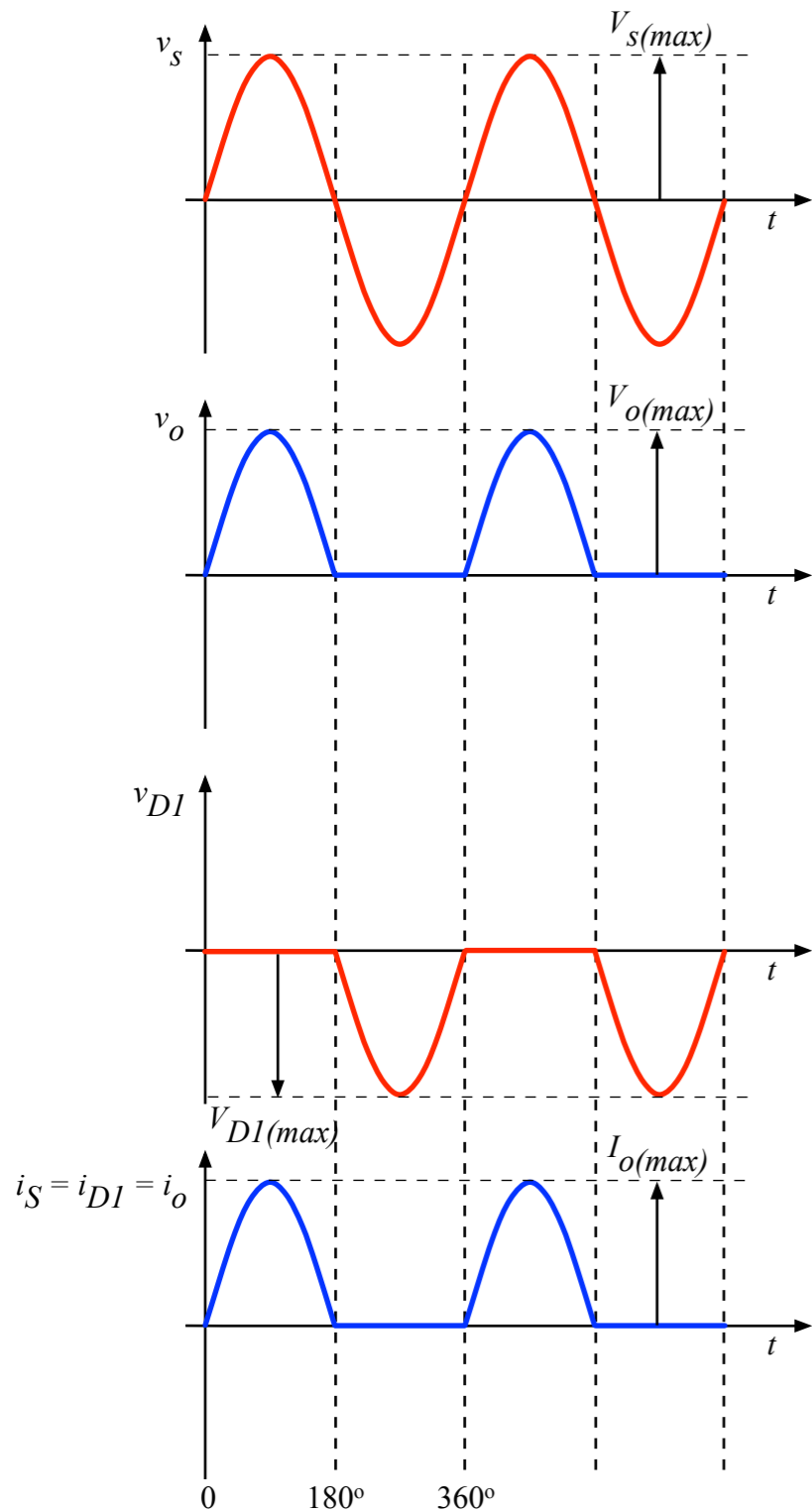
# Retificador de meia onda

Análise do circuito:



# Retificador de meia onda

## Análise do circuito:



Tensão média na carga:

$$V_{o(\text{medio})} = \frac{V_{o(\text{max})}}{\pi}$$

Corrente média na carga:

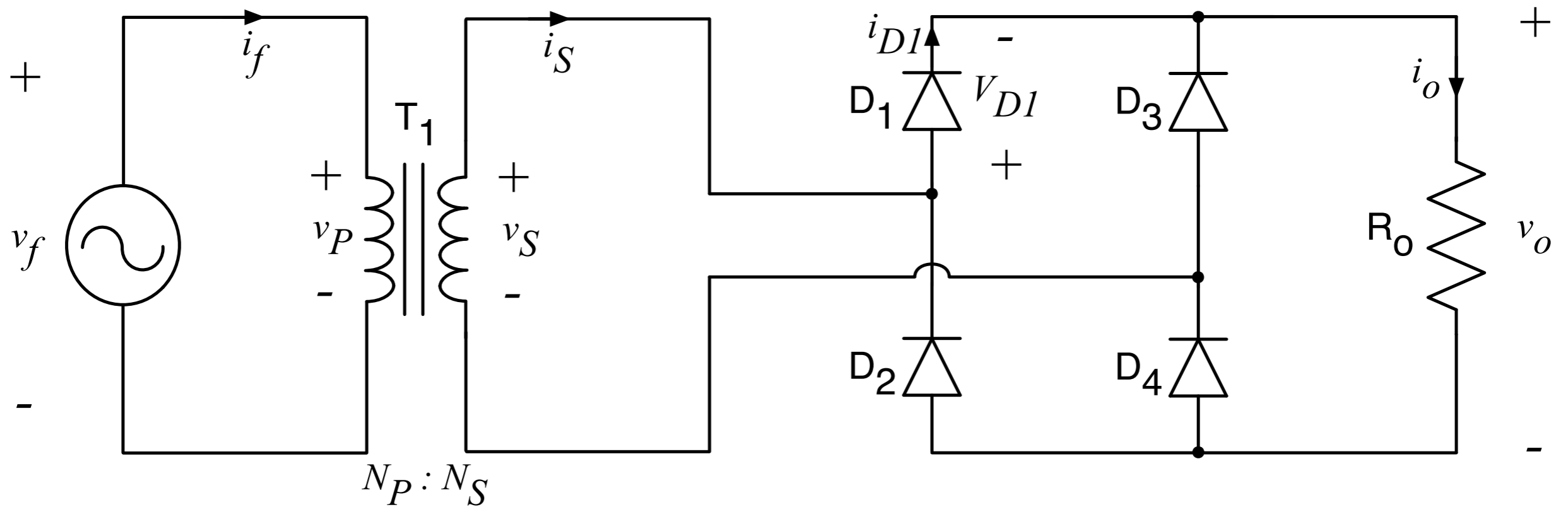
$$I_{o(\text{medio})} = \frac{V_{o(\text{medio})}}{R_o}$$

Tensão eficaz na carga:

$$V_{o(\text{eficaz})} = \frac{V_{o(\text{max})}}{2}$$

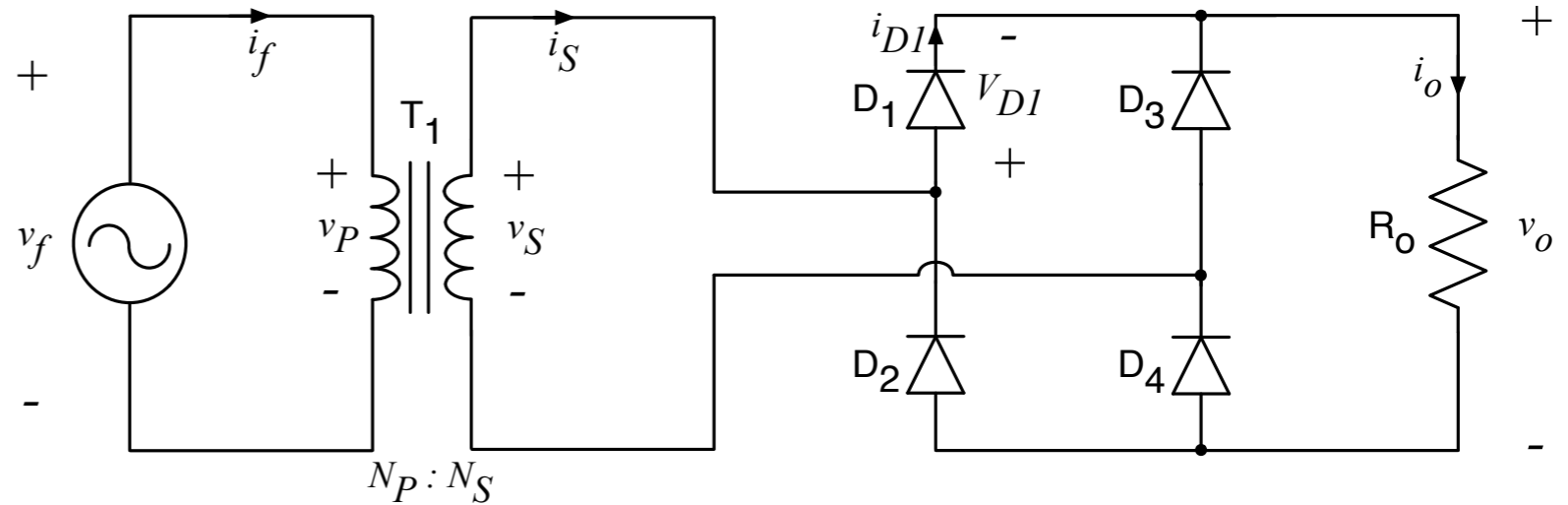
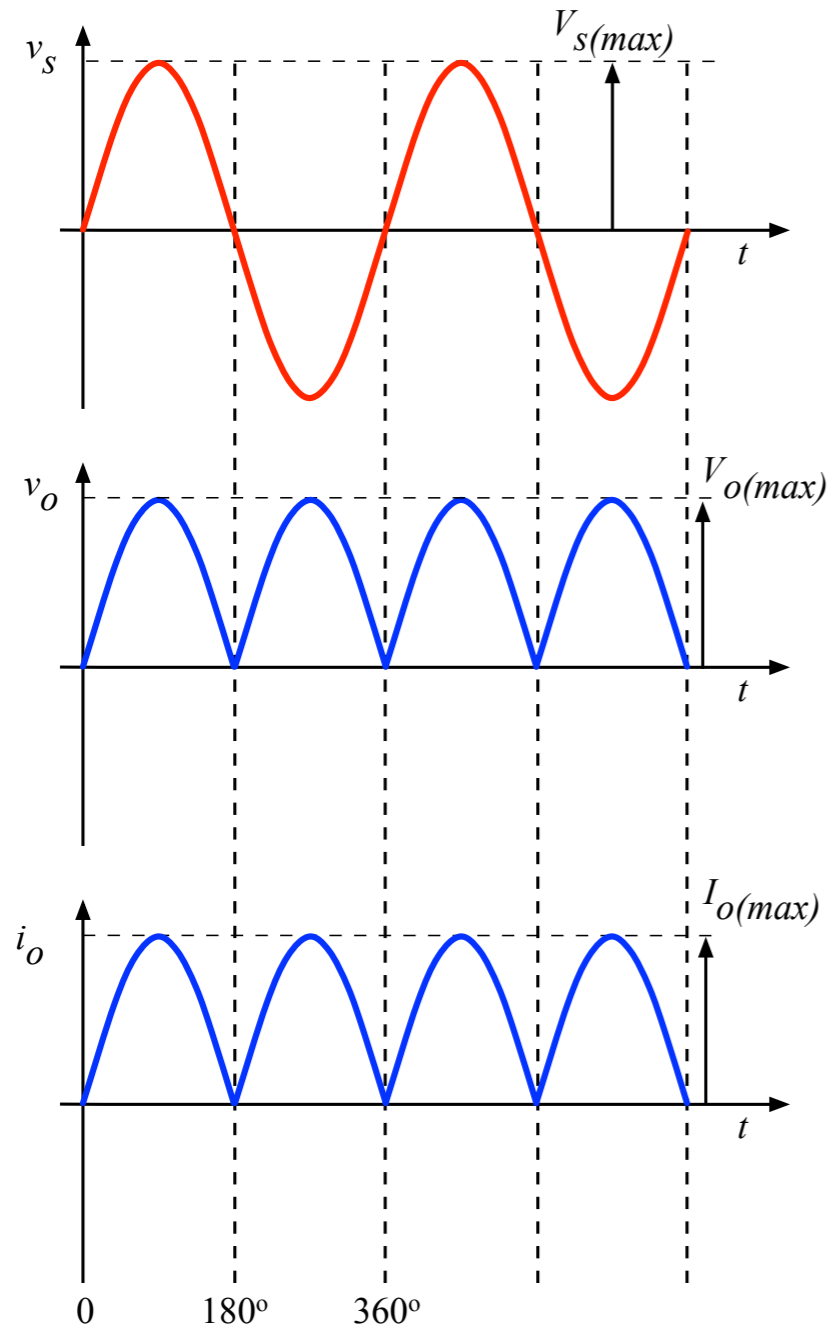
# Retificador de onda completa em ponte

Análise do circuito:



# Retificador de onda completa em ponte

## Análise do circuito:



Na carga:

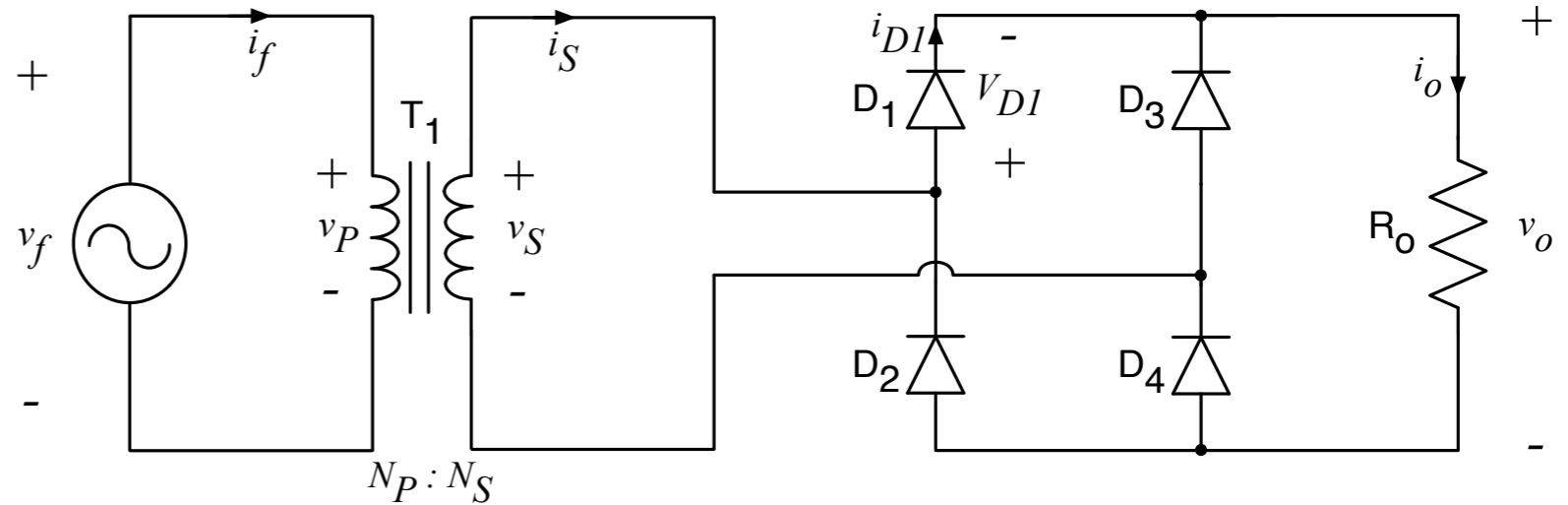
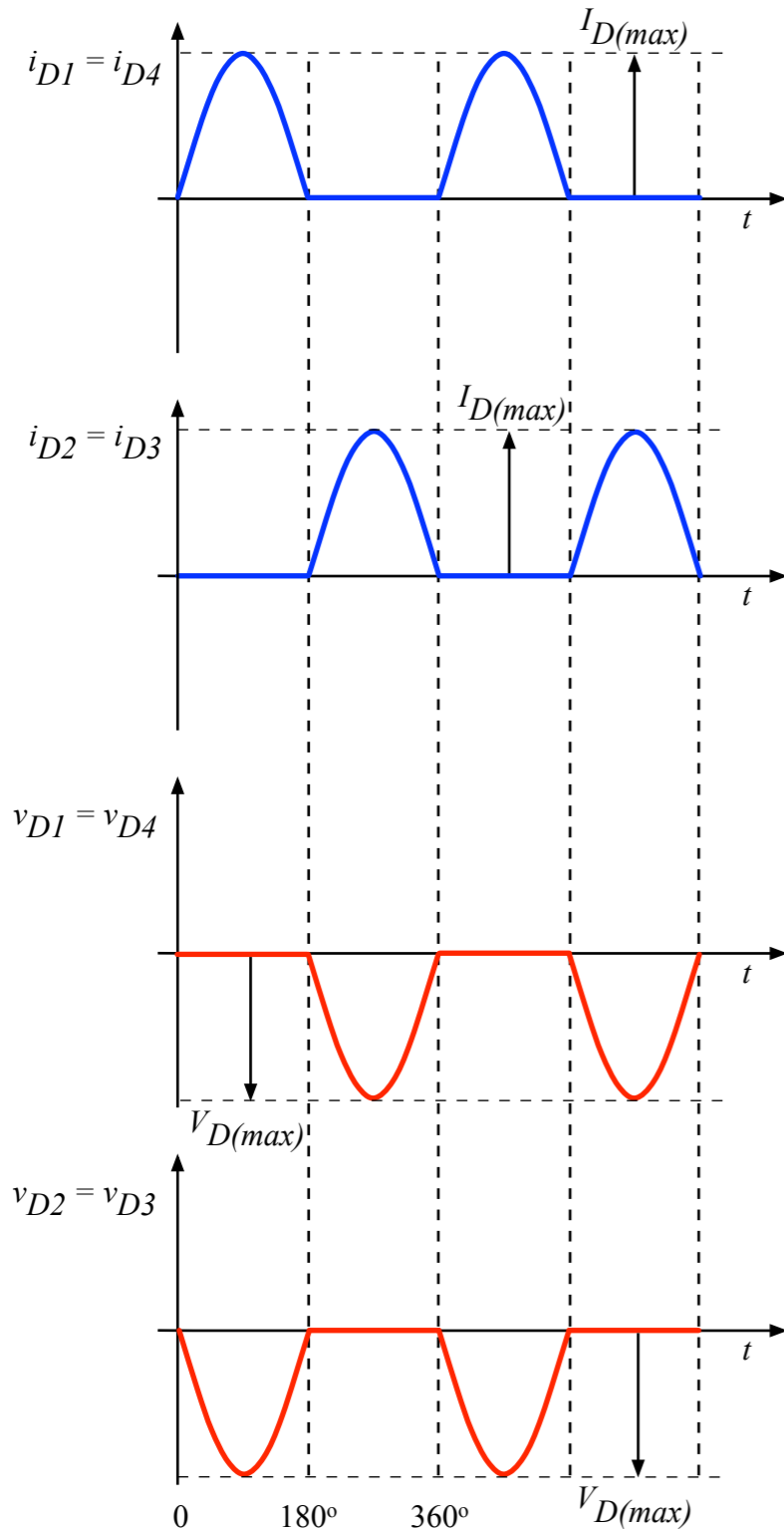
$$V_{o(\text{medio})} = 2 \cdot \frac{V_{o(\text{max})}}{\pi}$$

$$V_{o(\text{eficaz})} = \frac{V_{o(\text{max})}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{o(\text{medio})} = \frac{V_{o(\text{medio})}}{R_o}$$

# Retificador de onda completa em ponte

## Análise do circuito:



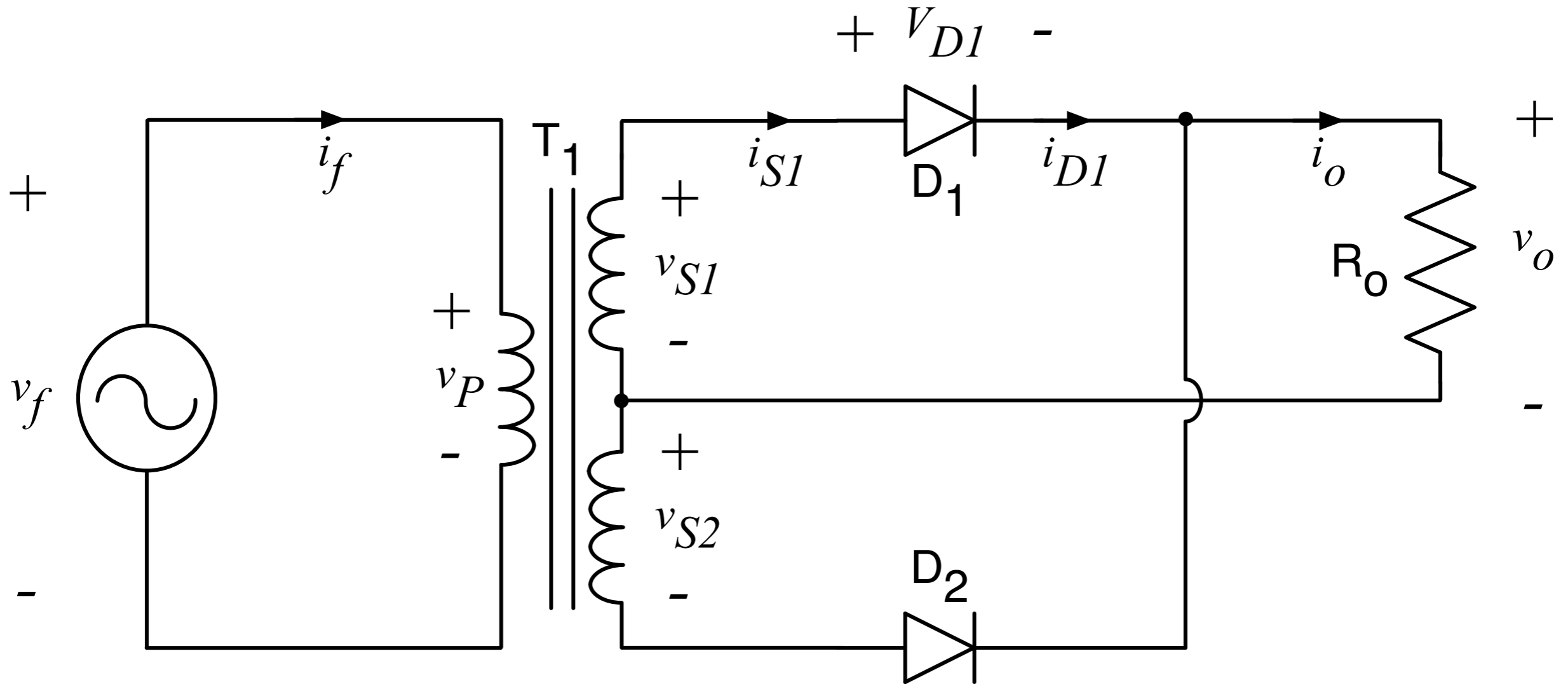
Nos diodos:

$$V_{D(max)} = V_{o(max)}$$

$$I_{D(medio)} = \frac{I_{o(medio)}}{2}$$

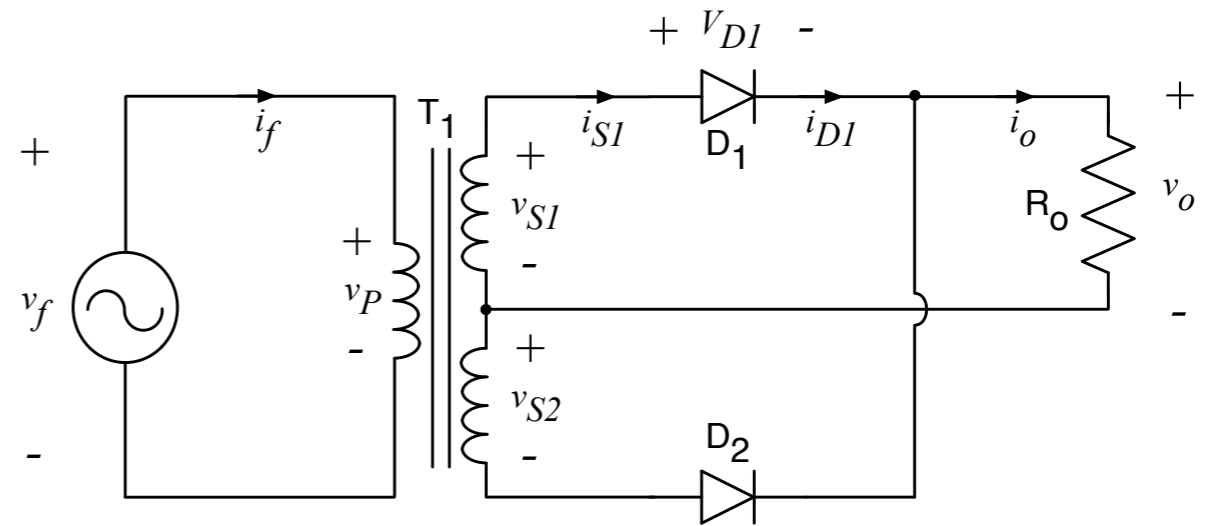
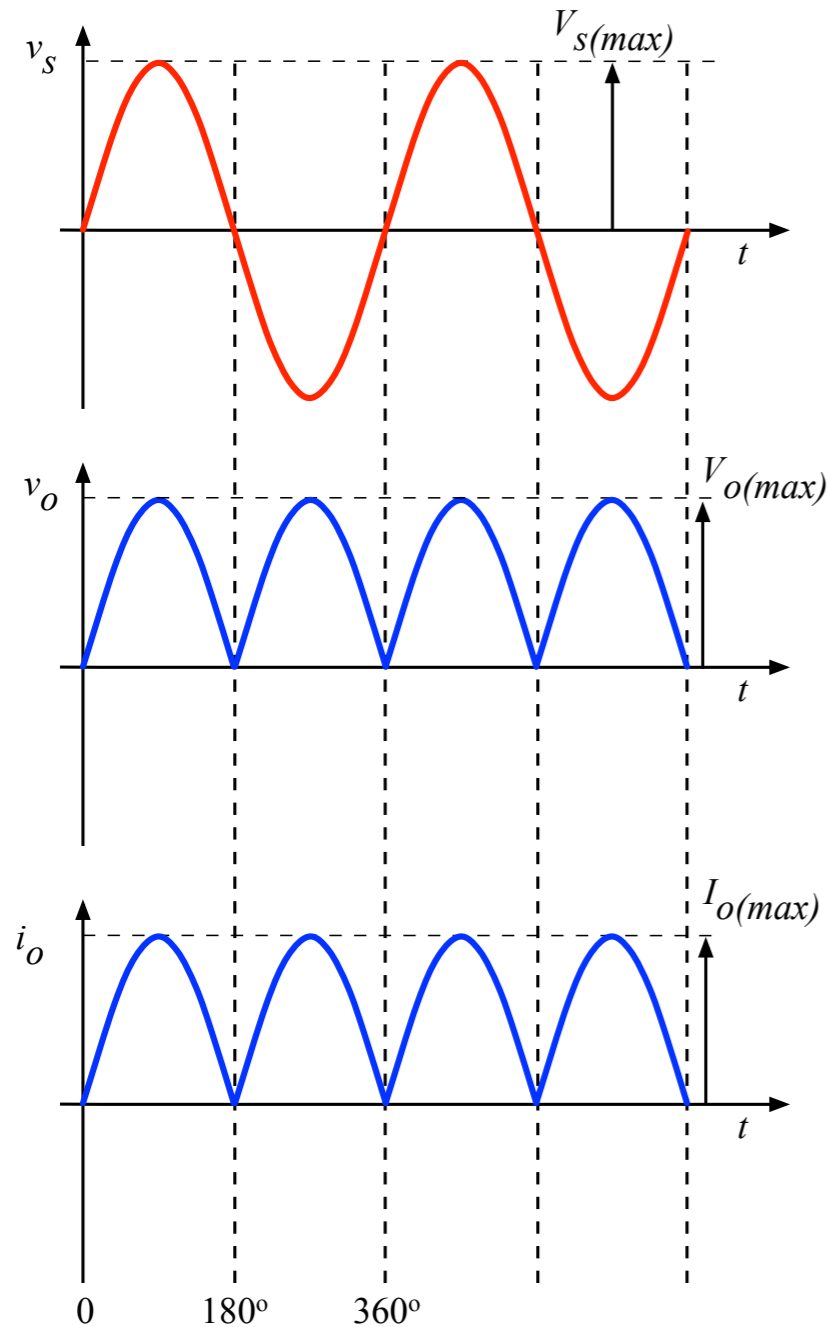
# Retificador de onda completa com tap central

Análise do circuito:



# Retificador de onda completa com tap central

Análise do circuito:



Na carga:

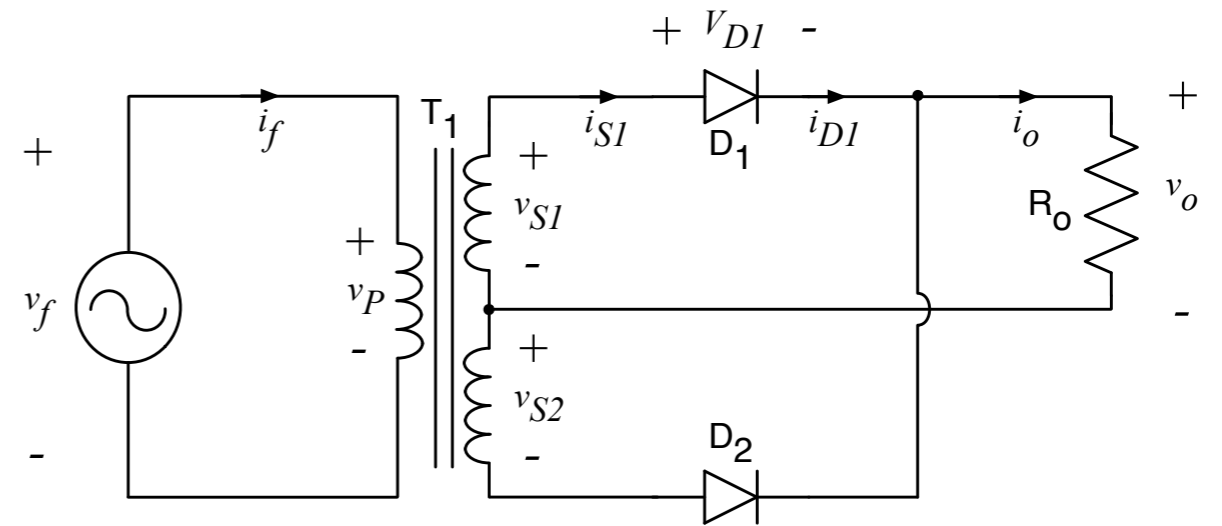
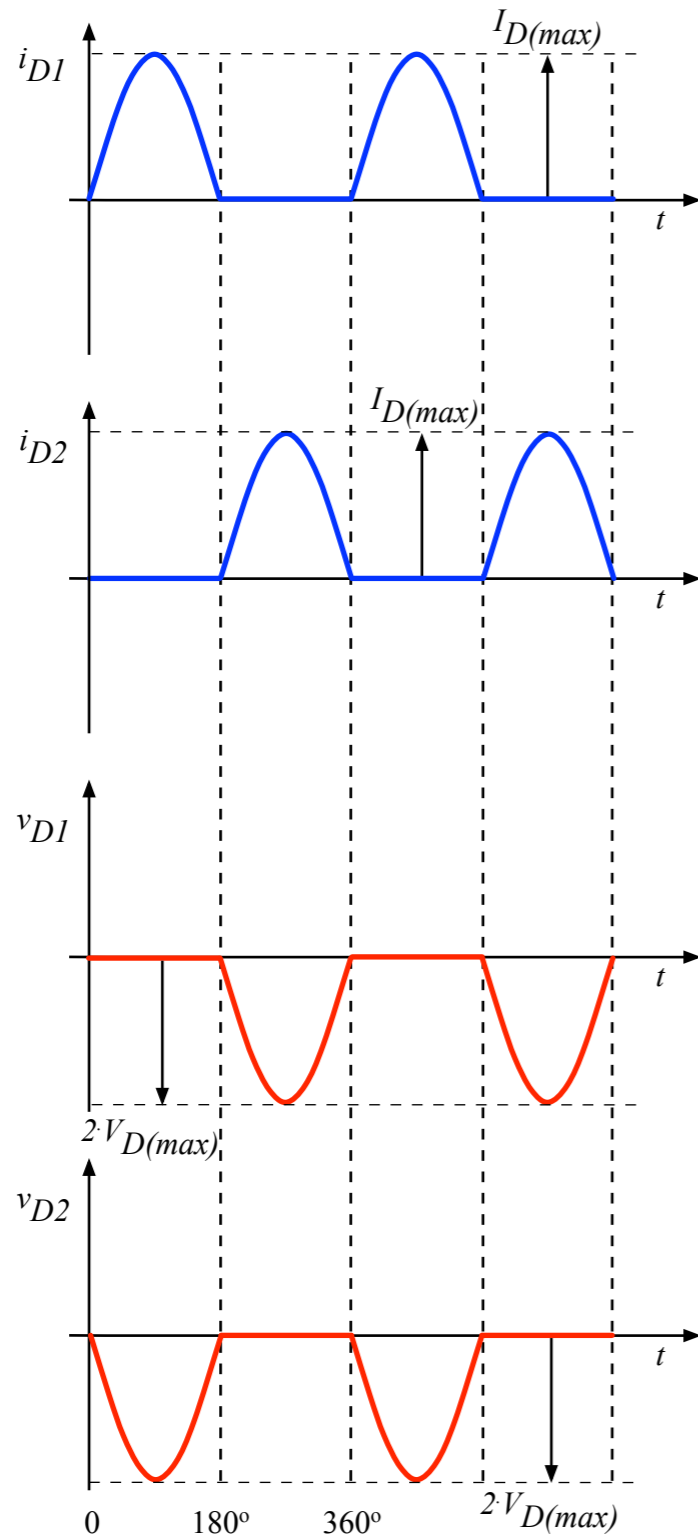
$$V_{o(\text{medio})} = 2 \cdot \frac{V_{o(\text{max})}}{\pi}$$

$$V_{o(\text{eficaz})} = \frac{V_{o(\text{max})}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{o(\text{medio})} = \frac{V_{o(\text{medio})}}{R_o}$$

# Retificador de onda completa com tap central

Análise do circuito:



Nos diodos:

$$V_{D(max)} = 2 \cdot V_{o(max)}$$

$$I_{D(medio)} = \frac{I_{o(medio)}}{2}$$

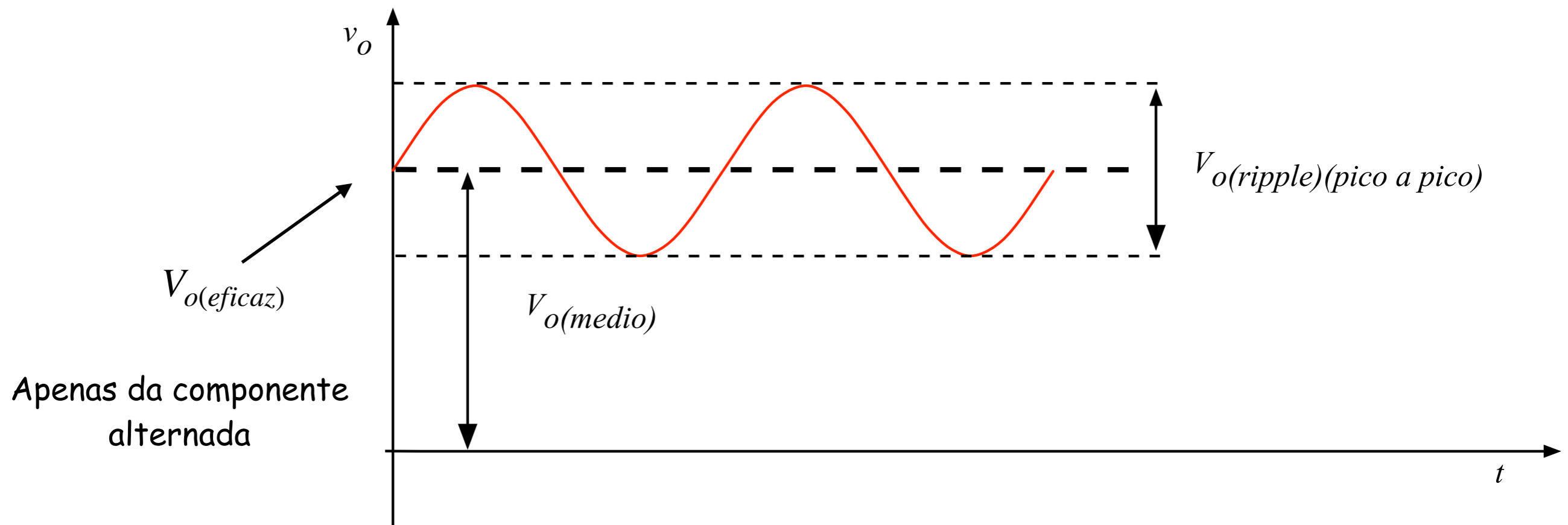
# Fator de ripple

Fator de ripple ou de ondulação de tensão na carga:

- Definido na literatura como:

$$r = \frac{\text{Valor eficaz da ondulação na saída}}{\text{Valor médio da tensão na saída}} \cdot 100$$

$$r = \frac{V_{o(\text{eficaz})}}{V_{o(\text{medio})}} \cdot 100$$



# Fator de ripple

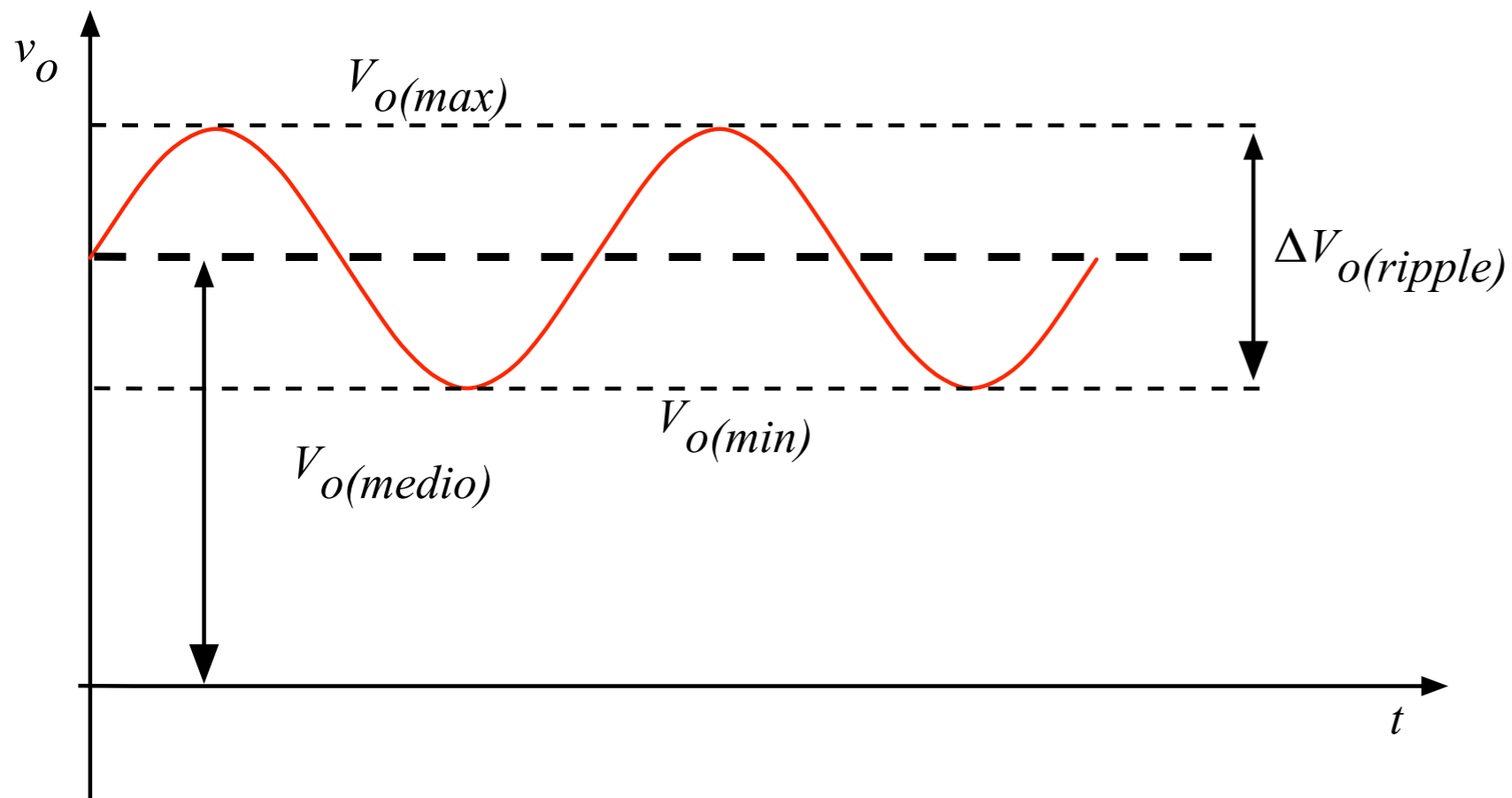
## Ripple ou ondulação de tensão na carga:

- Definindo a ondulação na tensão de saída (ripple) em termos práticos, como sendo a diferença entre seu valor máximo e seu valor mínimo:

$$\Delta V_o = V_{o(max)} - V_{o(min)}$$

- Em percentual pode-se escrever:

$$\Delta V_o(\%) = \frac{\Delta V_o}{V_{o(max)}} \cdot 100$$

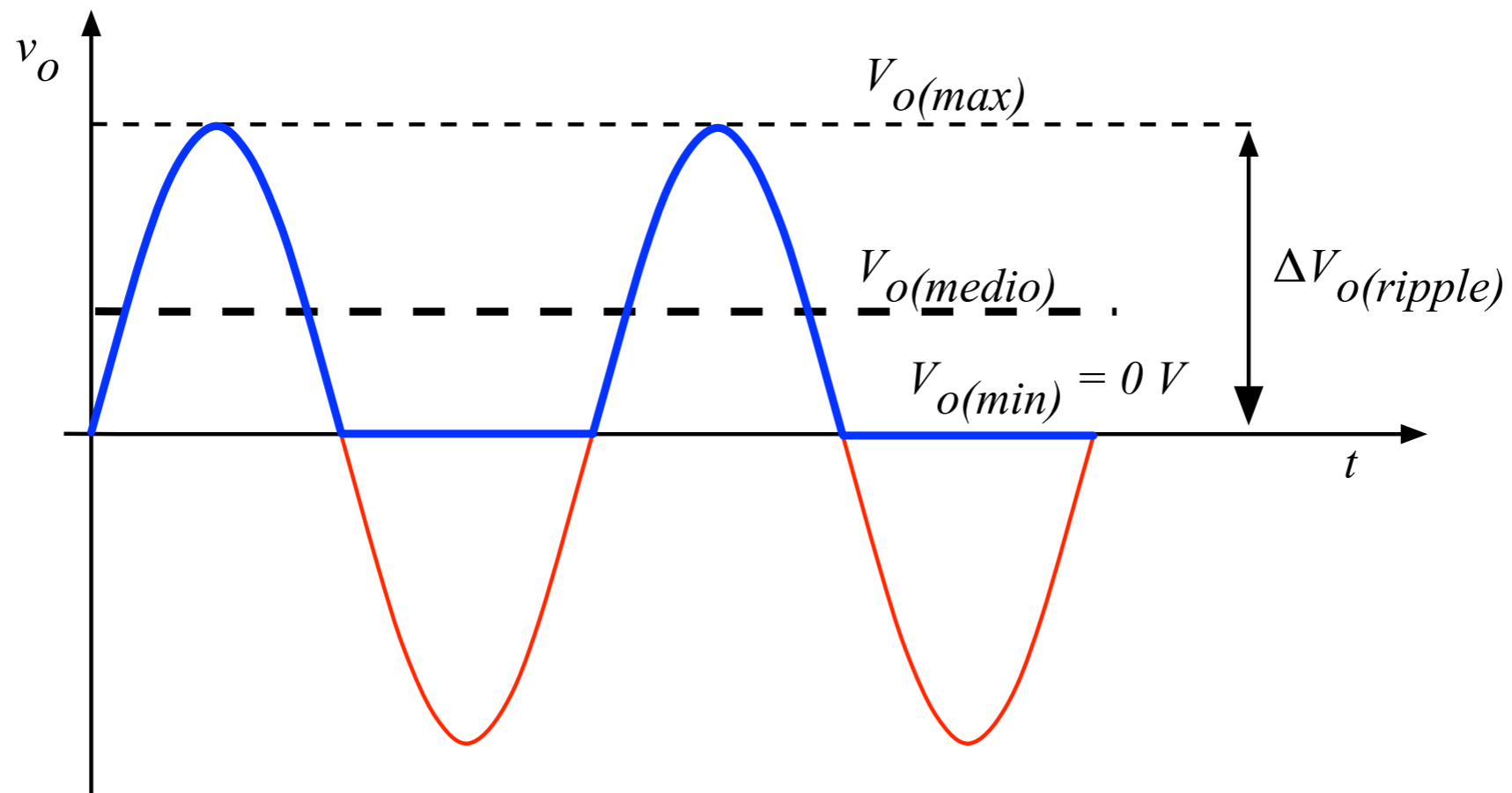


# Fator de ripple

Retificador de meia onda:

$$\Delta V_o = V_{o(max)} - V_{o(min)} = V_{o(max)} - 0 = V_{o(max)}$$

$$\Delta V_o(\%) = \frac{\Delta V_o}{V_{o(max)}} \cdot 100 = \frac{V_{o(max)}}{V_{o(max)}} \cdot 100 = 100\%$$

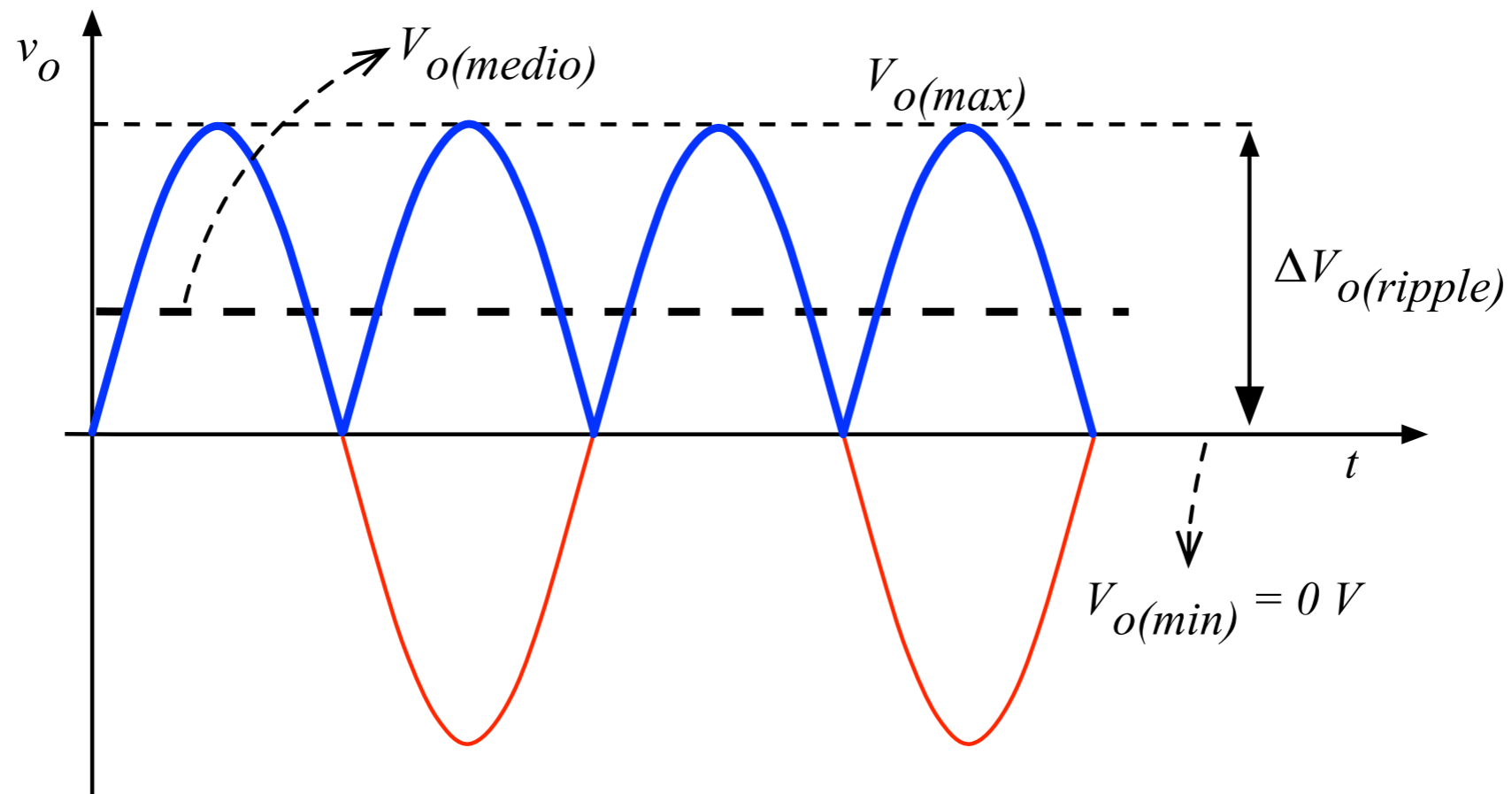


# Fator de ripple

Retificador de onda completa (ponte ou tap central):

