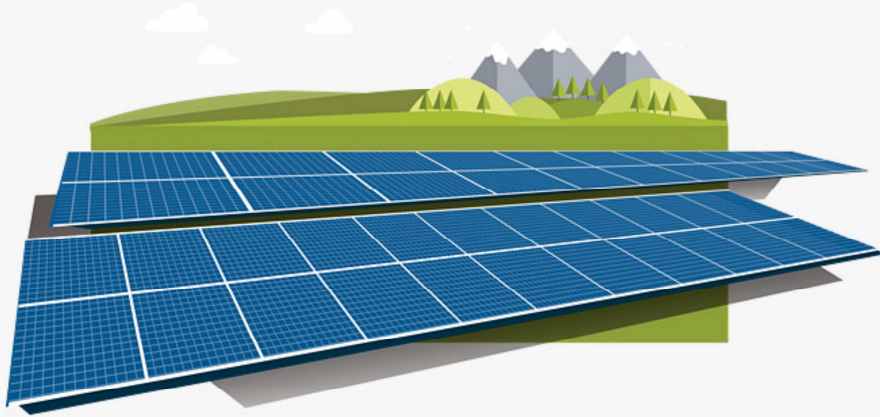


## Aula 08 – Conversores c.c./c.a.

Parte 1 – Princípio de operação e Tipos de conversores



Prof. Heverton Augusto Pereira  
heverton.pereira@ufv.br

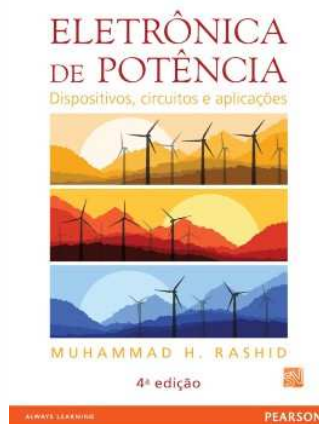


# Introdução

		Tópicos
01	-	Introdução
02	-	Diodos de potência e circuitos RLC chaveados
03	-	Retificadores com diodos
04	-	Transistores de potência
05		Conversores CC-CC
06		Tiristores
07		Retificadores controlados
08	-	Conversores CC-CA
09	-	Controladores de tensão CA
10	-	Inversores de pulso ressonante

## Capítulo 6 do Livro

M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014



# Introdução

- Os conversores CC-CA são conhecidos como *inversores*.
- A função de um inversor é alterar uma tensão de entrada CC e transformá-la em uma tensão de saída CA simétrica, com amplitude e frequência desejadas.
- A forma de onda da tensão de saída de um inversor ideal deve ser senoidal.
- Os inversores podem ser classificados em dois tipos:
  - monofásicos (até 10 kW)
  - trifásicos.



# Parâmetros de desempenho

- A tensão de entrada de um inversor é contínua, e a tensão (ou corrente) de saída é alternada.
- A potência de saída é dada por 
$$P_{CA} = I_o V_o \cos \theta$$
$$= I_o^2 R$$
- A potência de entrada CA do inversor é 
$$P_s = I_s V_s$$
- A ondulação rms da corrente de entrada é 
$$I_r = \sqrt{I_i^2 - I_s^2}$$

# Parâmetros de desempenho

- O fator de ondulação ou de *ripple* da corrente de entrada é  $FR_s = \frac{I_r}{I_s}$
- O fator harmônico (da  $n$ -ésima harmônica), que é uma medida da contribuição individual de uma harmônica, é definido como

$$FH_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}} \quad \text{para } n > 1$$

- A distorção harmônica total, que é uma medida da proximidade do formato entre uma forma de onda e sua componente fundamental, é definida como