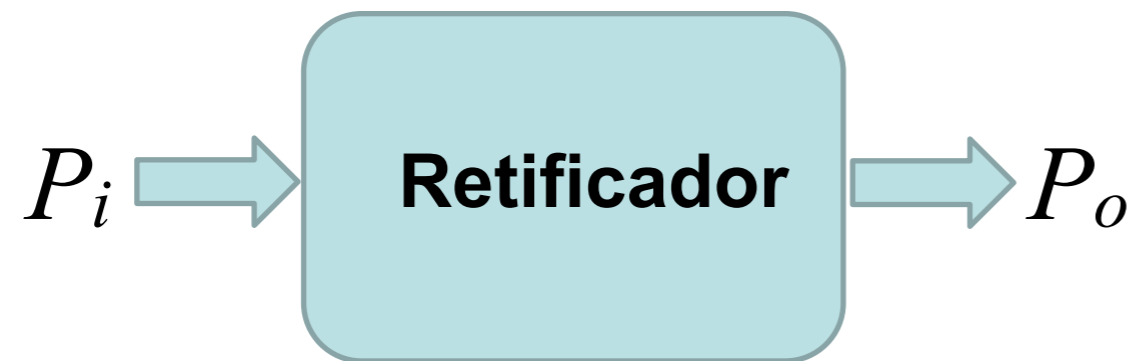
$$\Delta V_o = V_{o(max)} - V_{o(min)} = V_{o(max)} - 0 = V_{o(max)}$$

$$\Delta V_o(\%) = \frac{\Delta V_o}{V_{o(max)}} \cdot 100 = \frac{V_{o(max)}}{V_{o(max)}} \cdot 100 = 100\%$$



# Aproveitamento do transformador

Retificador de meia onda - no transformador:



Relação das potências

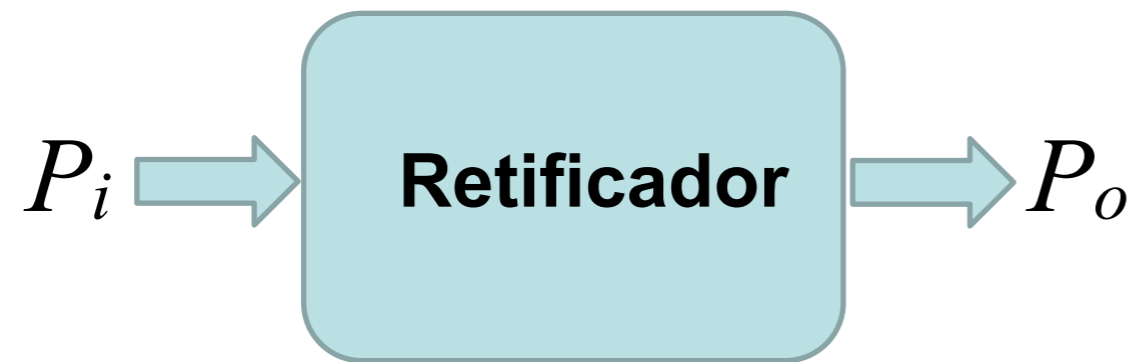


$$\frac{P_i}{P_o} = 3,49$$

$$P_i = 3,49 \cdot P_o$$

# Aproveitamento do transformador

Retificador de onda completa em ponte - no transformador:



Relação das potências



$$\frac{P_i}{P_o} = 1,23$$

$$P_i = 1,23 \cdot P_o$$

# Aproveitamento do transformador

Retificador de onda completa em com tap central - no transformador:



Relação das potências



$$\frac{P_i}{P_o} = 1,75$$

$$P_i = 1,75 \cdot P_o$$

# Resumo do comportamento dos retificadores

Grandeza	Meia onda	Onda completa (tap central)	Onda completa (ponte)
Tensão média na carga $V_{o(medio)}$	$\frac{V_{o(max)}}{\pi}$	$2 \cdot \frac{V_{o(max)}}{\pi}$	$2 \cdot \frac{V_{o(max)}}{\pi}$
Tensão eficaz na carga $V_{o(eficaz)}$	$\frac{V_{o(max)}}{2}$	$\frac{V_{o(max)}}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_{o(max)}}{\sqrt{2}}$
Tensão reversa nos diodos $V_{D(max)}$	$V_{o(max)}$	$2 \cdot V_{o(max)}$	$V_{o(max)}$
Fator de ripple $r$	120 %	48 %	48 %
Capacidade do transformador	$3,49 \cdot P_o$	$1,75 \cdot P_o$	$1,23 \cdot P_o$

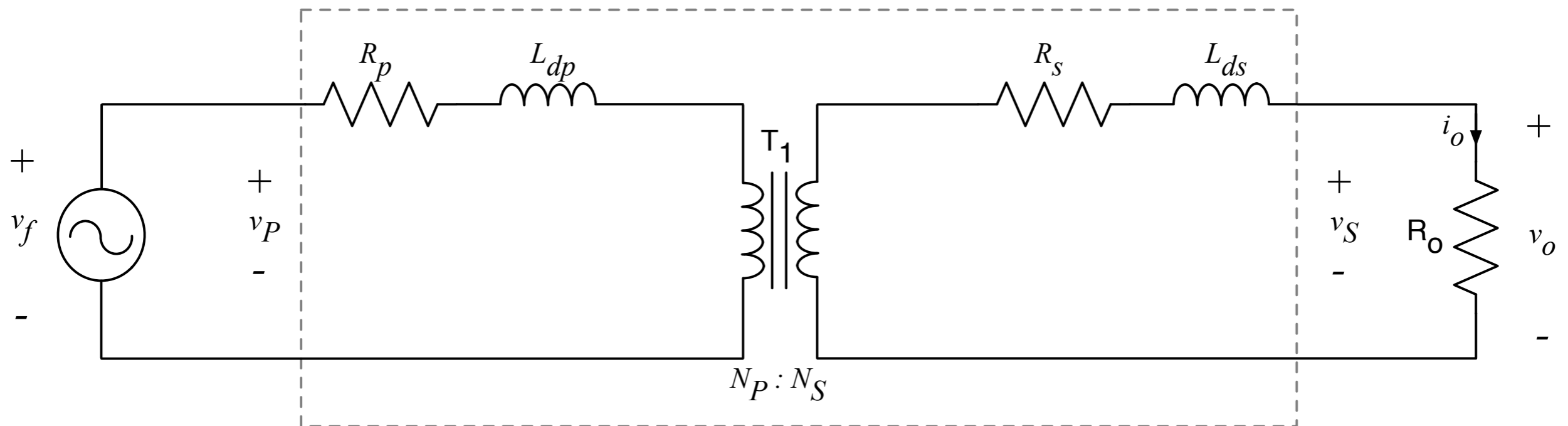
# Regulação de um transformador

## Regulação de um transformador:

- Com carga, a tensão de saída de um transformador é diferente do que na situação em aberto, ou seja, a vazio.

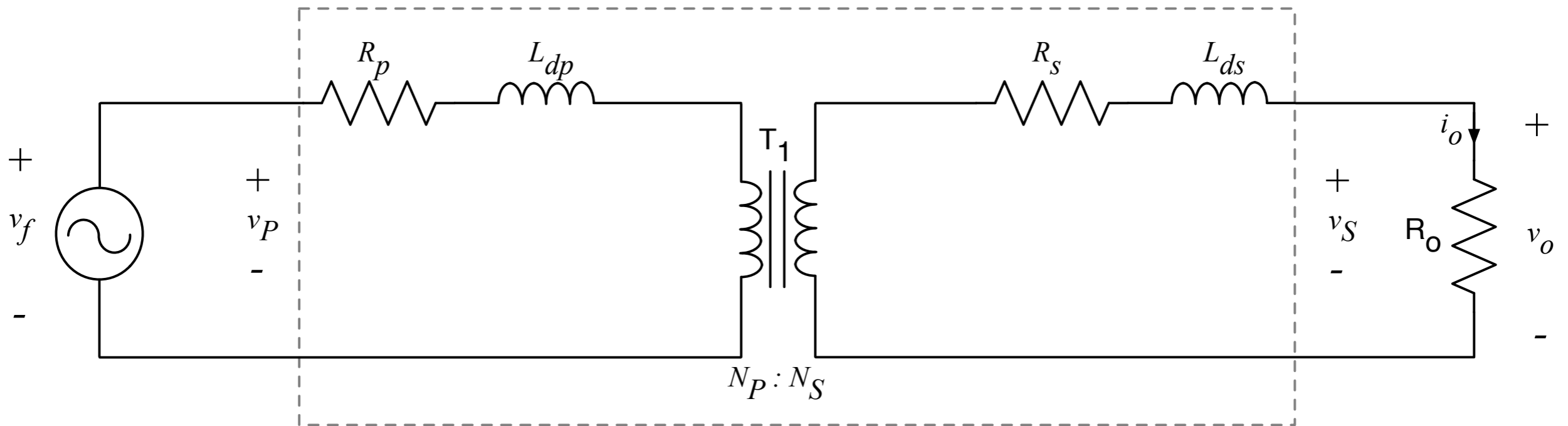
$$\text{Regulação} = \frac{\text{tensão sem carga} - \text{tensão com carga nominal}}{\text{tensão com carga nominal}}$$

Transformador



# Regulação de um transformador

Transformador



$$VR(\%) = \frac{V_{vazio} - V_{carga}}{V_{carga}} \cdot 100$$

Exemplo:

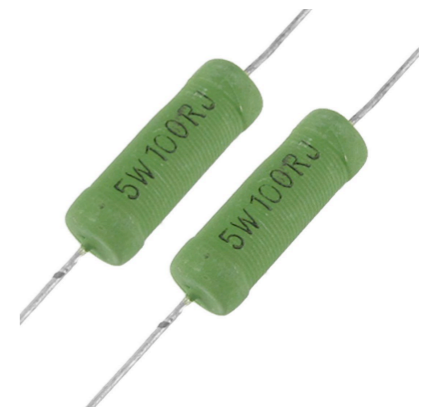
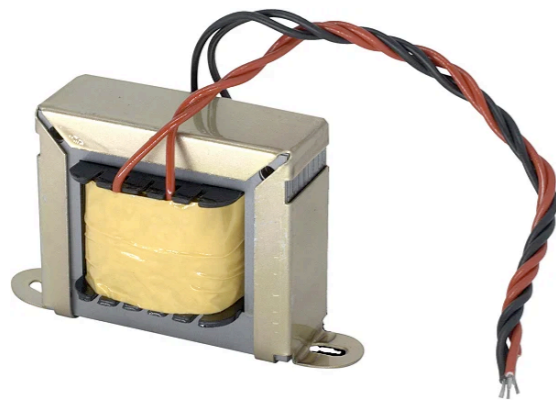
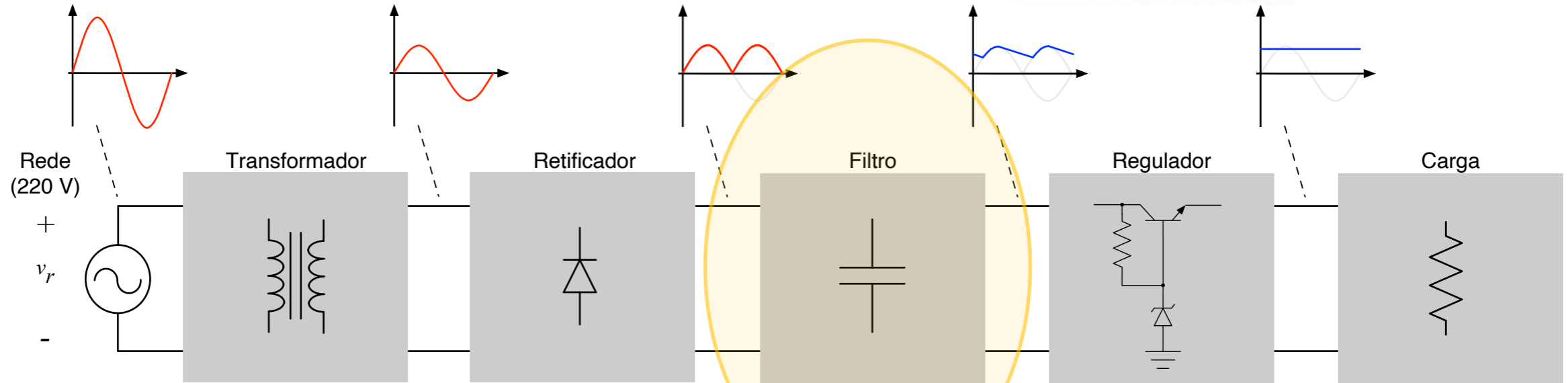
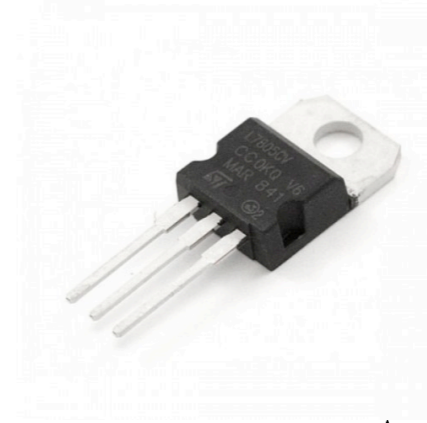
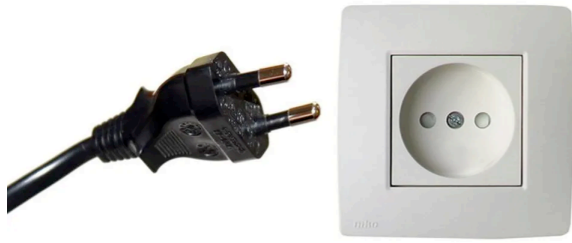
$$V_{vazio} = 14V$$

$$V_{carga} = 12V$$

$$VR(\%) = \frac{V_{vazio} - V_{carga}}{V_{carga}} \cdot 100 = \frac{14 - 12}{12} \cdot 100$$

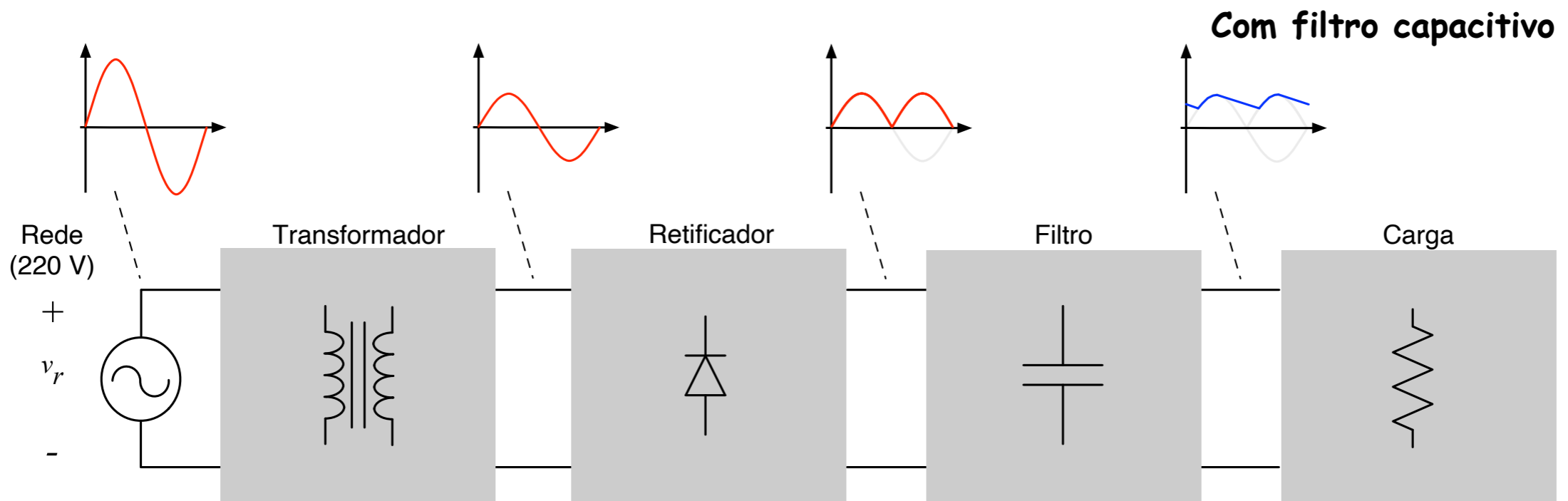
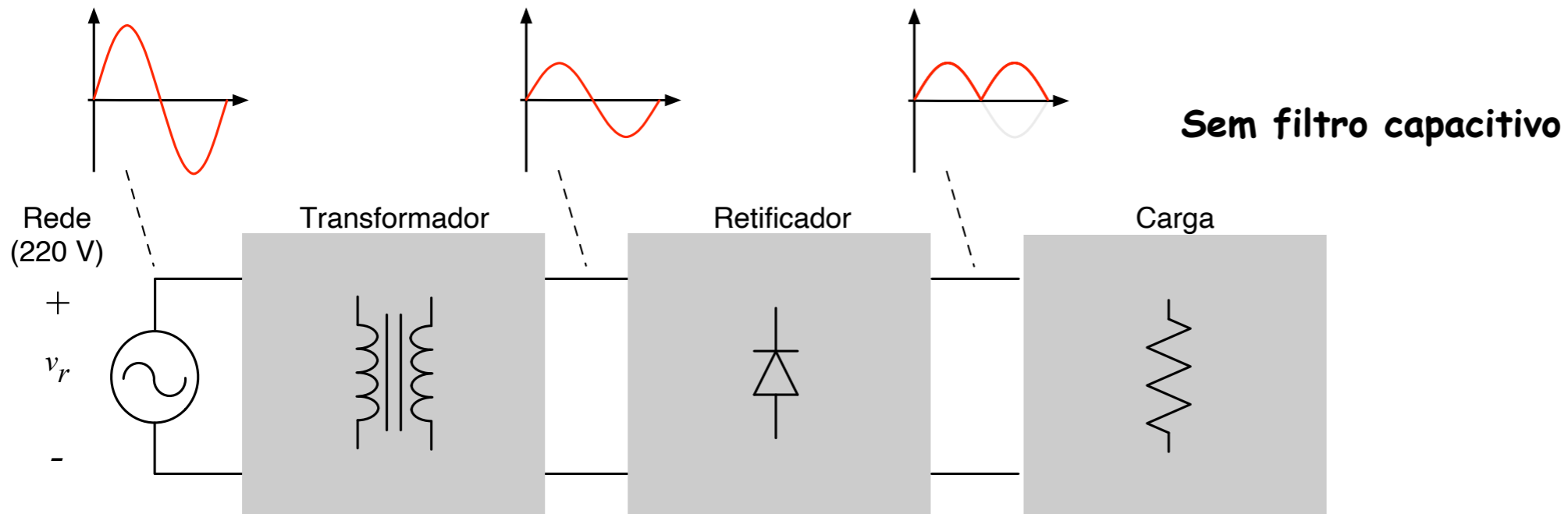
$$VR(\%) = 16,7\%$$

# Fonte Linear



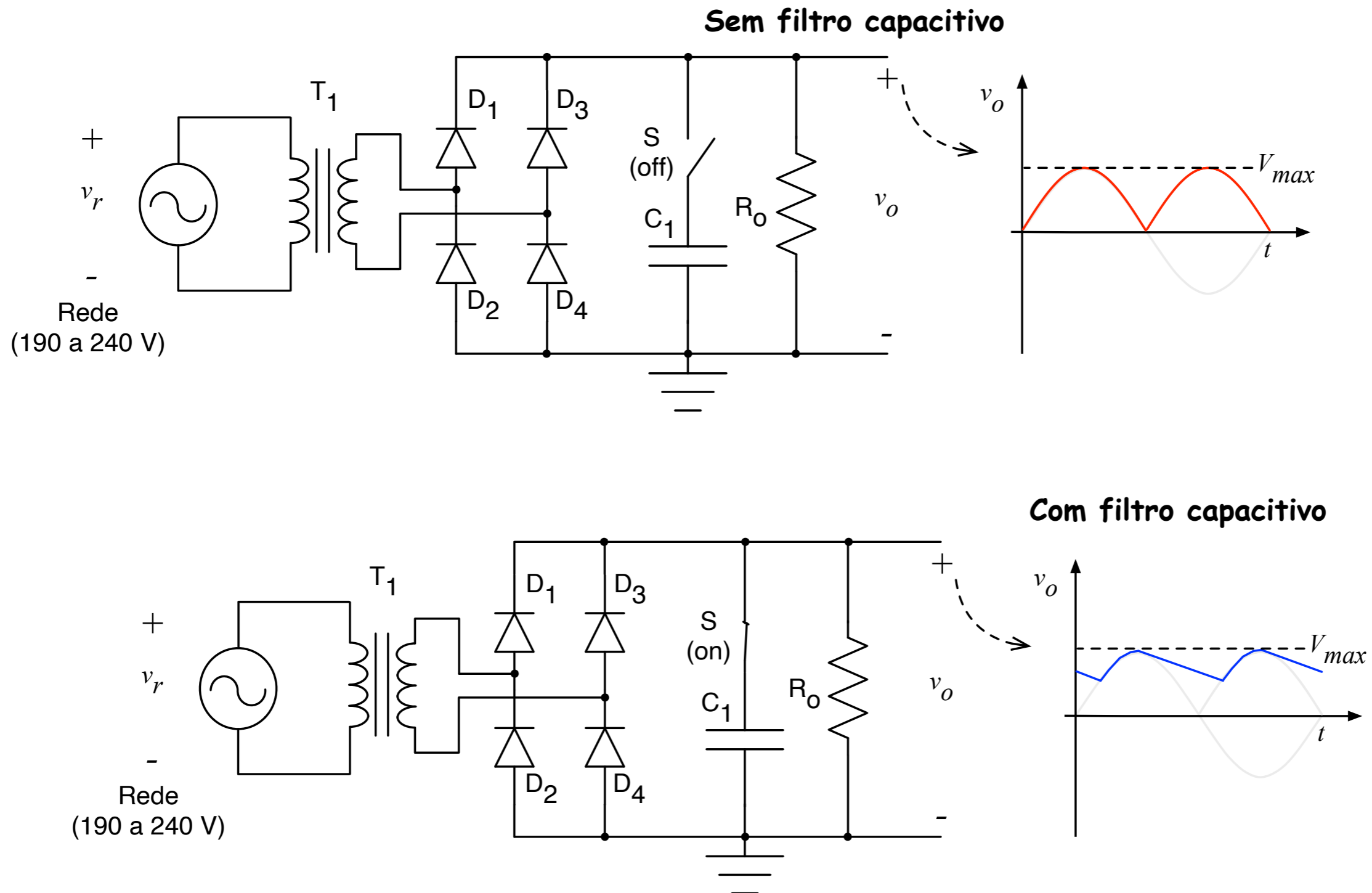
# Filtragem com capacitor

Fonte linear sem e com filtro capacitivo:

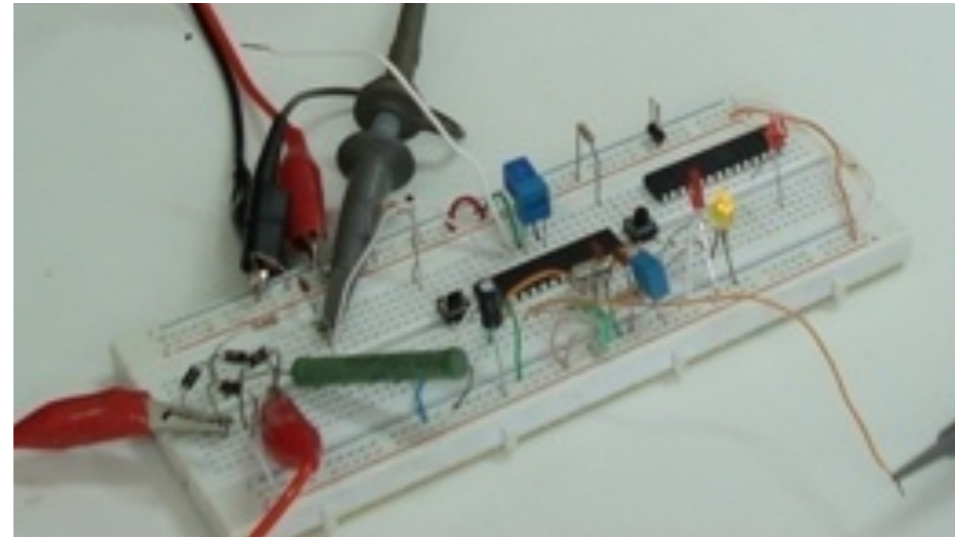
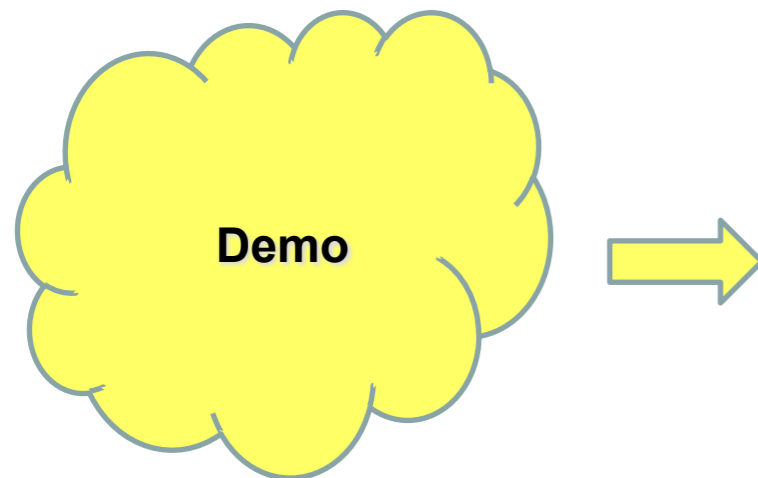


# Filtragem com capacitor

Fonte linear sem e com filtro capacitivo:



# Filtragem com capacitor

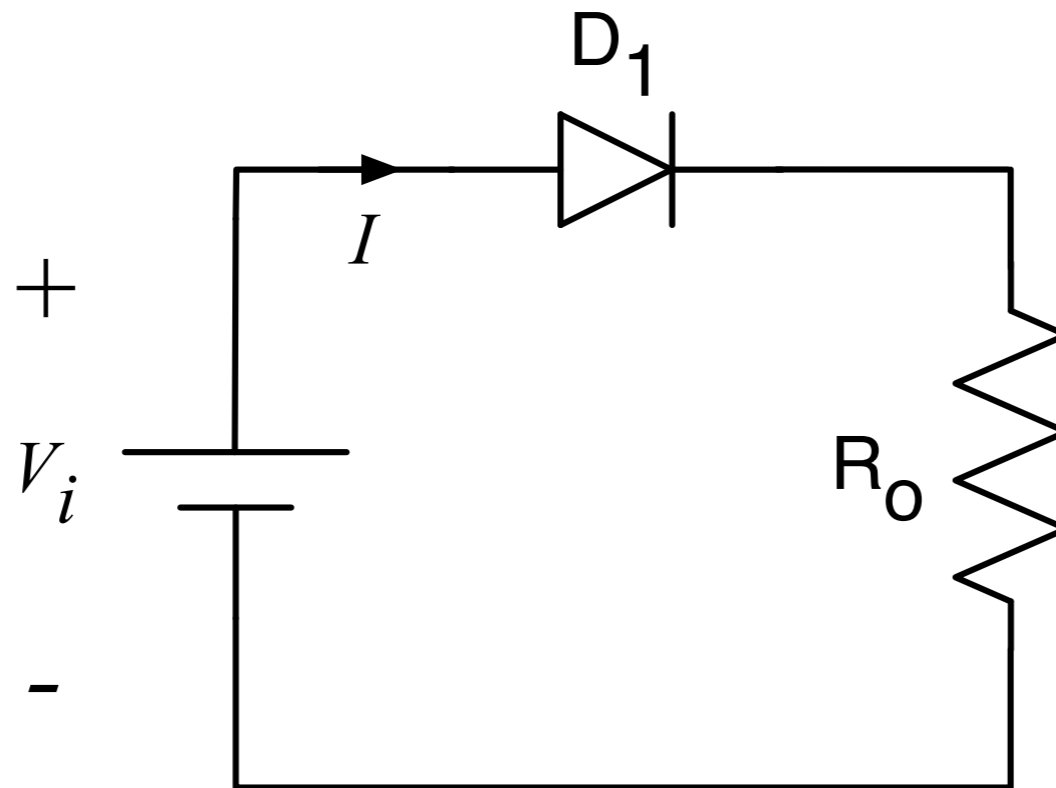


Demo:  
• Filtragem com capacitor.