$$DHT = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{on}^2}$$

# Parâmetros de desempenho

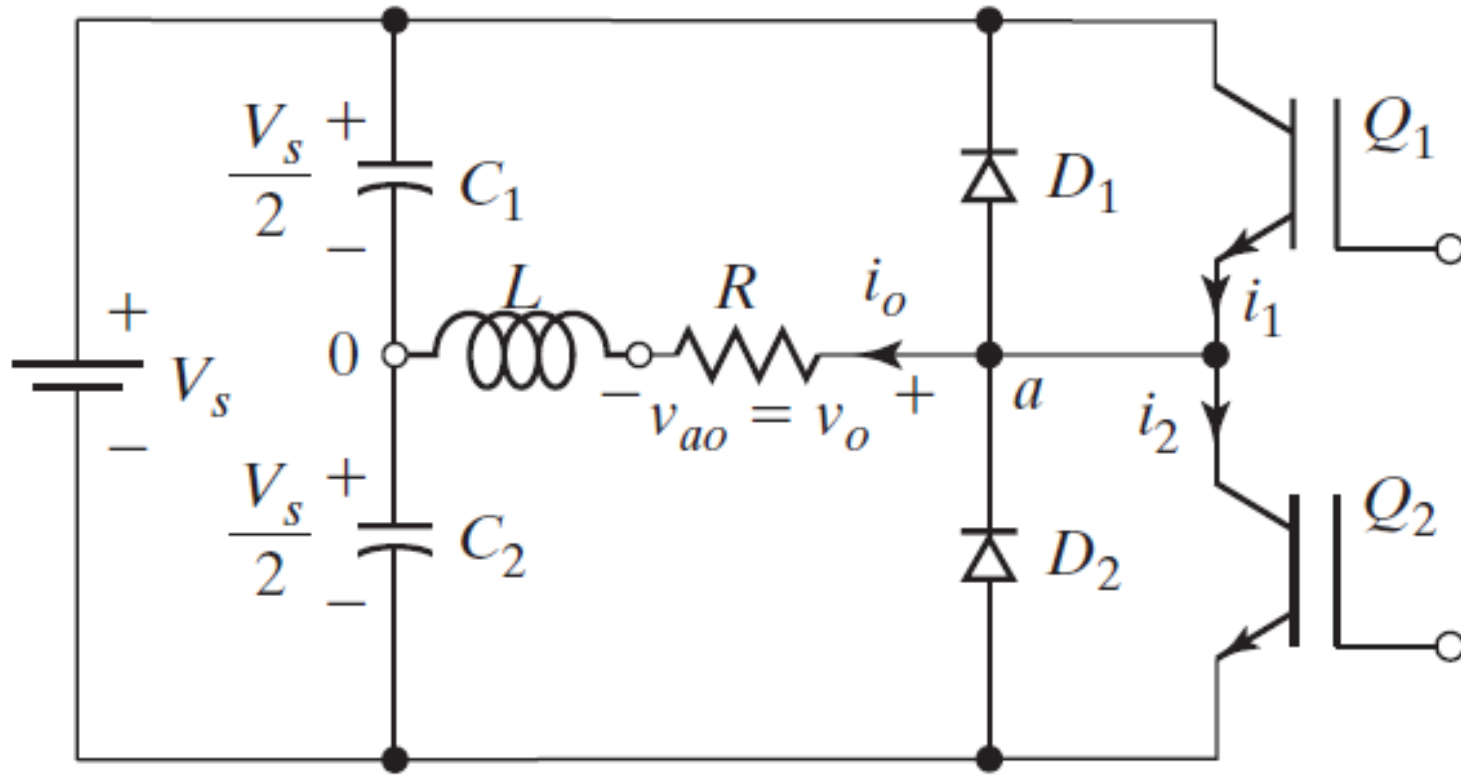
- O fator de distorção (FD), e é definido como

$$FD = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left( \frac{V_{on}}{n^2} \right)^2}$$

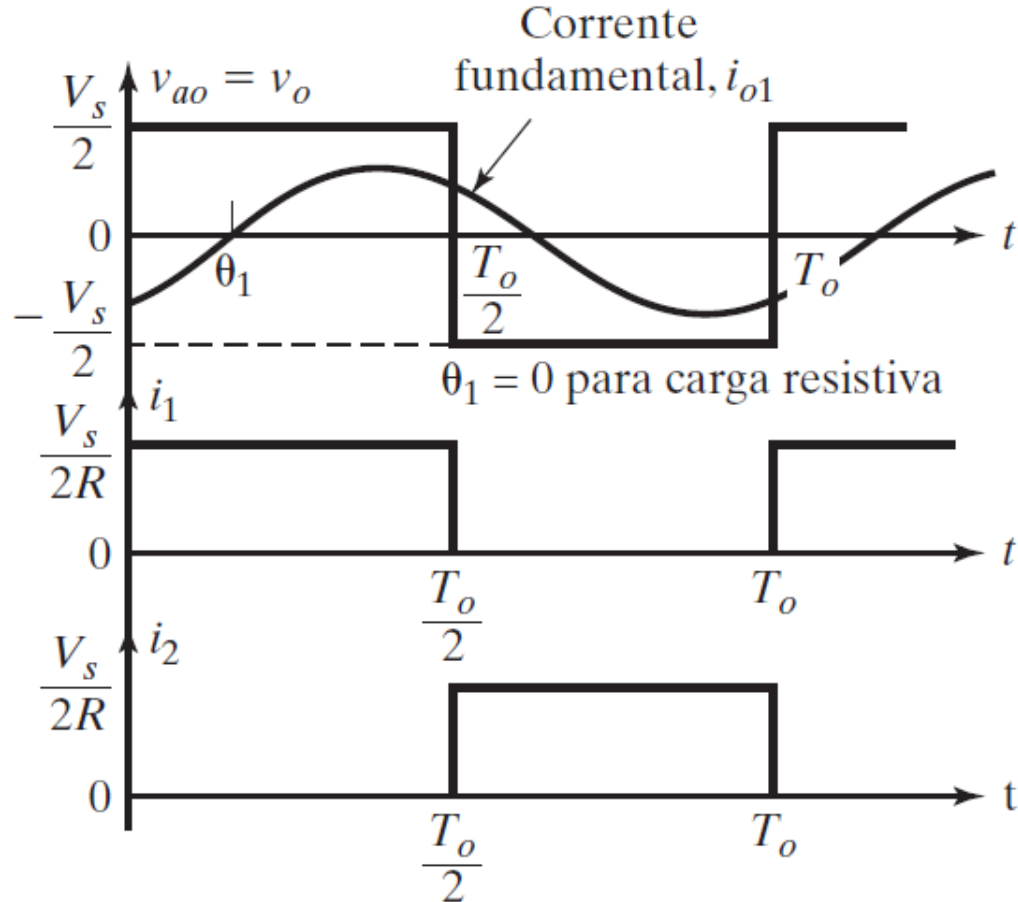
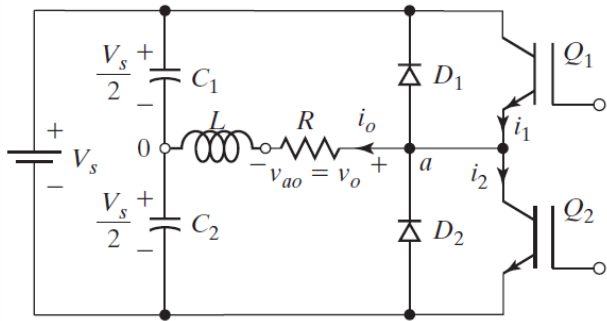
- O FD de uma componente harmônica individual (ou  $n$ -ésima) é definido como