# Filtragem com capacitor

## Considerações iniciais:

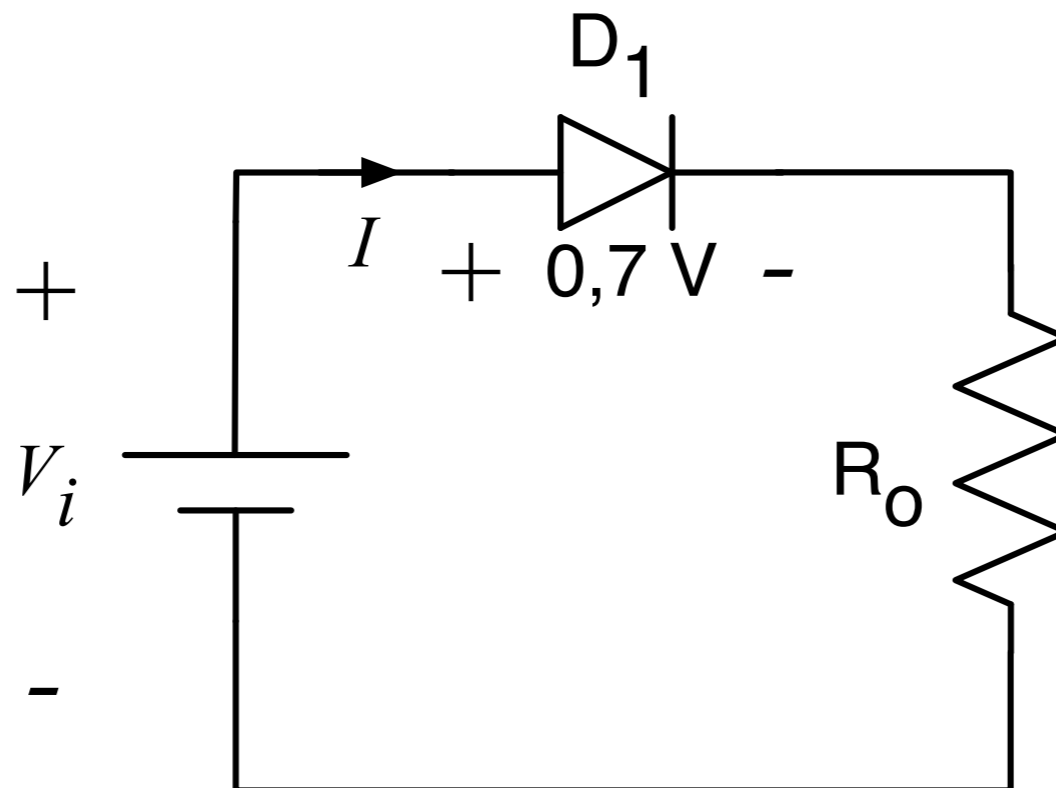
- Diodo ideal;
- Caso  $V_i$  seja maior que zero, o diodo irá conduzir;
- O diodo irá conduzir indefinidamente.



# Filtragem com capacitor

## Considerações iniciais:

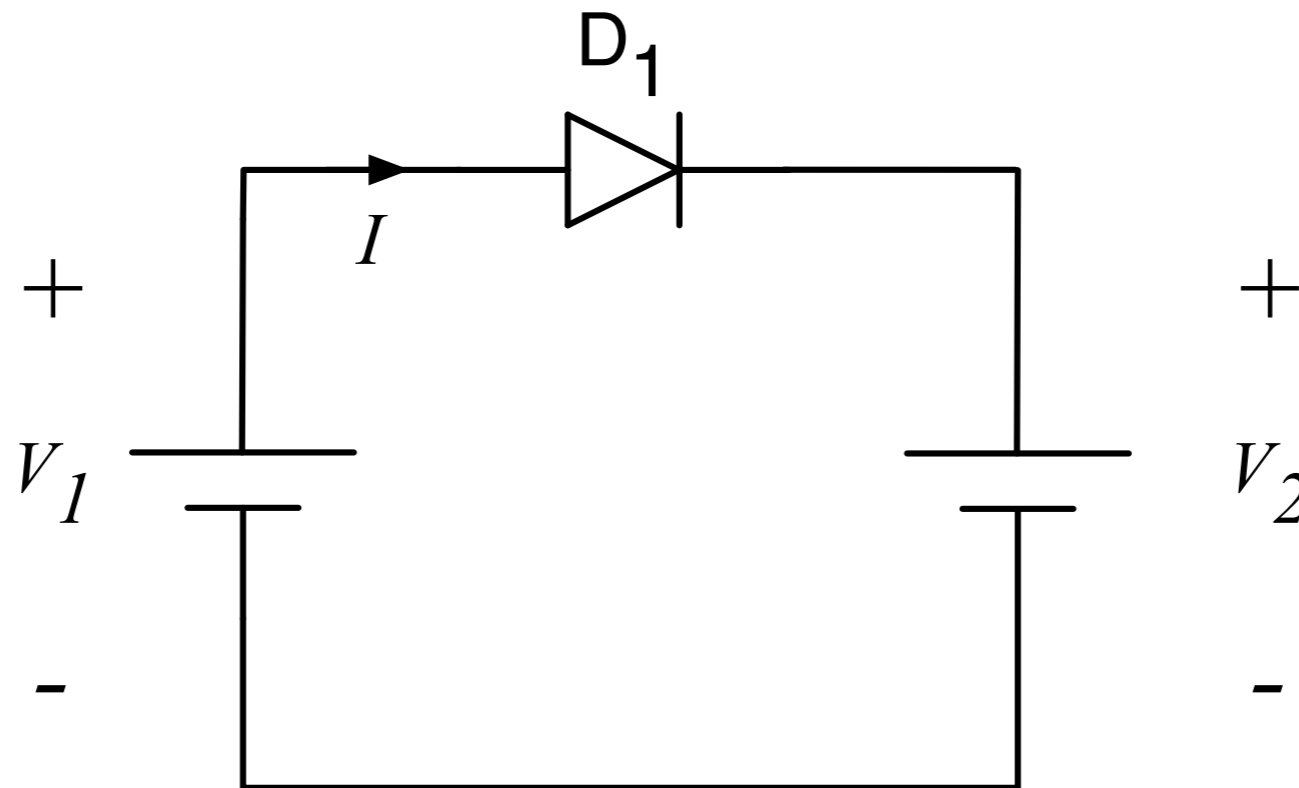
- Diodo real com queda de tensão de 0,7 V;
- O diodo irá conduzir caso  $V_i$  seja maior que 0,7 V ( $V_i > 0,7$ );
- O diodo irá conduzir indefinidamente se  $V_i > 0,7$  V.



# Filtragem com capacitor

## Considerações iniciais:

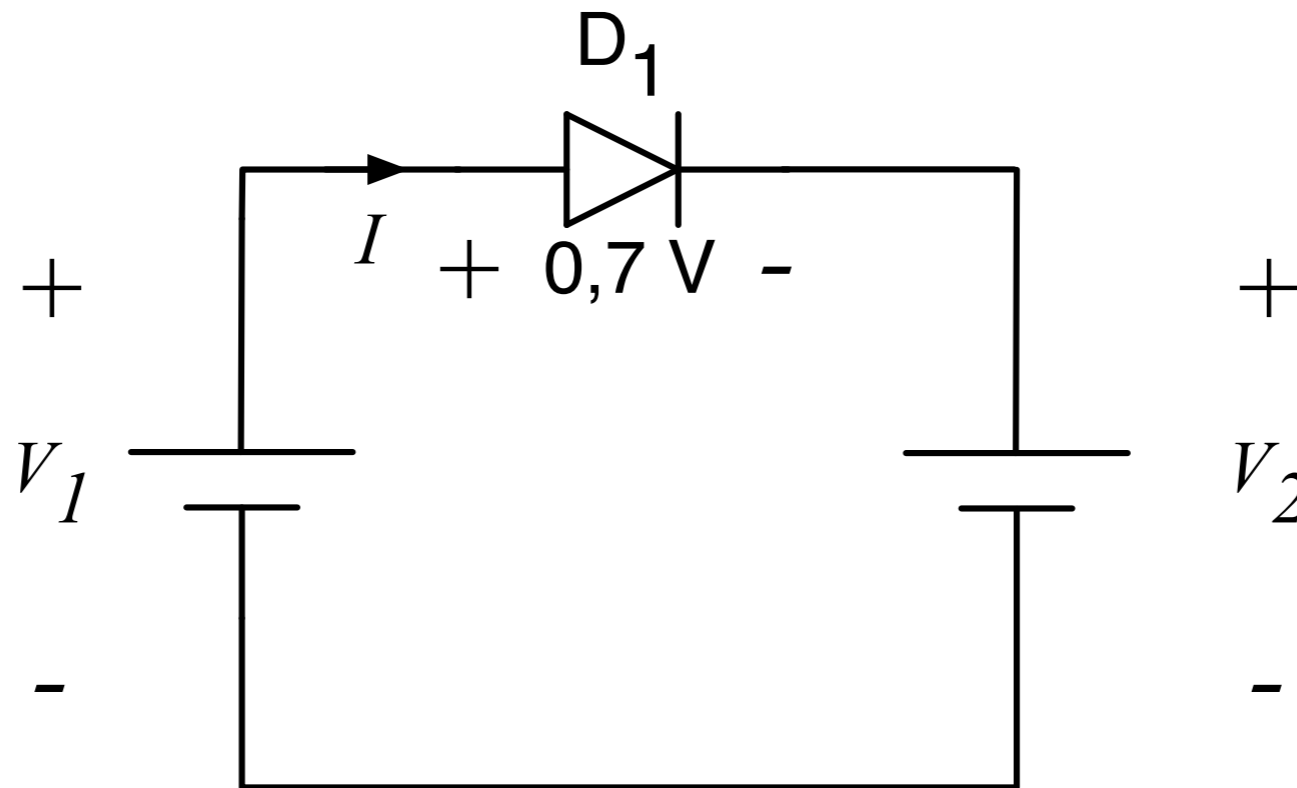
- Diodo ideal;
- O diodo irá conduzir se  $V_1$  for maior que  $V_2$  ( $V_1 > V_2$ );
- O diodo irá conduzir indefinidamente se  $V_1 > V_2$ .



# Filtragem com capacitor

## Considerações iniciais:

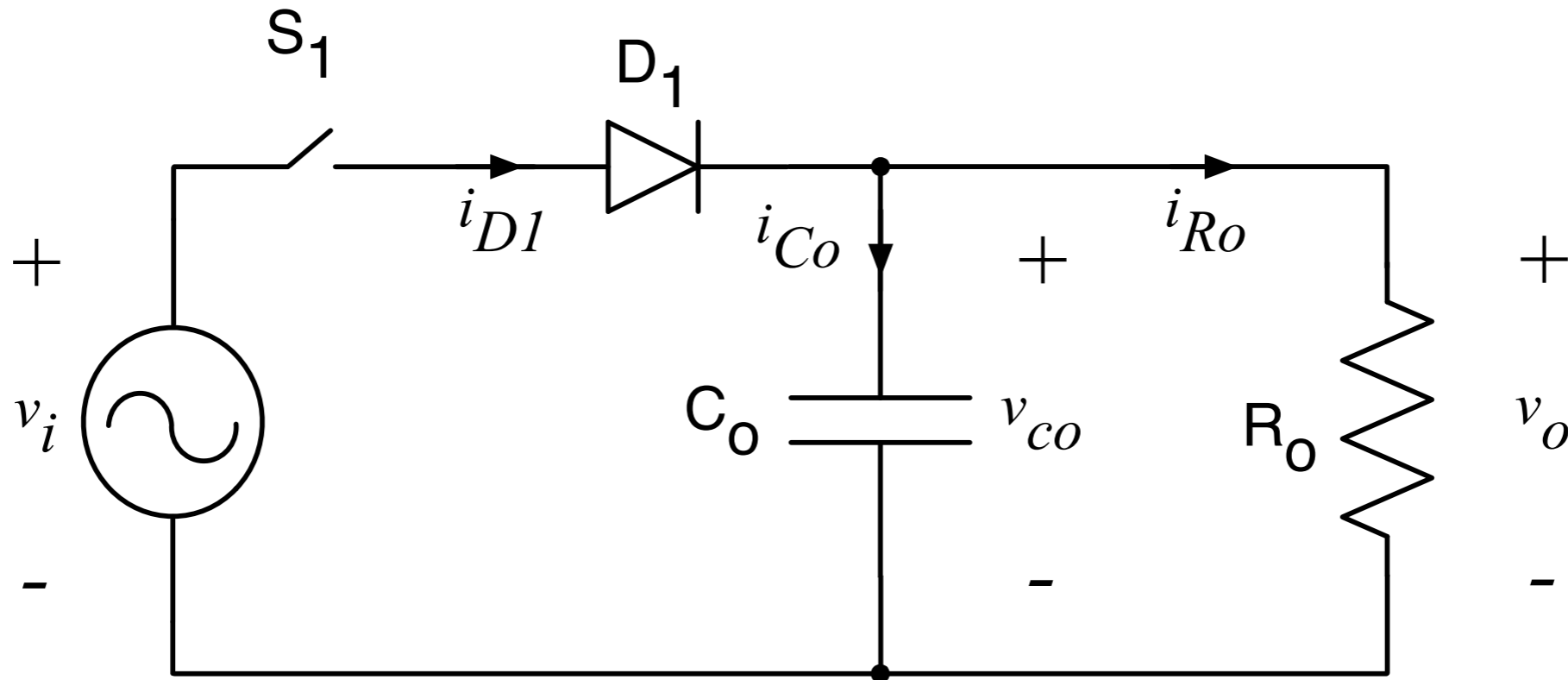
- Diodo real com queda de tensão de 0,7 V;
- O diodo irá conduzir caso  $V_1$  seja maior que  $V_2 + 0,7$  V ( $V_1 > (V_2 + 0,7)$ );
- O diodo irá conduzir indefinidamente se  $V_1 > V_2 + 0,7$  V.



# Filtragem com capacitor

## Retificador de meia onda (funcionamento):

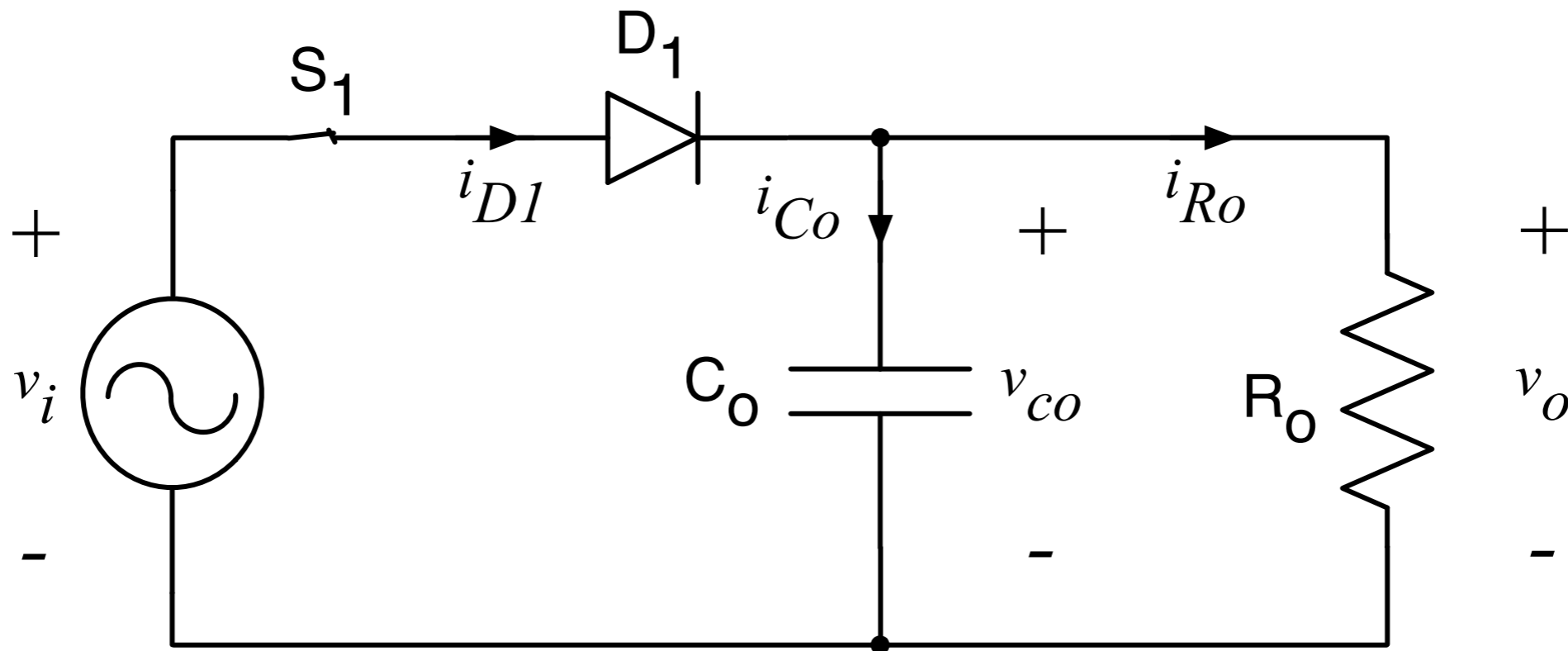
- Inicialmente a chave  $S_1$  está aberta;
- O capacitor está descarregado, então  $v_{Co} = 0$  V;
- O diodo não está conduzindo e sua corrente é igual a zero ( $i_{D1} = 0$  A).



# Filtragem com capacitor

**Retificador de meia onda (funcionamento inicial no semiciclo positivo):**

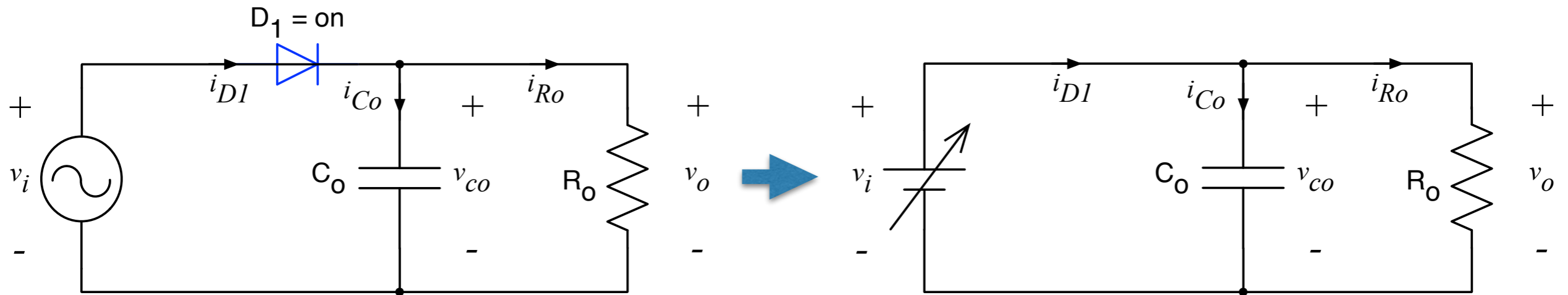
- No instante zero ( $t = 0$ ) a chave  $S_1$  será fechada;
- O diodo é considerado ideal;
- O diodo entrará em condução, pois  $v_i$  será maior que  $v_{Co}$  ( $v_i > v_{Co}$ );
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão de entrada ( $v_{Co} = v_i$ );
- As tensões na carga ( $R_o$ ) e no capacitor são iguais, pois estão em paralelo ( $v_o = v_{Co}$ ).



# Filtragem com capacitor

## Retificador de meia onda (funcionamento no semiciclo positivo):

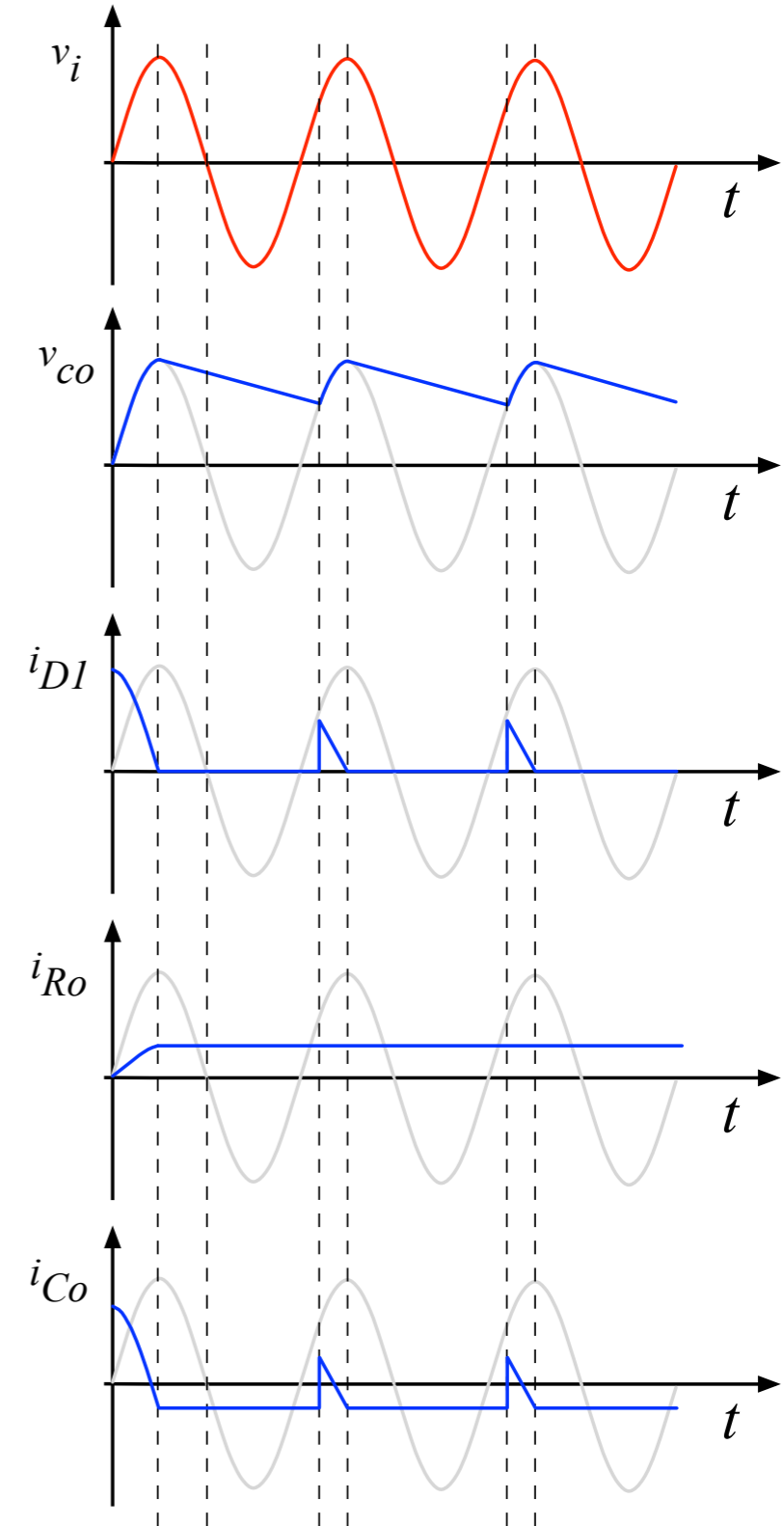
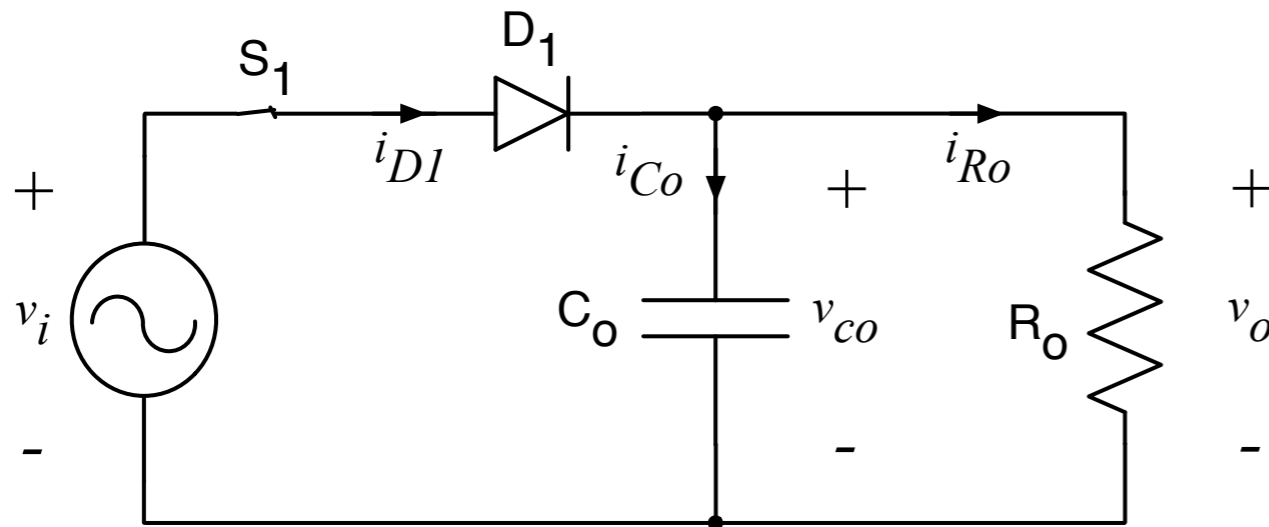
- No semiciclo positivo da tensão de entrada o diodo estará conduzindo (on), desde que a tensão de entrada seja maior que a tensão no capacitor ( $v_i > v_{Co}$ );
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão de entrada ( $v_{Co} = v_i$ );
- A corrente no diodo ( $i_{D1}$ ) é composta pela corrente do capacitor ( $i_{Co}$ ) e da carga ( $i_{Ro}$ ).



# Filtragem com capacitor

Retificador de meia onda (etapas de funcionamento):

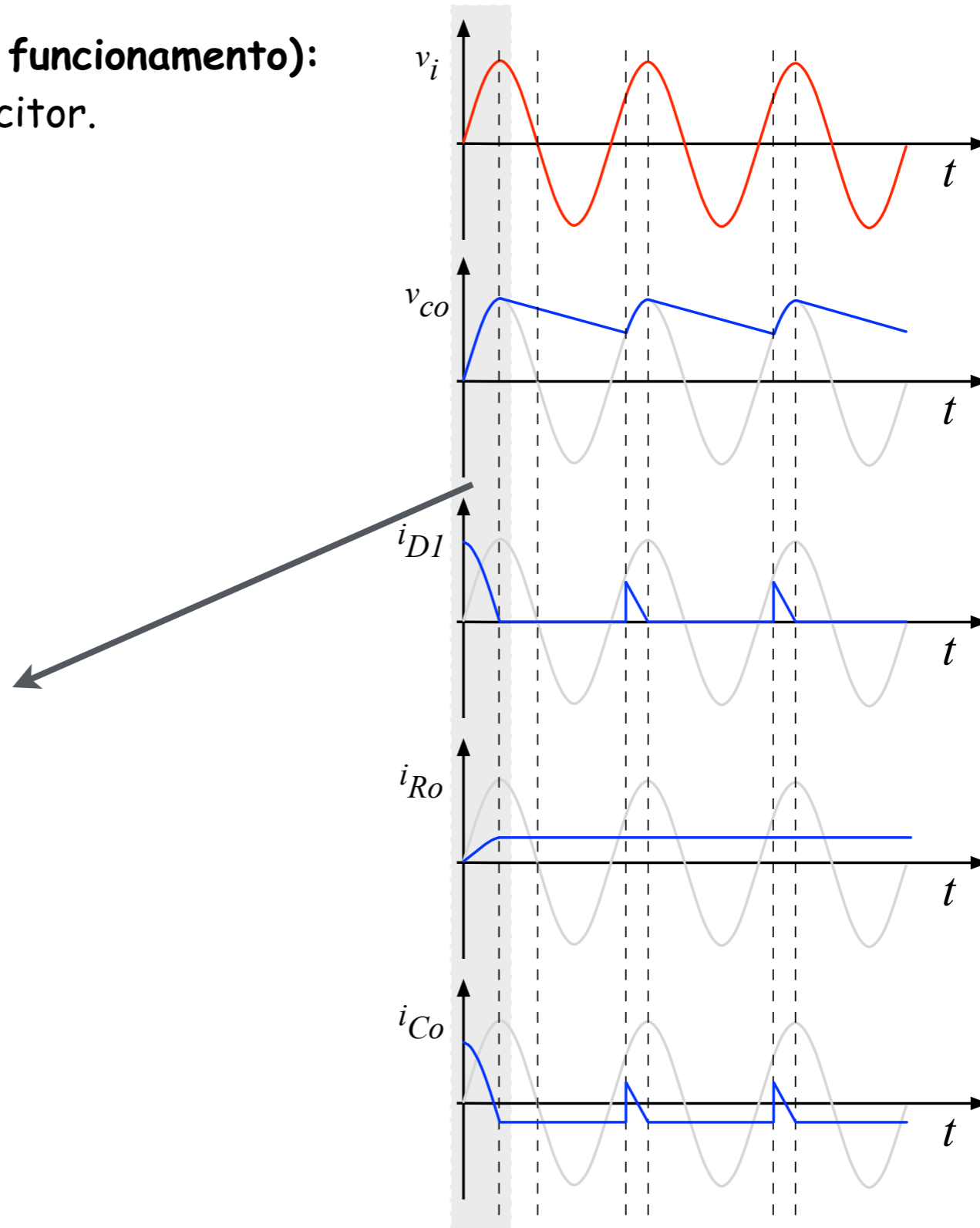
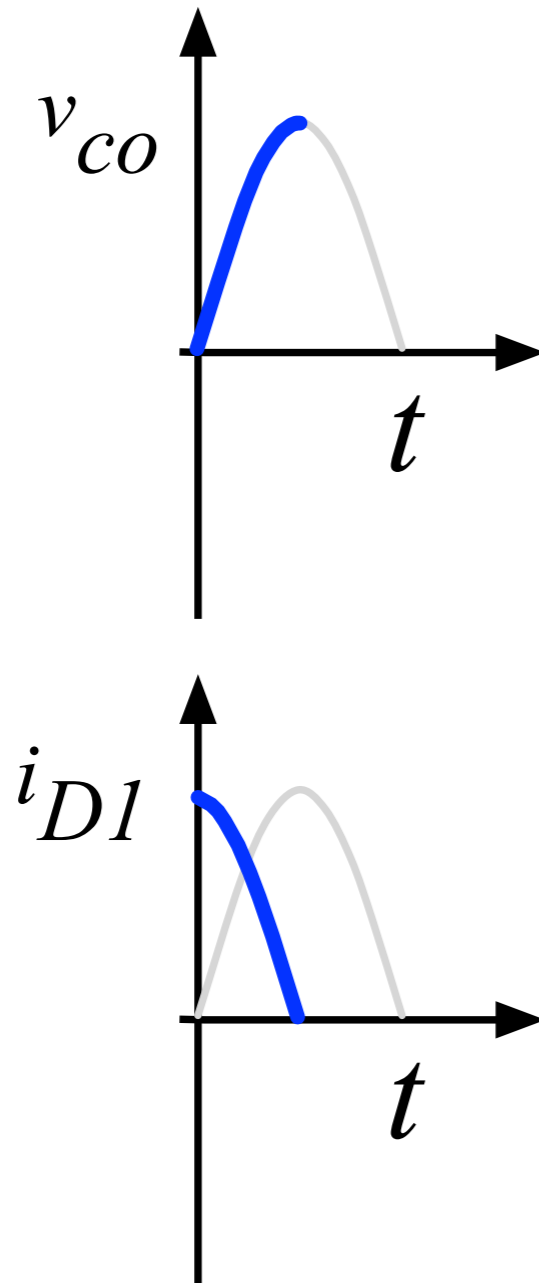
- Ao ligar a chave  $S_1$  ocorre a carga inicial do capacitor;
- As principais formas de onda são mostradas na figura.



# Filtragem com capacitor

Retificador de meia onda (etapas de funcionamento):

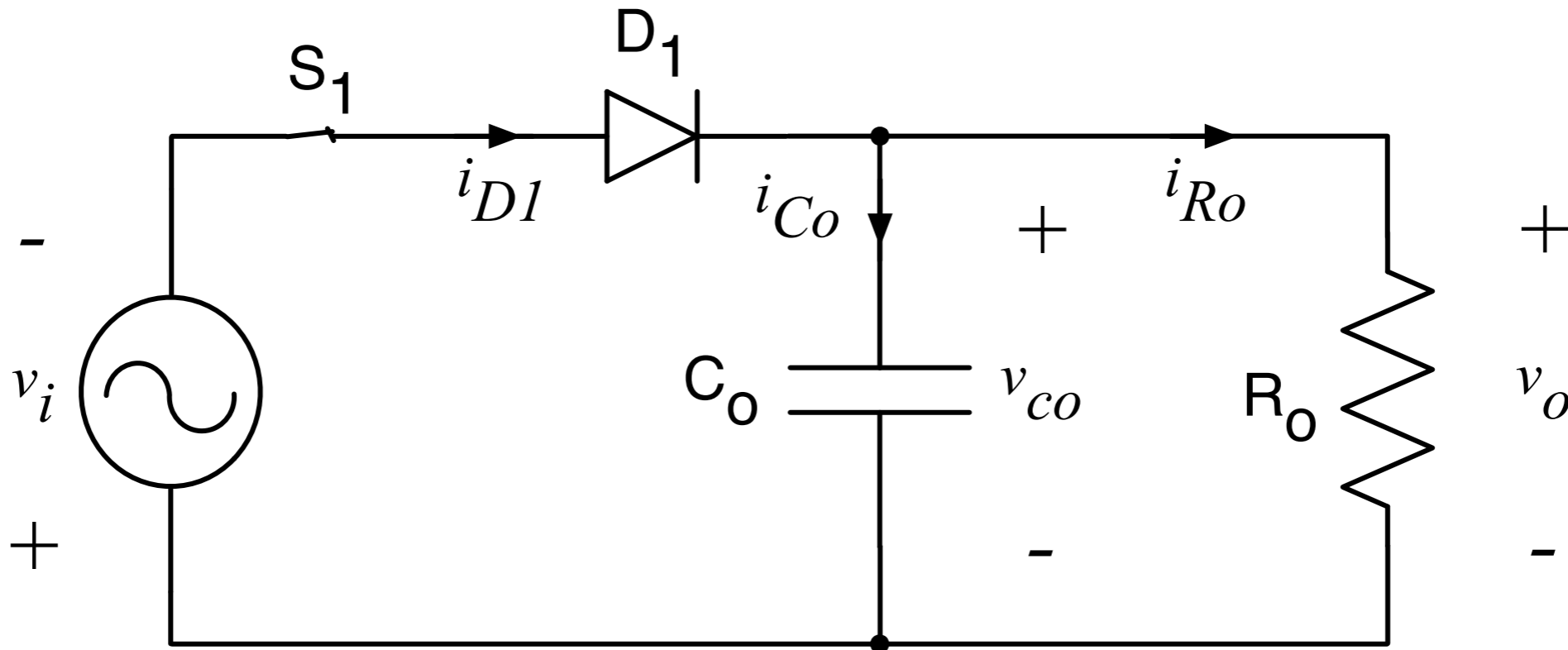
- Processo de carga inicial do capacitor.



# Filtragem com capacitor

Retificador de meia onda (funcionamento no semiciclo negativo):

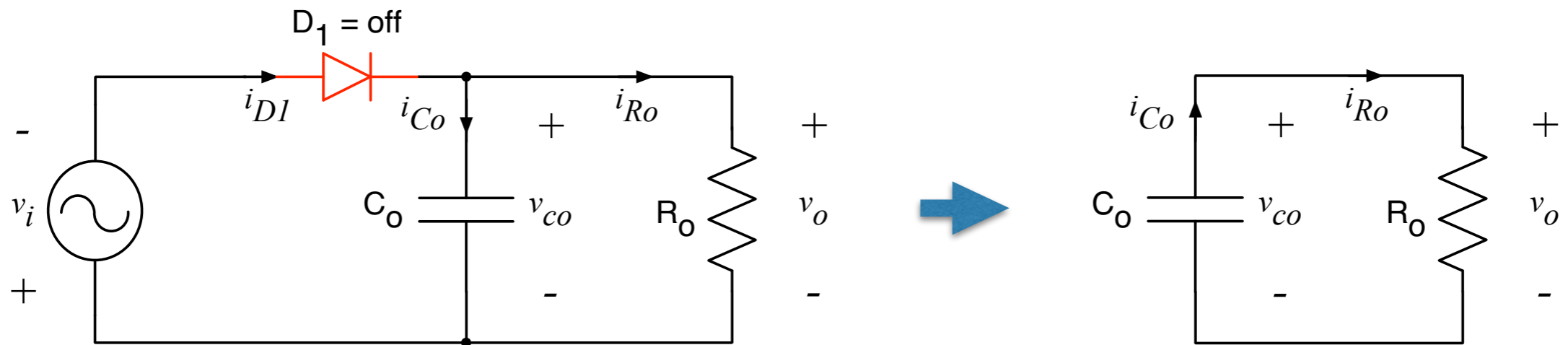
- A chave  $S_1$  permanece fechada;
- O diodo é considerado ideal;
- O diodo estará bloqueado, pois  $v_i$  será menor que  $v_{Co}$  ( $v_i < v_{Co}$ ) e sua corrente será zero ( $i_{D1} = 0$ );
- O capacitor cessa o processo de carga e inicia sua descarga;
- As tensões na carga ( $R_o$ ) e no capacitor são iguais, pois estão em paralelo ( $v_o = v_{Co}$ ).



# Filtragem com capacitor

**Retificador de meia onda (funcionamento no semiciclo negativo):**

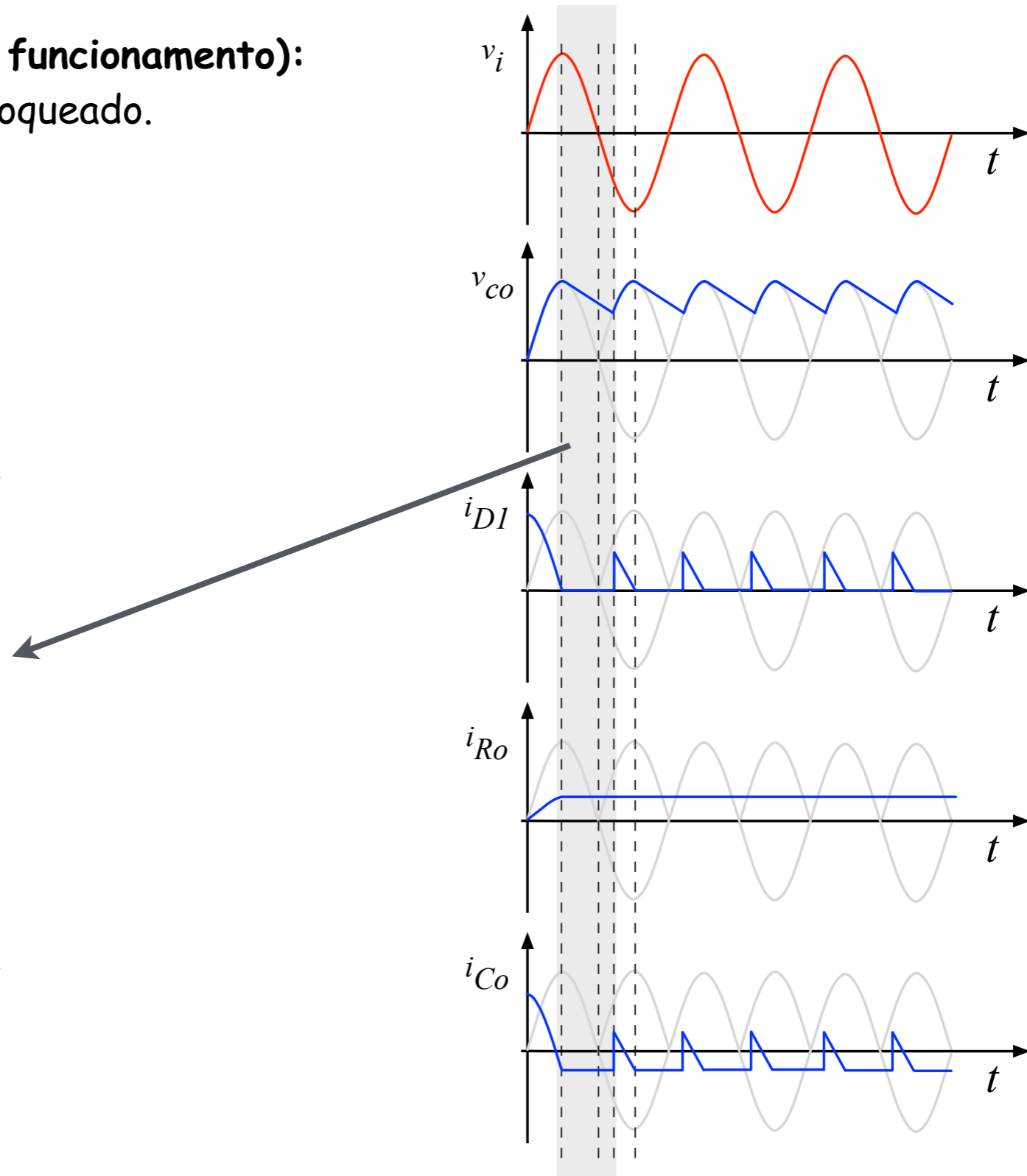
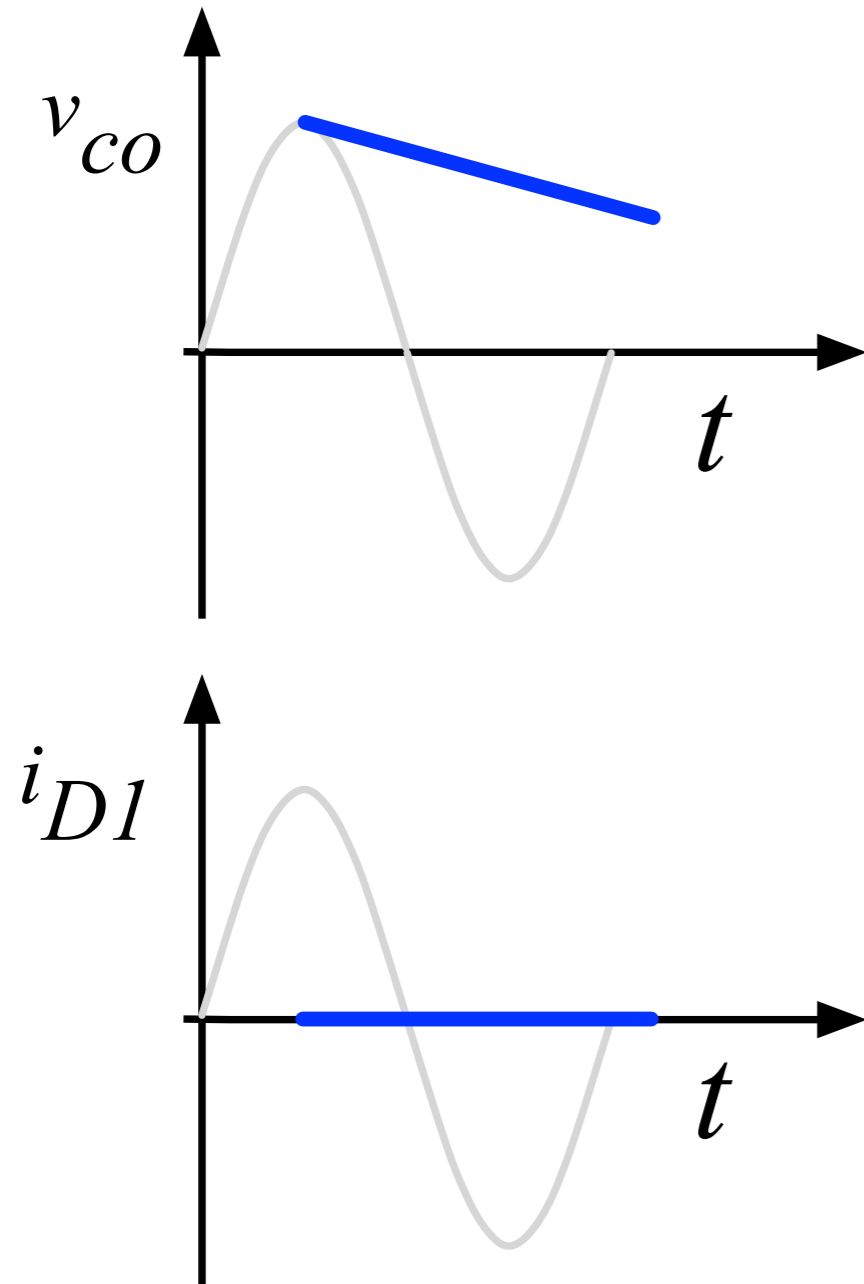
- No semiciclo negativo da tensão de entrada o diodo estará bloqueado (off);
- O capacitor irá descarregar sobre a carga;
- A corrente no diodo ( $i_{D1}$ ) será zero.