$$FD_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}n^2} \quad \text{para } n > 1$$

# Princípio de operação

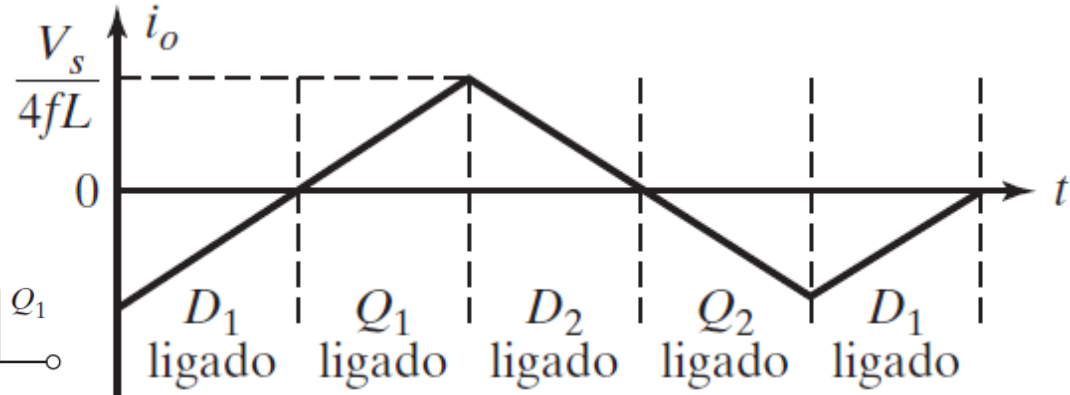
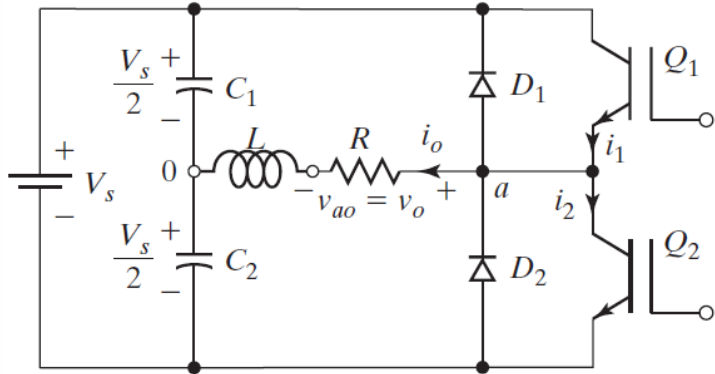


# Princípio de operação



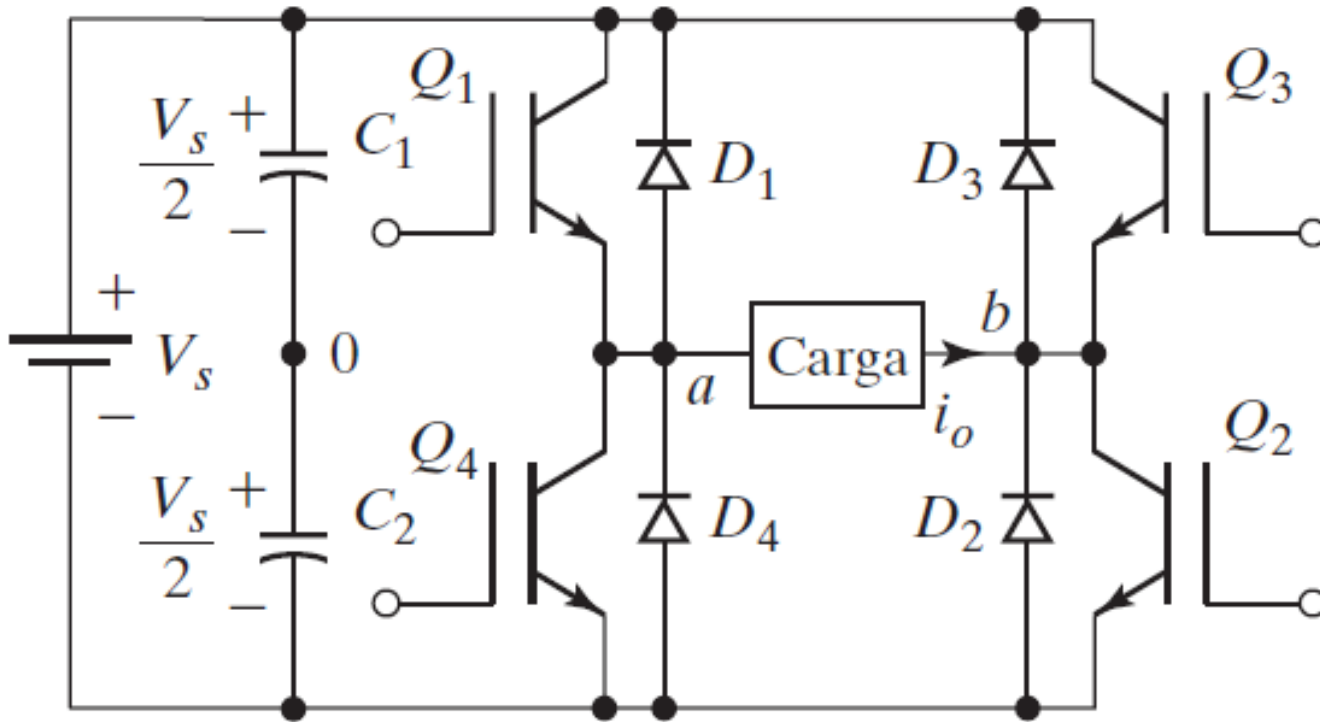


# Princípio de operação

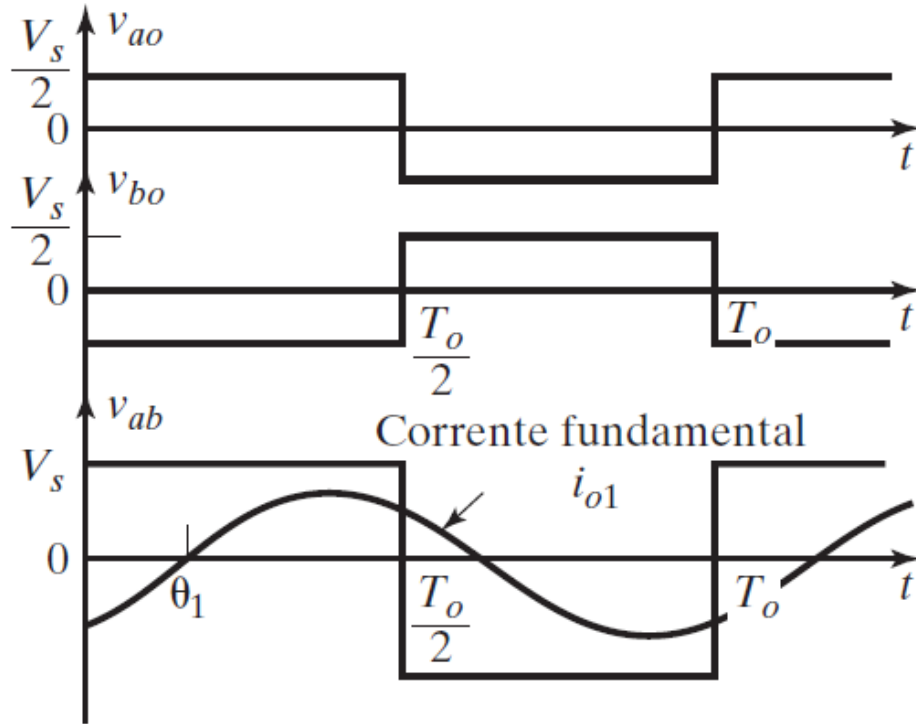
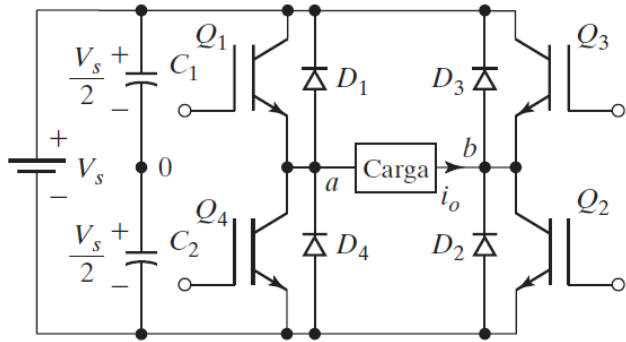