# Filtragem com capacitor

Retificador de meia onda (etapas de funcionamento):

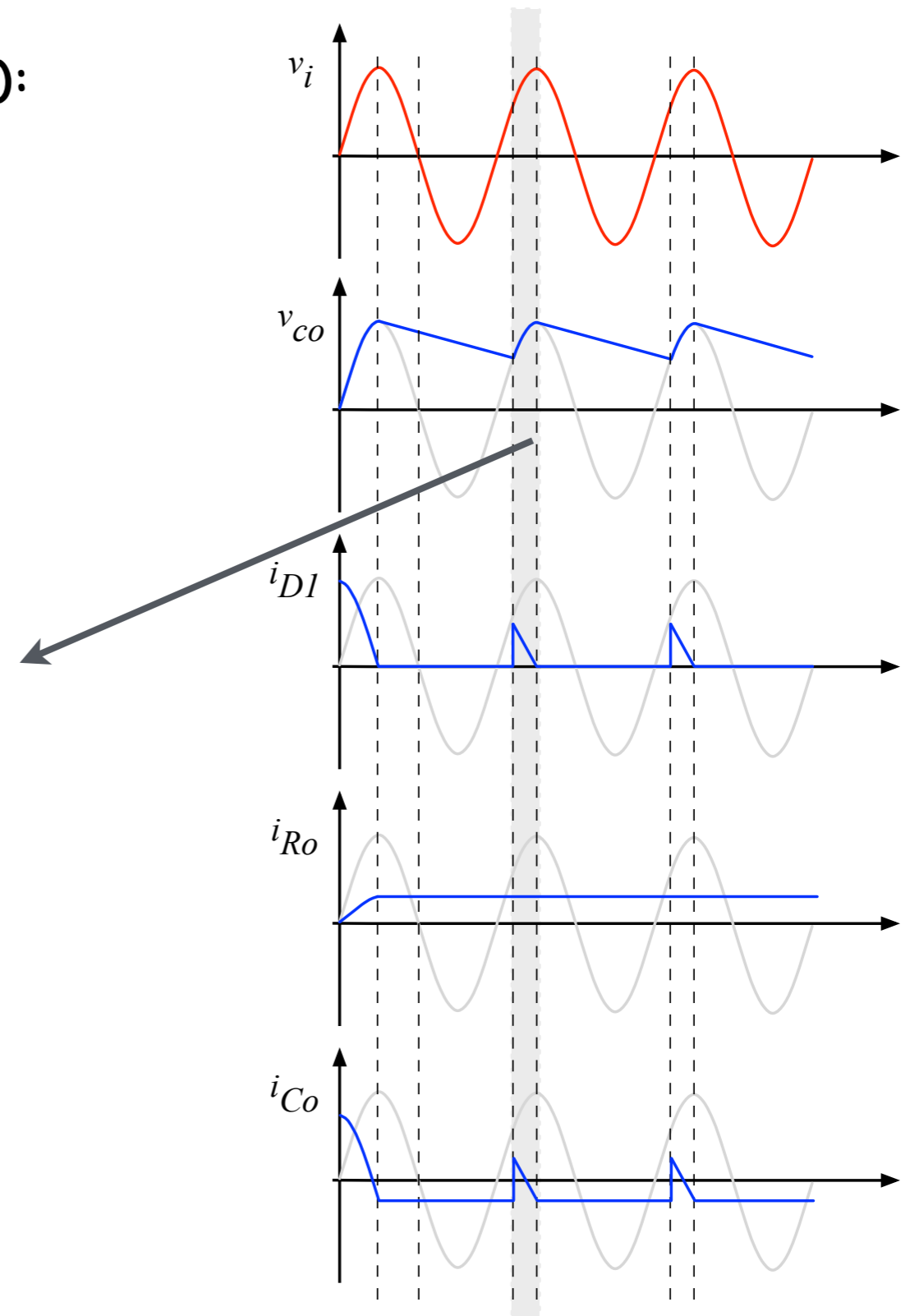
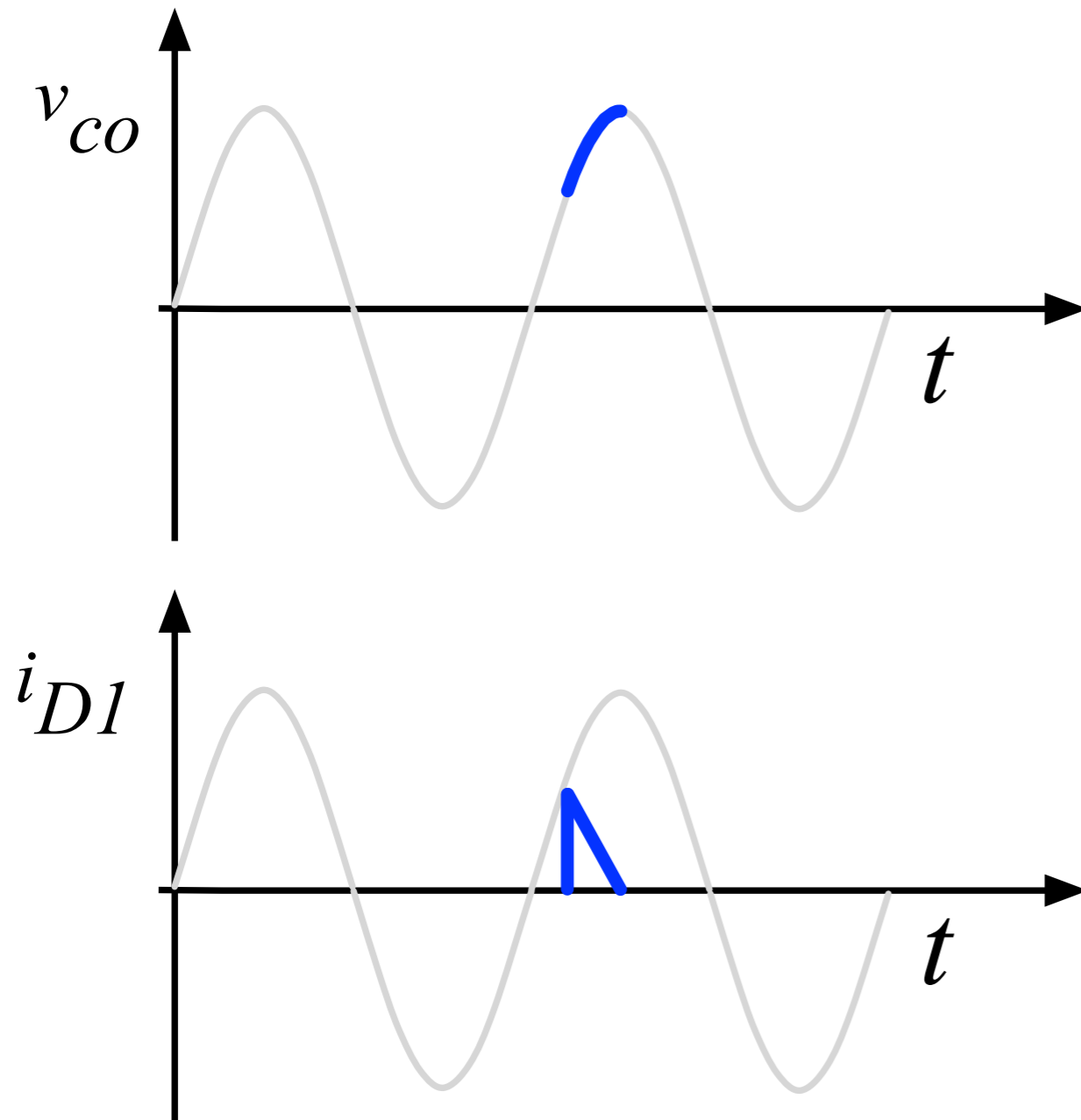
- Descarga do capacitor e diodo bloqueado.



# Filtragem com capacitor

Retificador de meia onda (etapas de funcionamento):

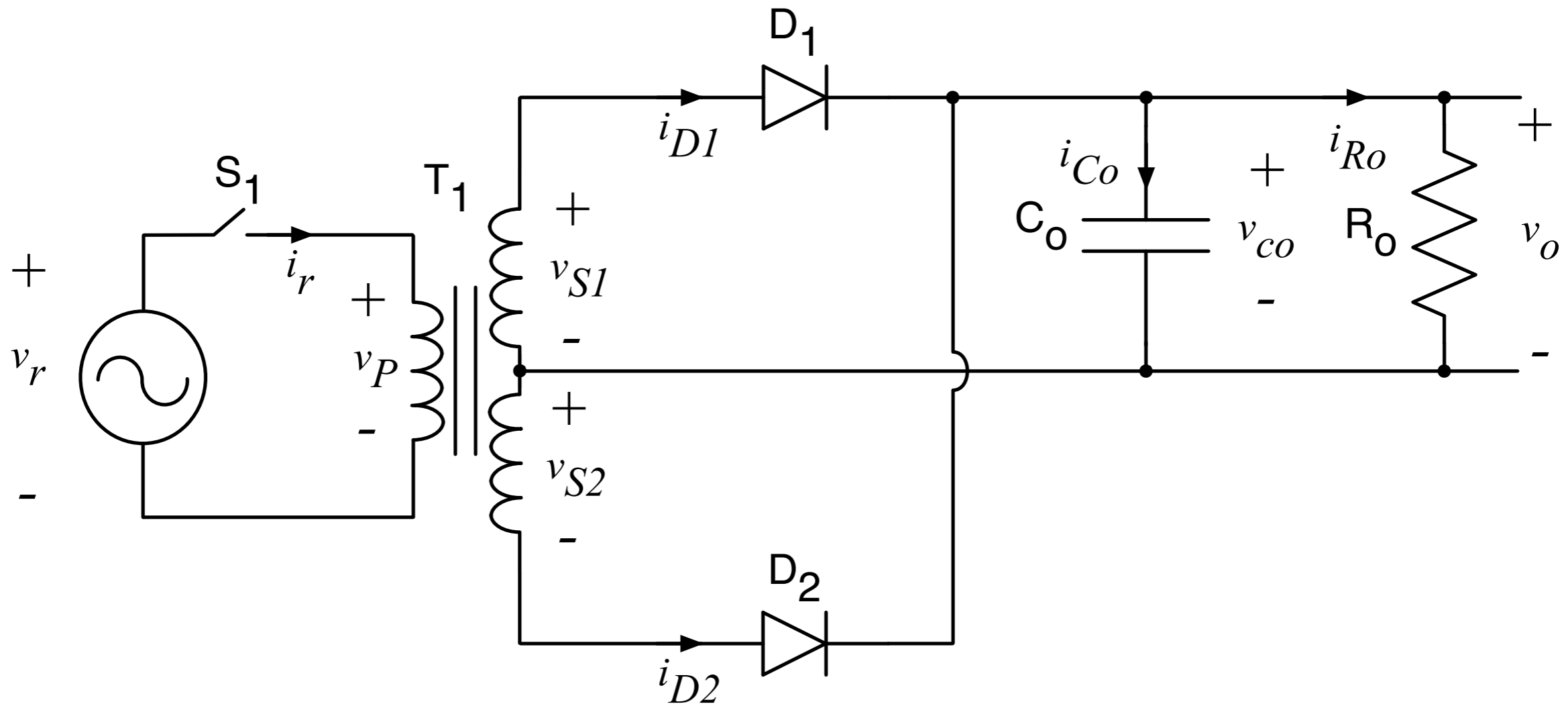
- Novo processo de carga do capacitor.



# Filtragem com capacitor

Retificador de onda completa com derivação (tap) central (funcionamento):

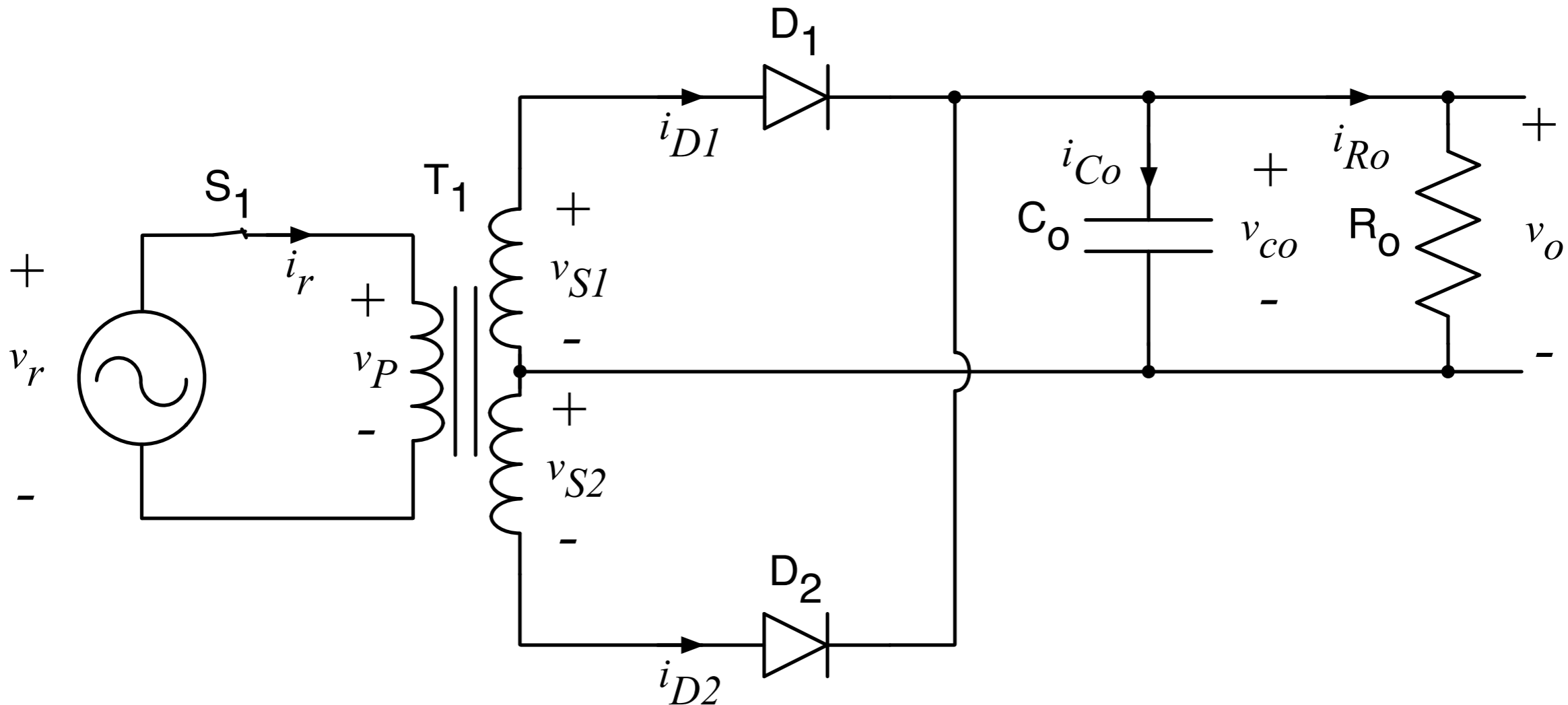
- Inicialmente a chave  $S_1$  está aberta;
- O capacitor está descarregado, então  $v_{C_0} = 0$  V;
- Os diodos não estão conduzindo e suas correntes são iguais a zero ( $i_{D1} = i_{D2} = 0$  A).



# Filtragem com capacitor

Retificador de onda completa com derivação (tap) central (ligando o circuito):

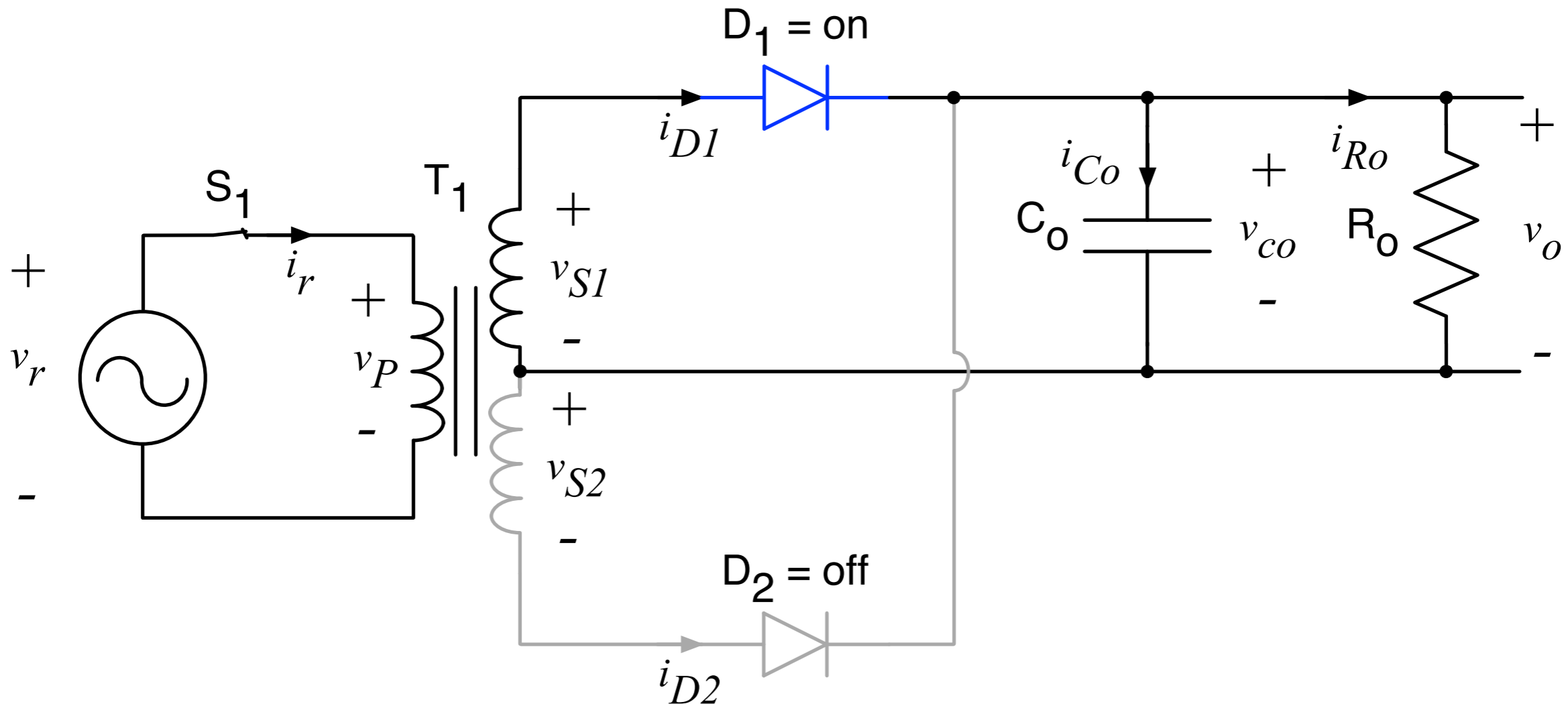
- No instante zero ( $t = 0$ ) a chave  $S_1$  será fechada;
- Os diodos são considerados ideais;
- O diodo  $D_1$  entrará em condução, pois  $v_{S1}$  será maior que  $v_{C0}$  ( $v_{S1} > v_{C0}$ );
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão do secundário 1 ( $v_{C0} = v_{S1}$ );
- As tensões na carga ( $R_o$ ) e no capacitor são iguais, pois estão em paralelo ( $v_o = v_{C0}$ ).



# Filtragem com capacitor

**Retificador de onda completa com derivação (tap) central (semiciclo positivo):**

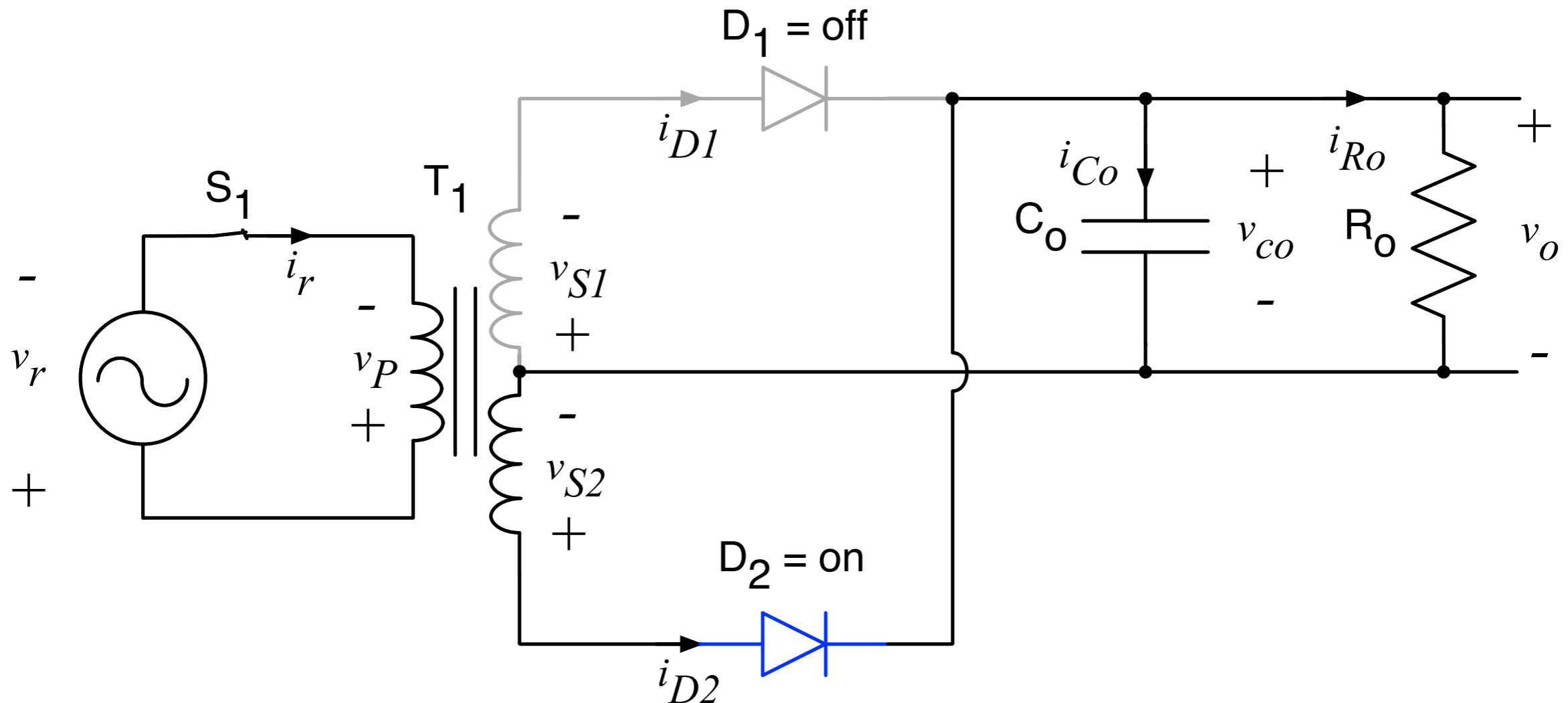
- No semiciclo positivo da tensão de entrada o diodo  $D_1$  estará conduzindo (on), desde que a tensão do secundário 1 seja maior que a tensão no capacitor ( $v_{S1} > v_{Co}$ );
- O diodo  $D_2$  estará bloqueado (off);
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão do secundário 1 ( $v_{Co} = v_{S1}$ );
- A corrente no diodo ( $i_{D1}$ ) é composta pela corrente do capacitor ( $i_{Co}$ ) e da carga ( $i_{Ro}$ ).



# Filtragem com capacitor

## Retificador de onda completa com derivação (tap) central (semiciclo negativo):

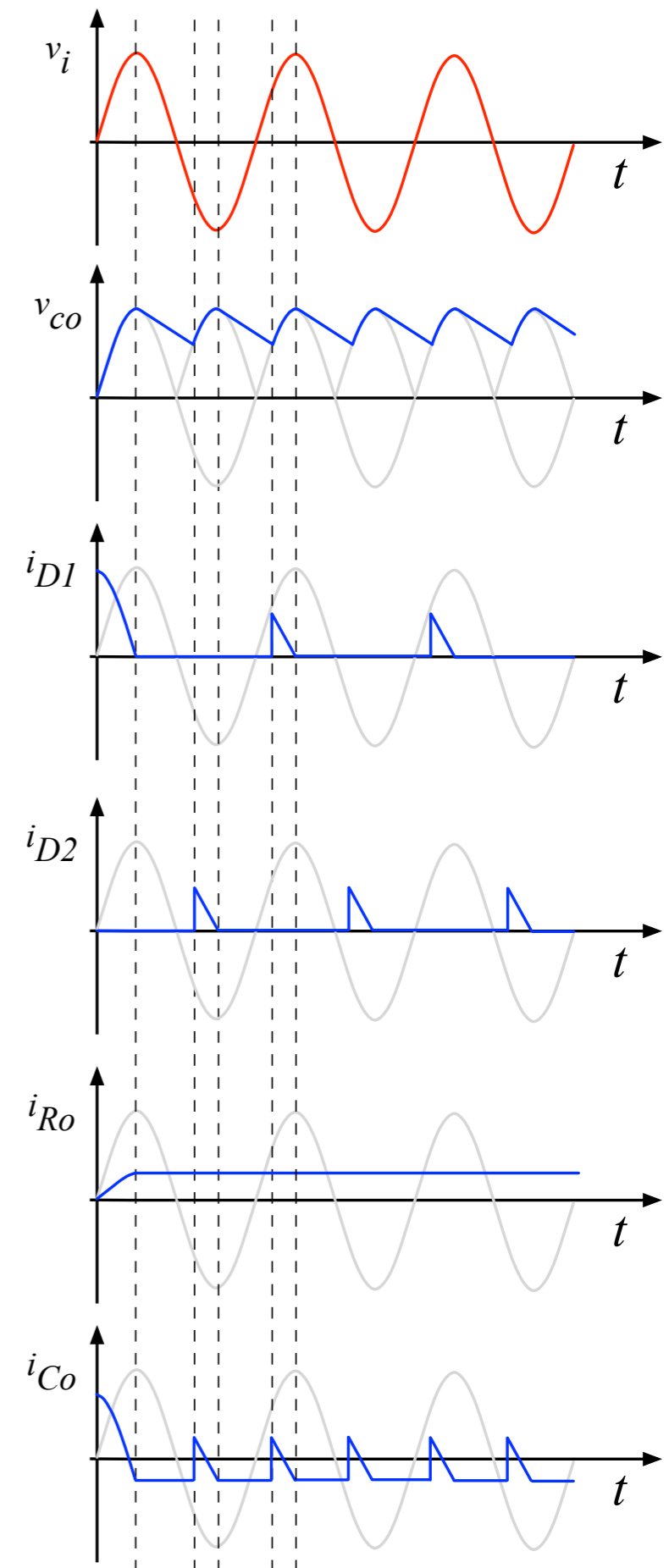
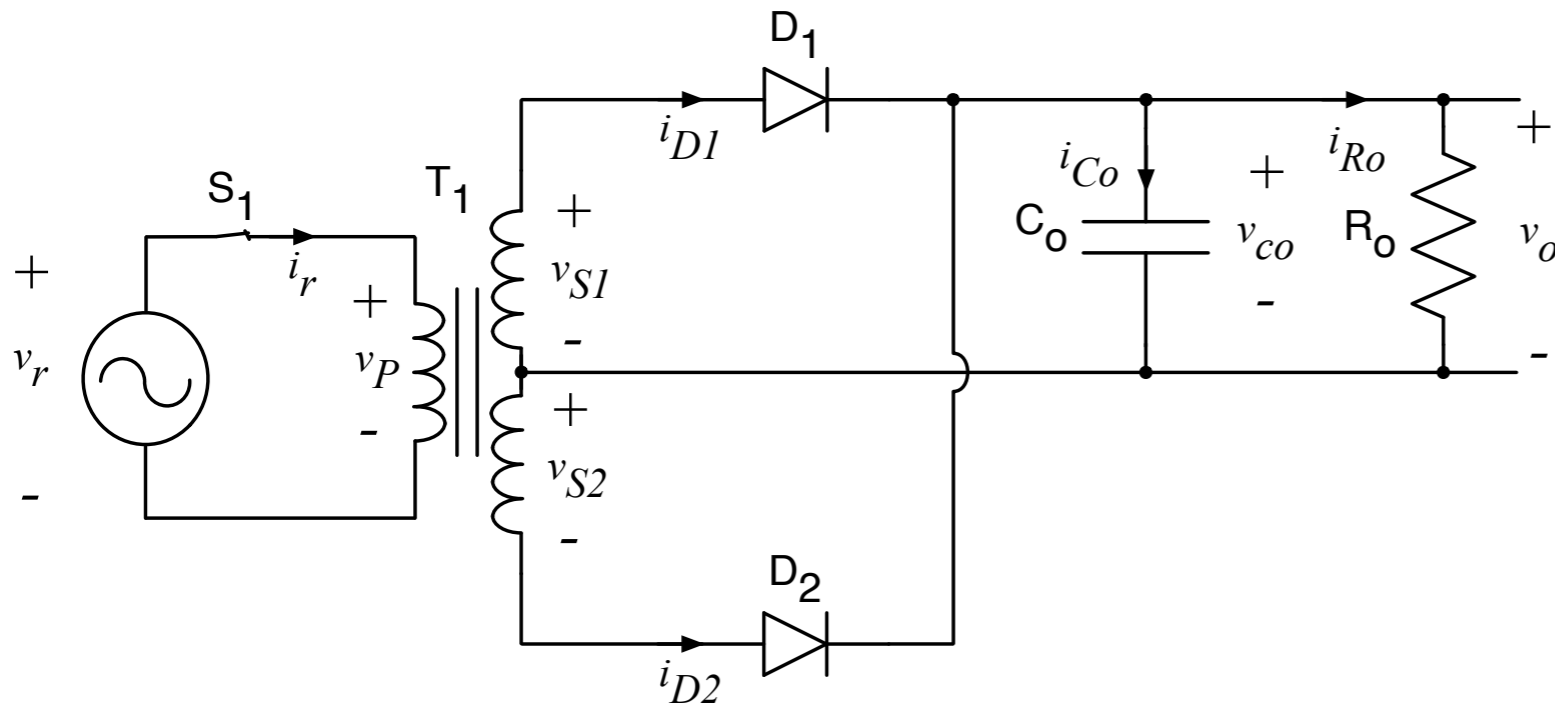
- No semiciclo negativo da tensão de entrada o diodo  $D_1$  estará bloqueado (off);
- O diodo  $D_2$  estará conduzindo (on), desde que a tensão do secundário 2 seja maior que a tensão no capacitor ( $v_{S2} > v_{Co}$ );
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão do secundário 2 ( $v_{Co} = v_{S2}$ );
- A corrente no diodo ( $i_{D2}$ ) é composta pela corrente do capacitor ( $i_{Co}$ ) e da carga ( $i_{Ro}$ ).



# Filtragem com capacitor

Retificador de onda completa com derivação (tap) central:

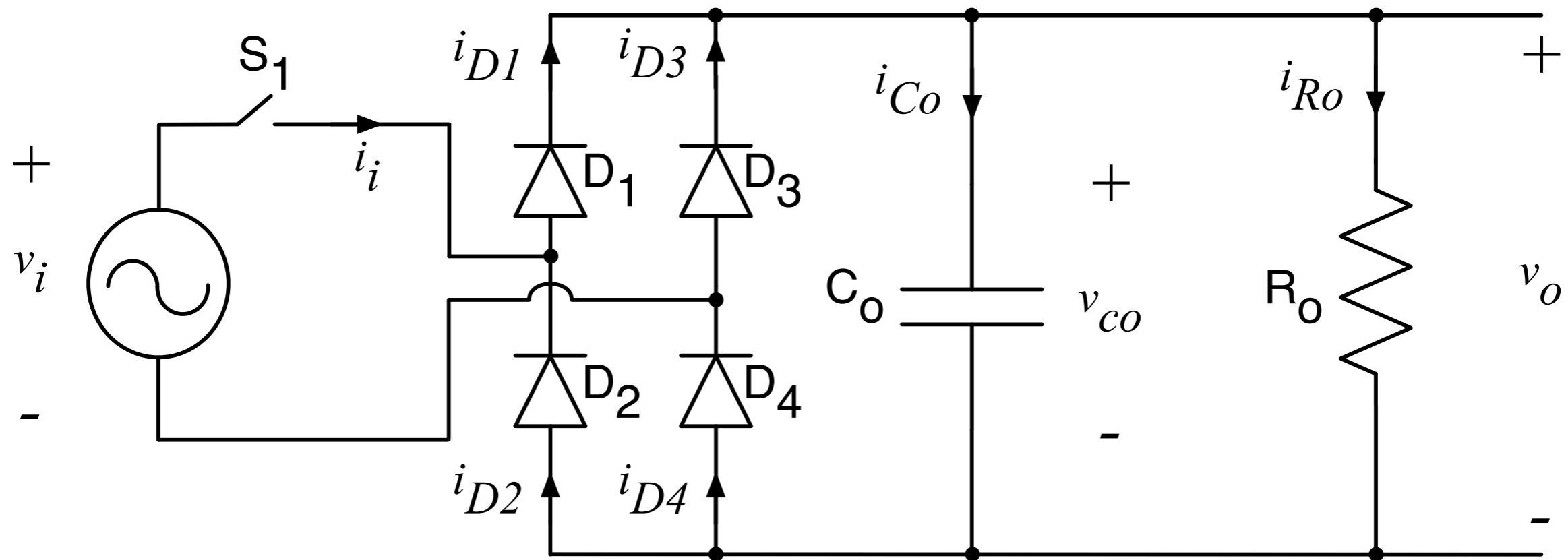
- O funcionamento é semelhante ao retificador de meia onda;
- As principais formas de onda são mostradas na figura.



# Filtragem com capacitor

## Retificador de onda completa em ponte (funcionamento):

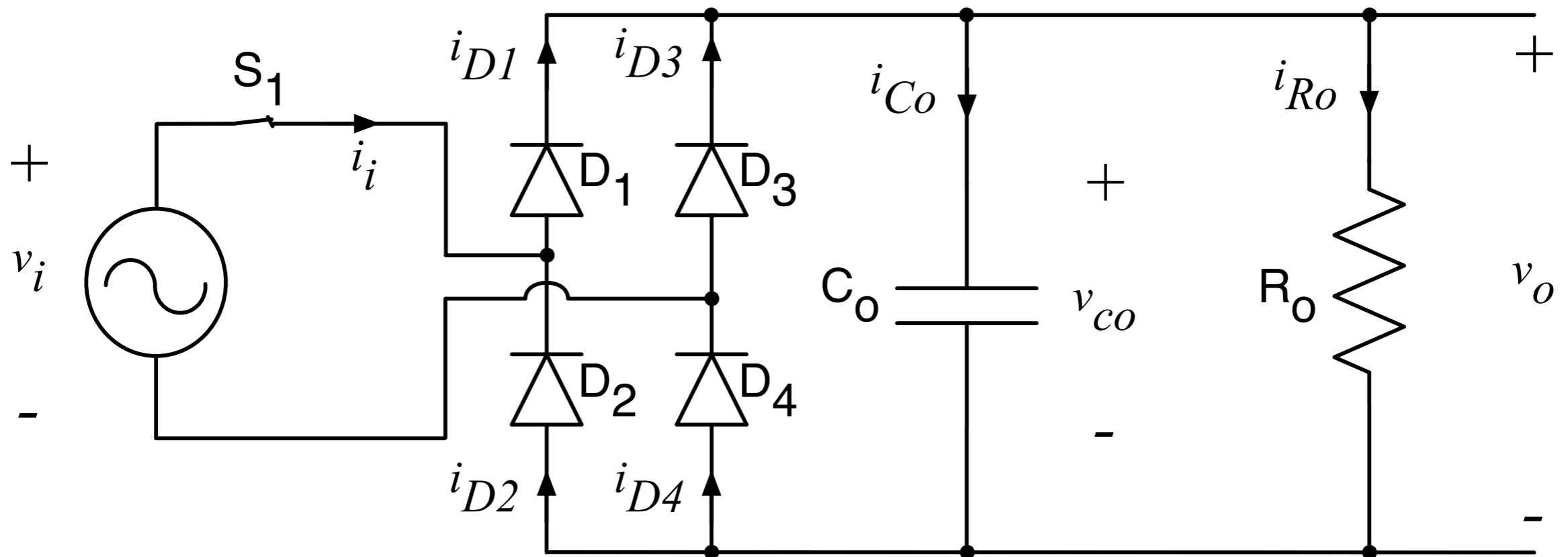
- Inicialmente a chave  $S_1$  está aberta;
- O capacitor está descarregado, então  $v_{Co} = 0$  V;
- Os diodos não estão conduzindo e suas correntes são iguais a zero ( $i_{D1} = i_{D2} = i_{D3} = i_{D4} = 0$ ).



# Filtragem com capacitor

**Retificador de onda completa em ponte (funcionamento ao ligar o circuito):**

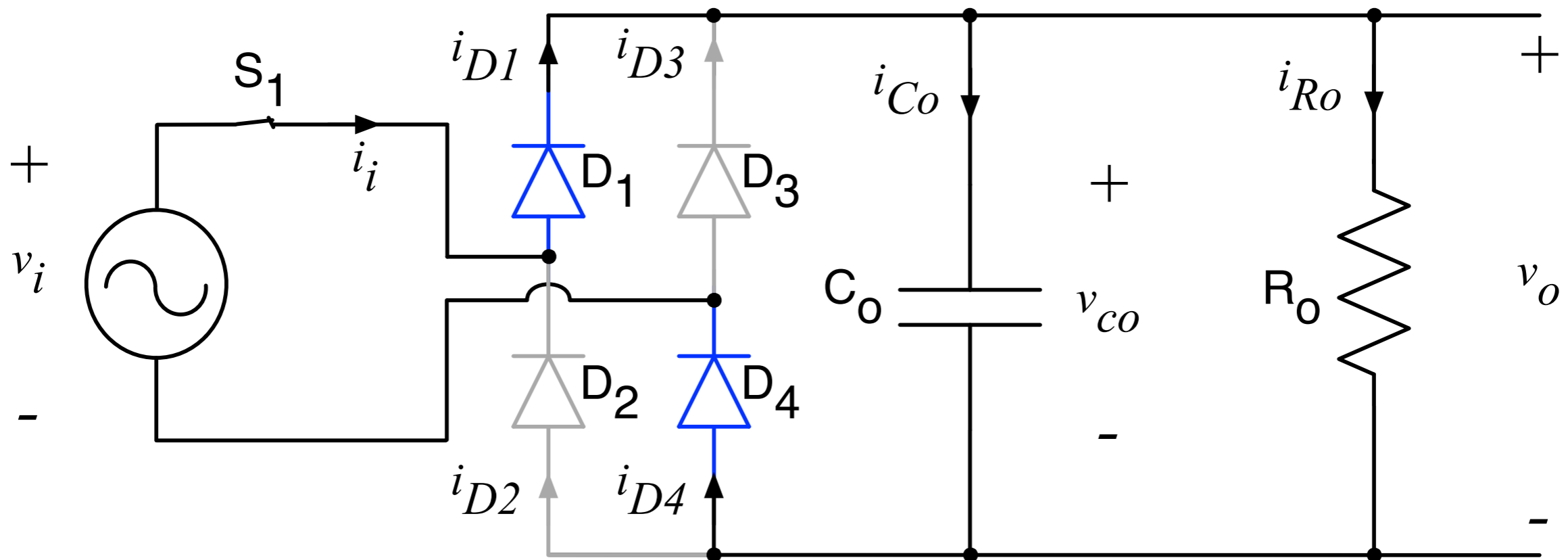
- No instante zero ( $t = 0$ ) a chave  $S_1$  será fechada;
- Os diodos são considerados ideais;
- Os diodos  $D_1$  e  $D_4$  entrarão em condução, pois  $v_i$  será maior que  $v_{Co}$  ( $v_i > v_{Co}$ );
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão de entrada ( $v_{Co} = v_i$ );
- As tensões na carga ( $R_o$ ) e no capacitor são iguais, pois estão em paralelo ( $v_o = v_{Co}$ ).



# Filtragem com capacitor

## Retificador de onda completa em ponte (semiciclo positivo):

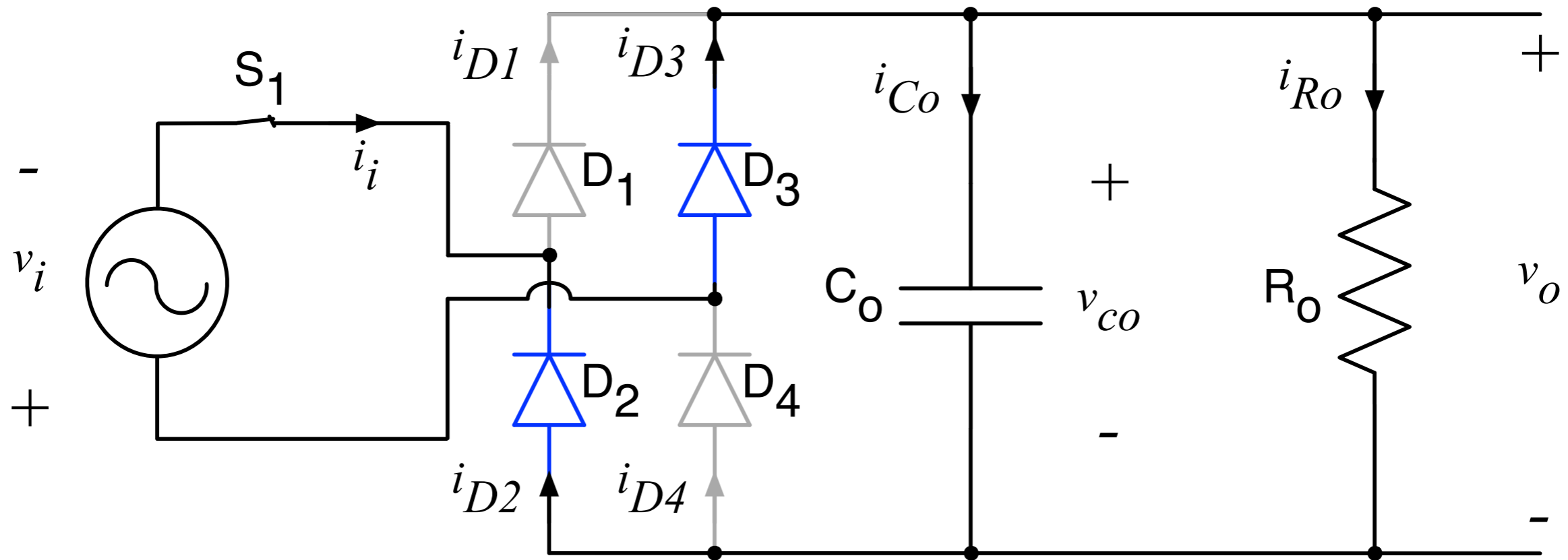
- No semiciclo positivo da tensão de entrada os diodos  $D_1$  e  $D_4$  estarão conduzindo (on), desde que a tensão de entrada seja maior que a tensão no capacitor ( $v_i > v_{Co}$ );
- Os diodos  $D_2$  e  $D_3$  estarão bloqueados (off);
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão de entrada ( $v_{Co} = v_i$ );
- A corrente nos diodos ( $i_{D1}$  e  $i_{D4}$ ) é composta pela corrente do capacitor ( $i_{Co}$ ) e da carga ( $i_{Ro}$ ).



# Filtragem com capacitor

## Retificador de onda completa em ponte (semiciclo negativo):

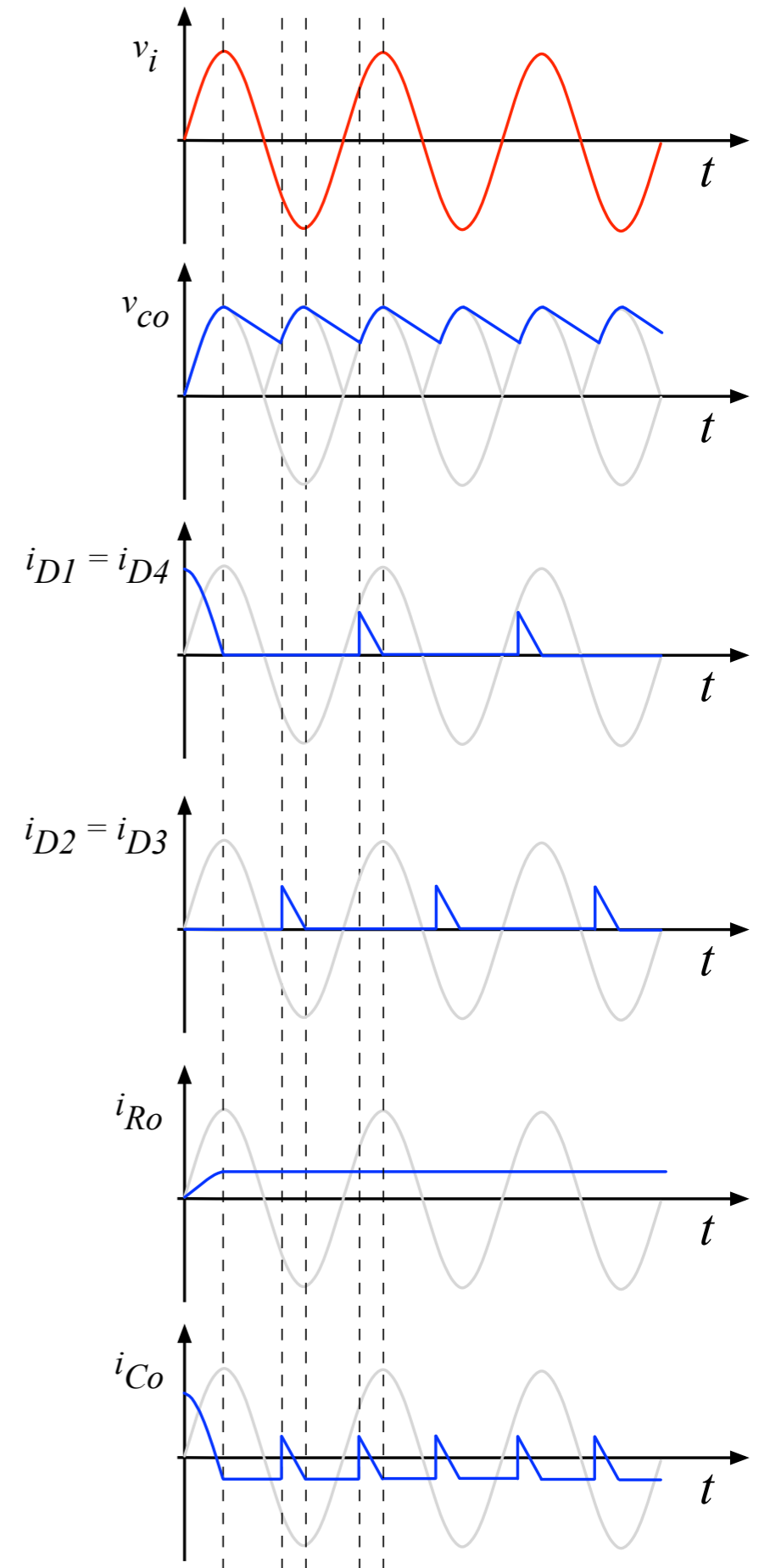
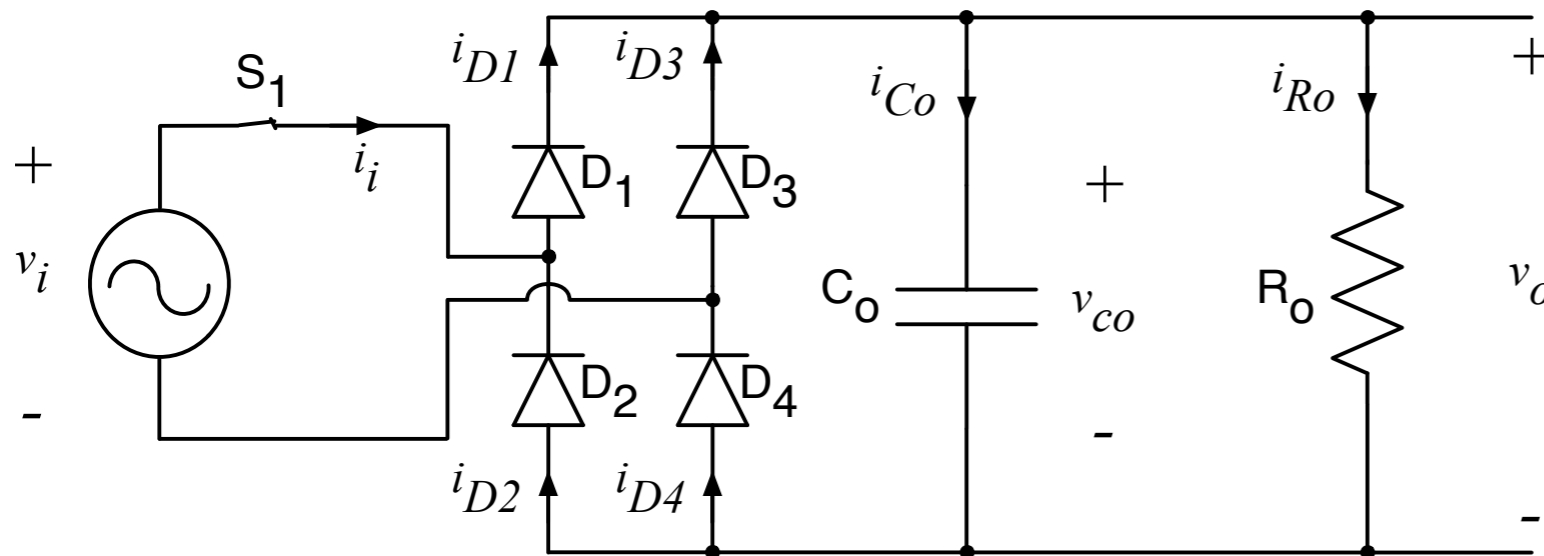
- No semiciclo negativo da tensão de entrada os diodos  $D_1$  e  $D_4$  estarão bloqueados (off);
- Os diodos  $D_2$  e  $D_3$  estarão conduzindo (on), desde que a tensão de entrada seja maior que a tensão no capacitor ( $v_i > v_{Co}$ );
- O capacitor irá carregar e sua tensão será igual à tensão de entrada ( $v_{Co} = v_i$ );
- A corrente nos diodos ( $i_{D2}$  e  $i_{D3}$ ) é composta pela corrente do capacitor ( $i_{Co}$ ) e da carga ( $i_{Ro}$ ).



# Filtragem com capacitor

## Retificador de onda completa em ponte:

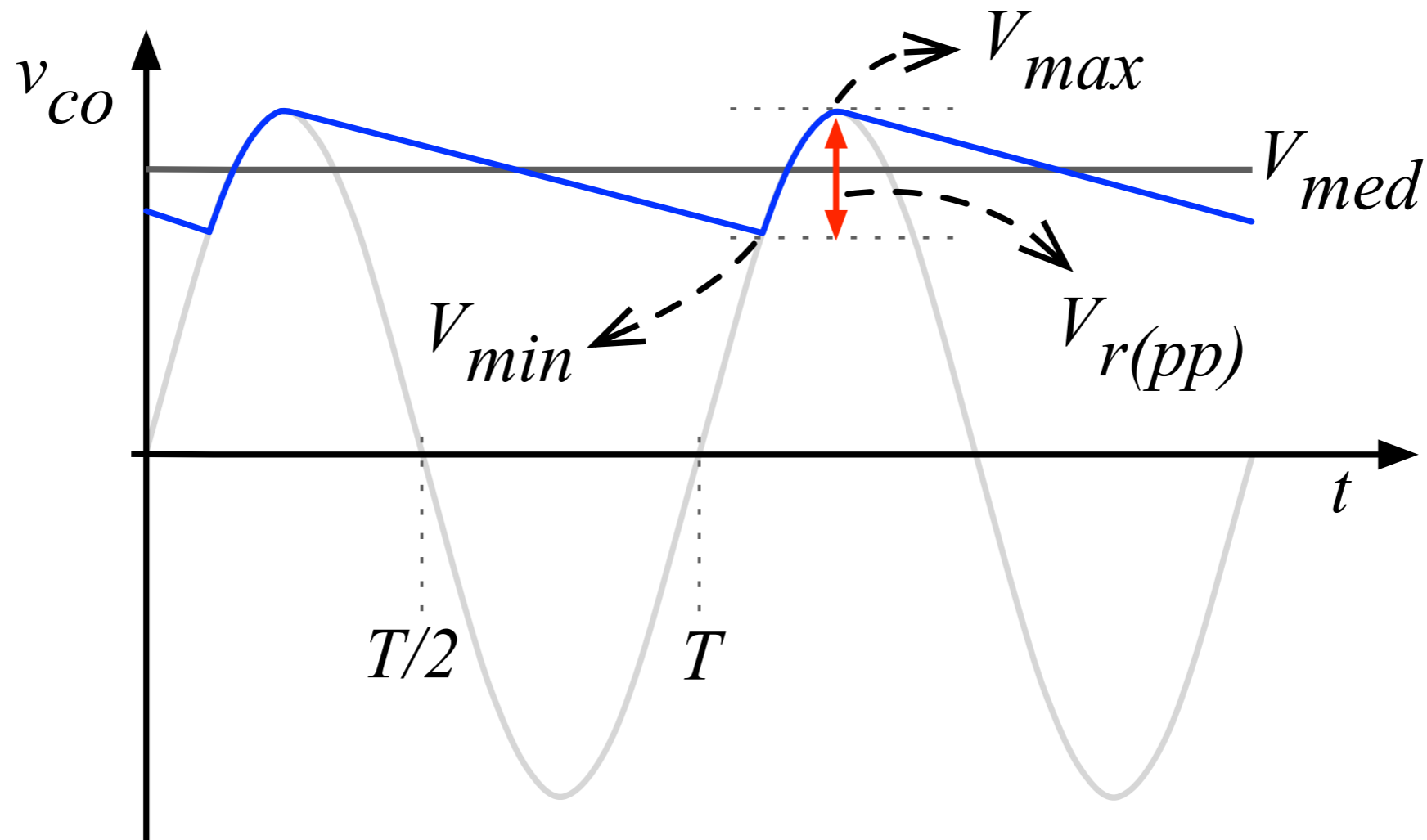
- O funcionamento é semelhante ao retificador de meia onda;
- As principais formas de onda são mostradas na figura.



# Filtragem com capacitor

## Ondulação (ripple) da tensão de saída:

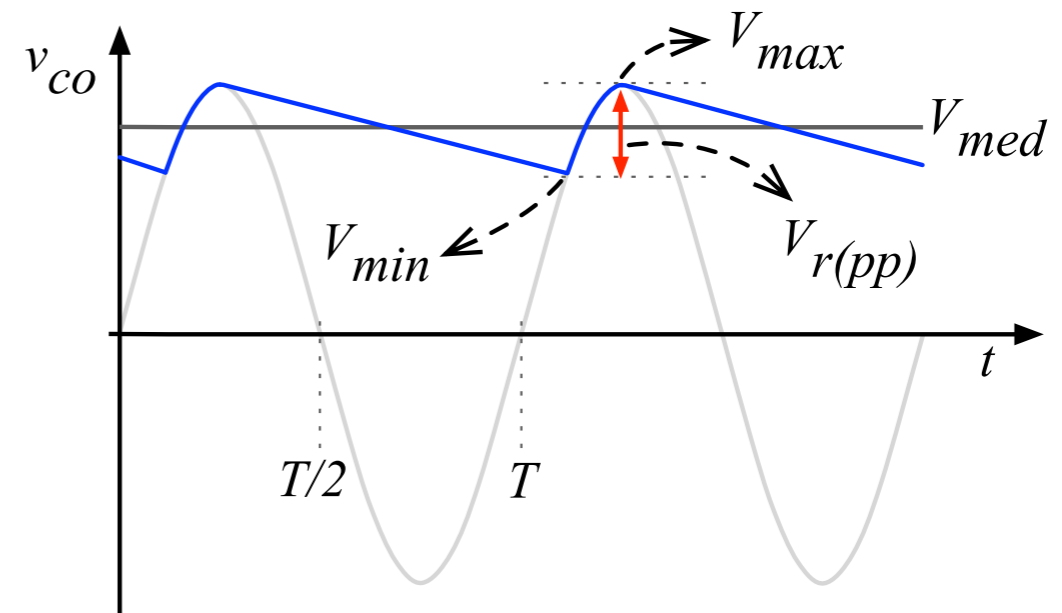
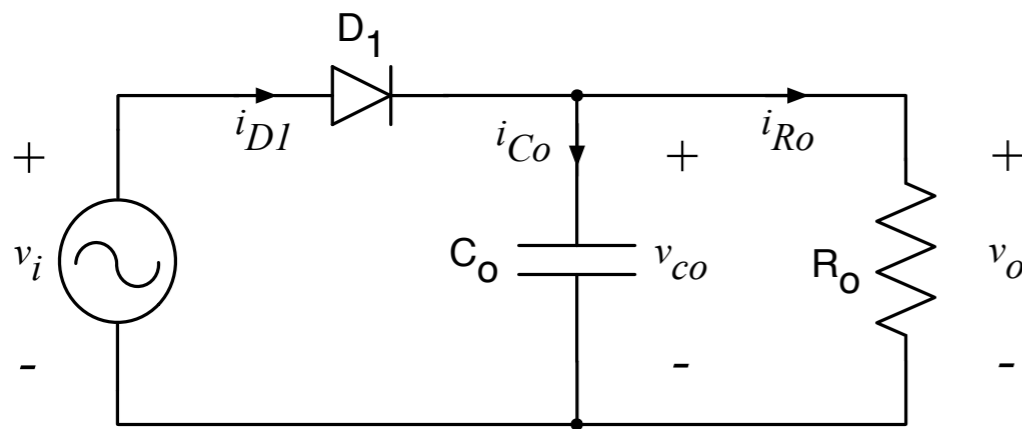
- Diferente conforme o retificador (meia onda ou onda completa);
- Depende da capacitância do capacitor de filtragem ( $C_o$ );
- É medida em relação ao valor médio ou máximo da tensão de saída.



# Filtragem com capacitor

Ondulação (ripple) da tensão de saída (retificador de meia onda):

- $P_o$  é a potência na saída (carga);
- $F_i$  é a frequência da tensão de entrada, geralmente 60 Hz;
- É medida em relação ao valor médio ou máximo da tensão de saída.

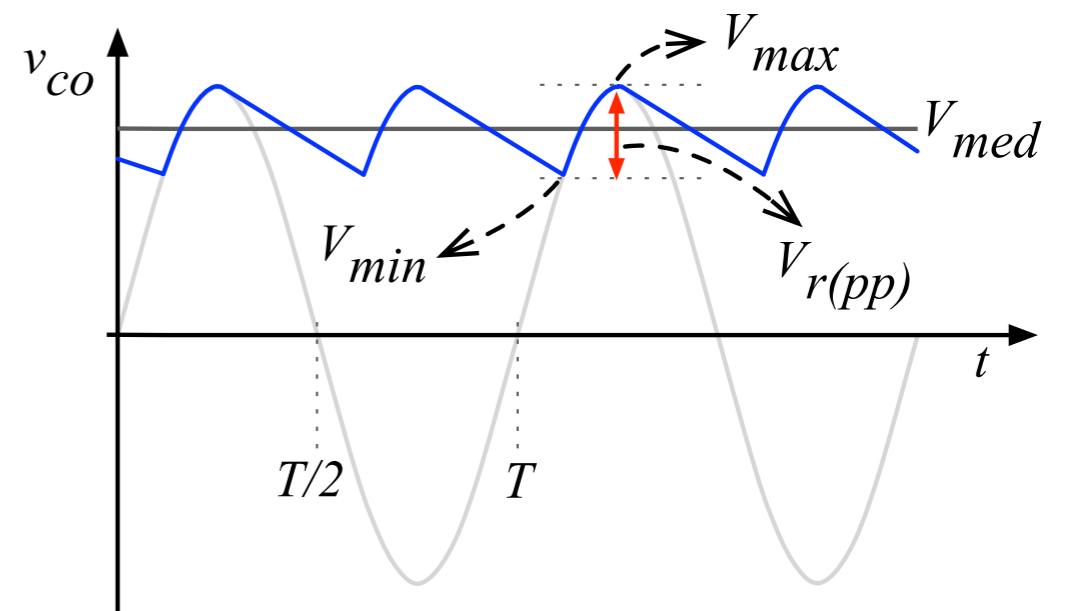
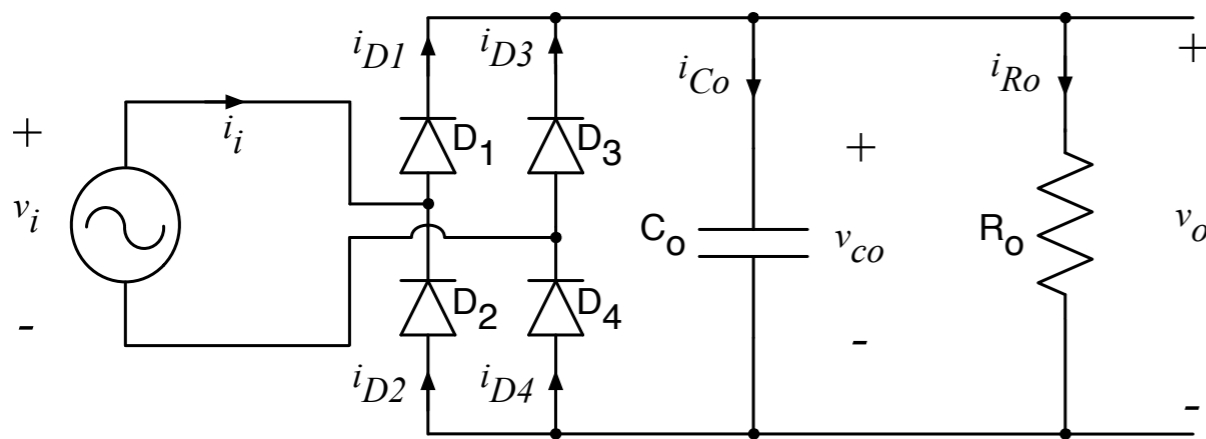


$$C_o = \frac{2 \cdot P_o}{F_i \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2)}$$

# Filtragem com capacitor

Ondulação (ripple) da tensão de saída (retificador de meia onda):

- $P_o$  é a potência na saída (carga);
- $F_i$  é a frequência da tensão de entrada, geralmente 60 Hz;
- É medida em relação ao valor médio ou máximo da tensão de saída.



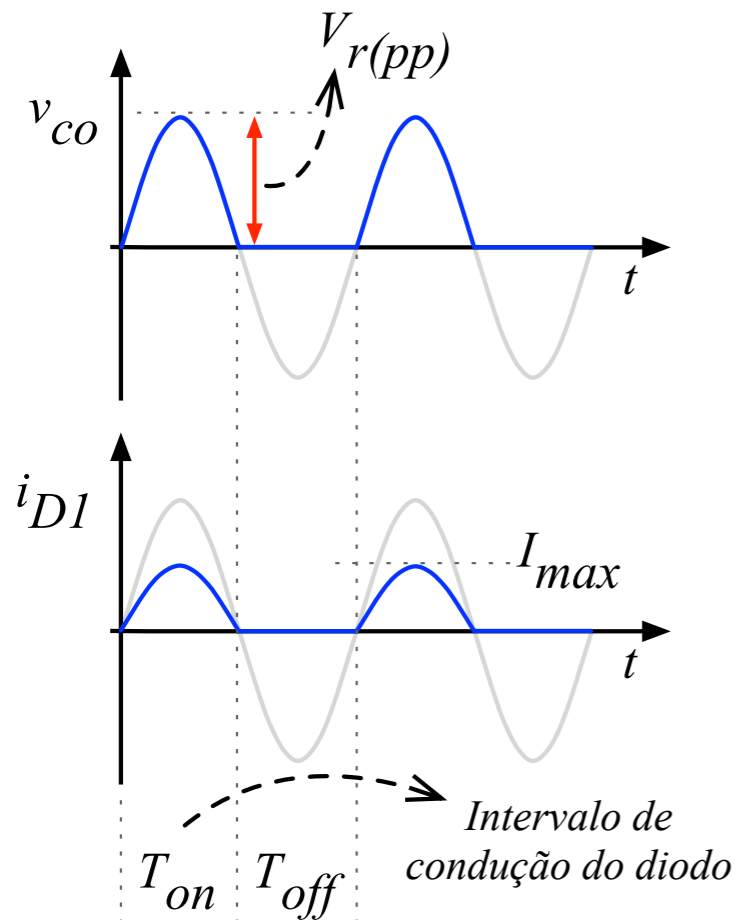
$$C_o = \frac{P_o}{F_i \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2)}$$

# Filtragem com capacitor

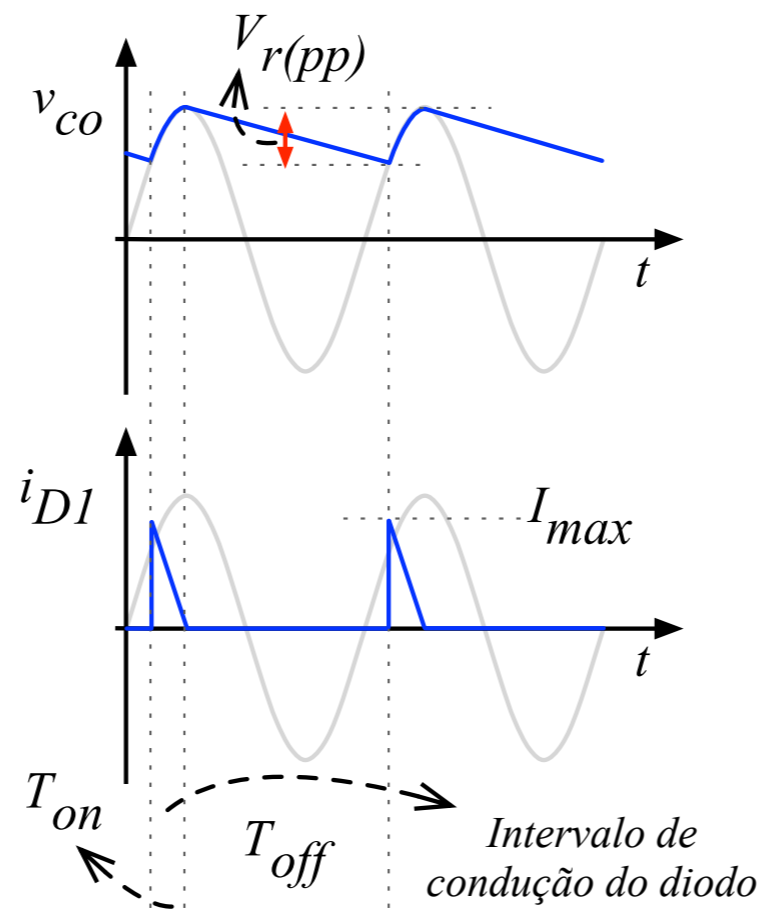
Período de condução e corrente máxima (pico) nos diodos:

- Sem capacitor o diodo conduz durante todo o semiciclo (0 até 180 graus);
- Ao adicionar um capacitor, o tempo de condução do diodo diminui;
- A corrente no diodo aumenta conforme se aumenta o valor do capacitor.

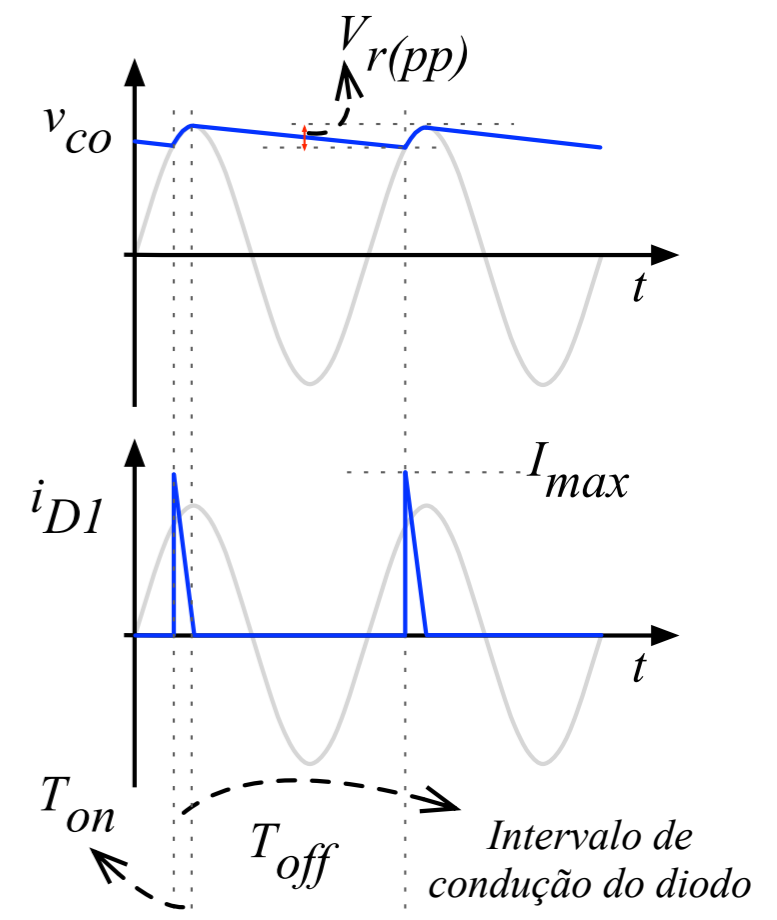
Sem capacitor



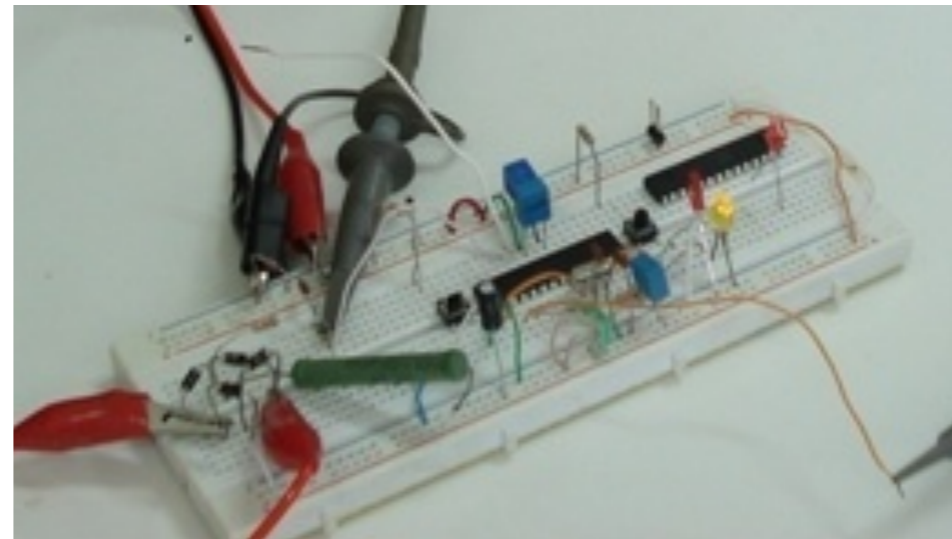
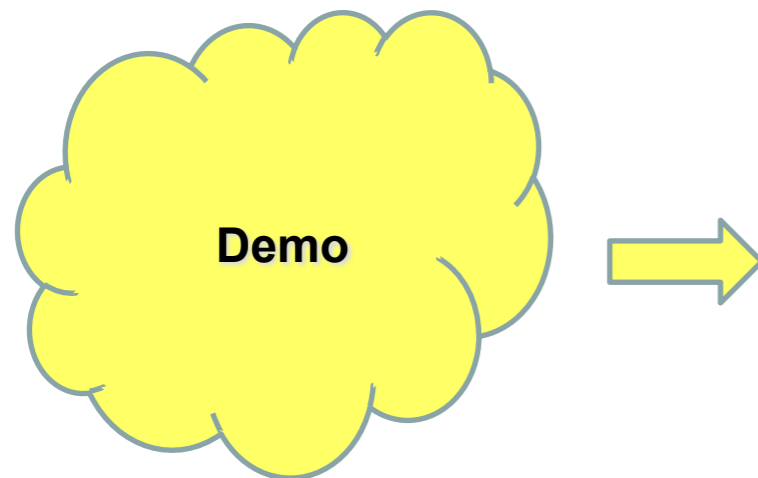
Com capacitor



Com capacitor  
de grande valor

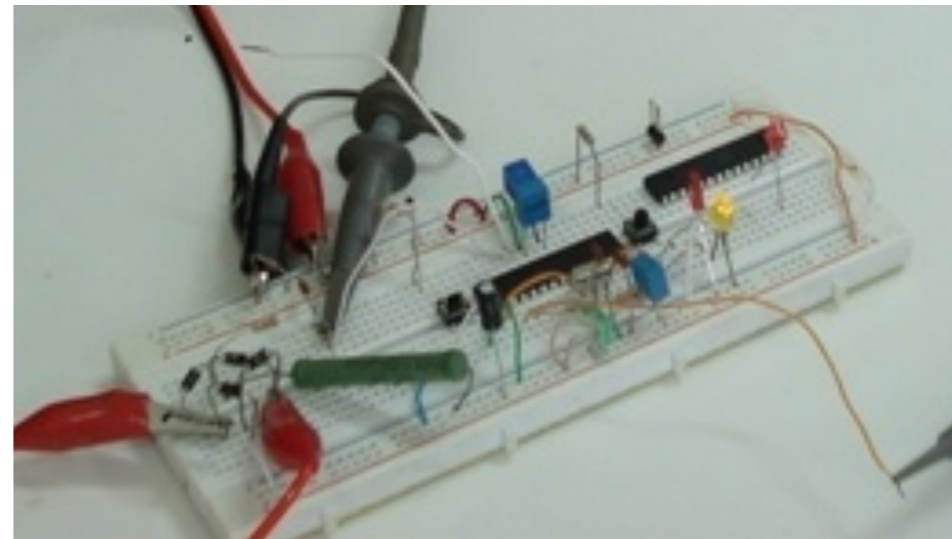
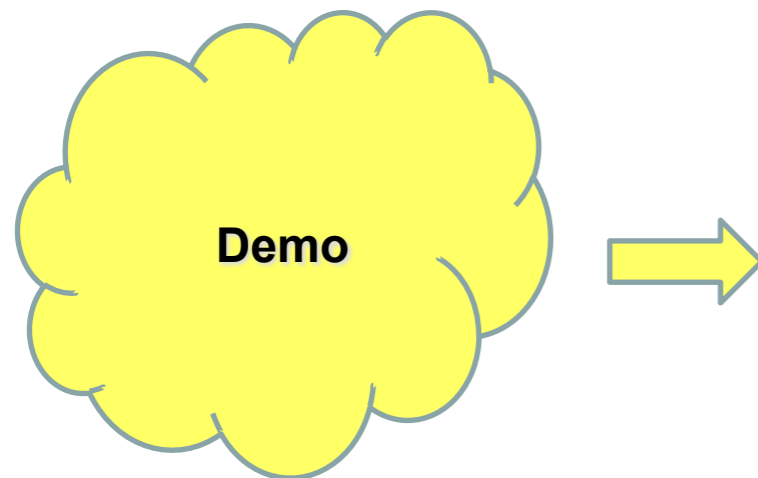


# Filtragem com capacitor



Demo:  
• Corrente resultante.

# Filtragem com capacitor



Demo:  
• Medição do ripple.

# Próxima Aula

## Laboratório de retificadores com filtros capacitivos