Carga altamente indutiva

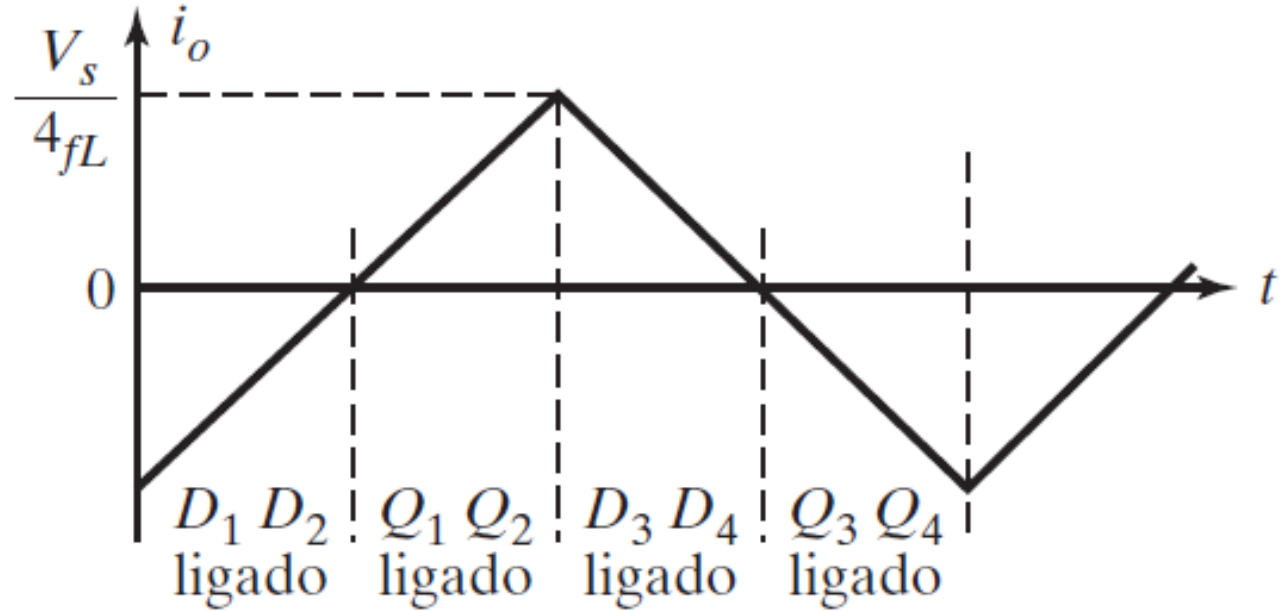
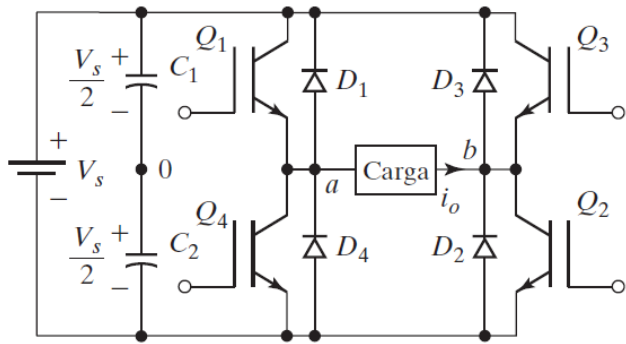
# Inversores monofásicos em ponte



# Inversores monofásicos em ponte



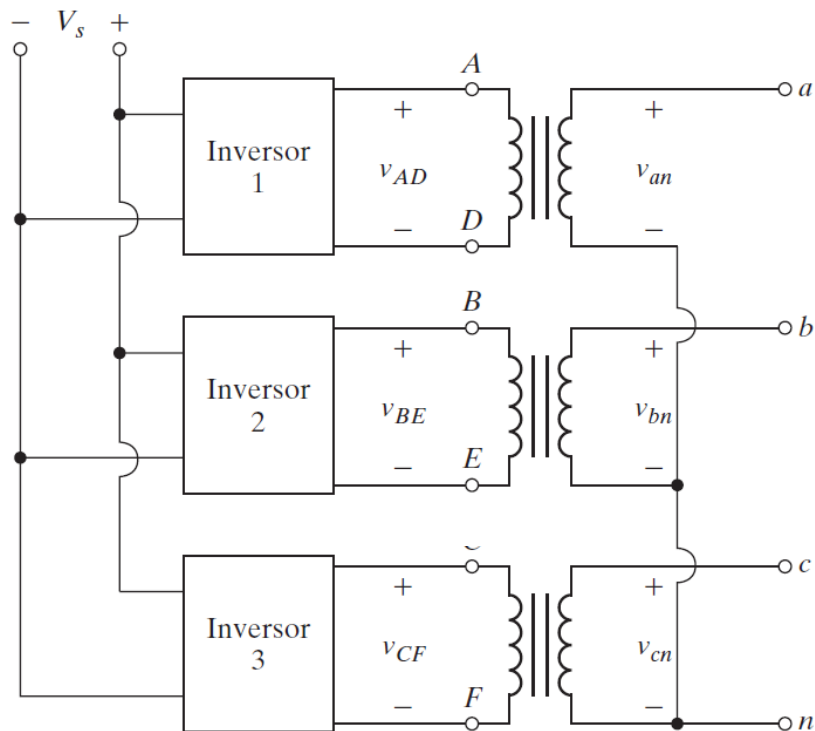
# Inversores monofásicos em ponte



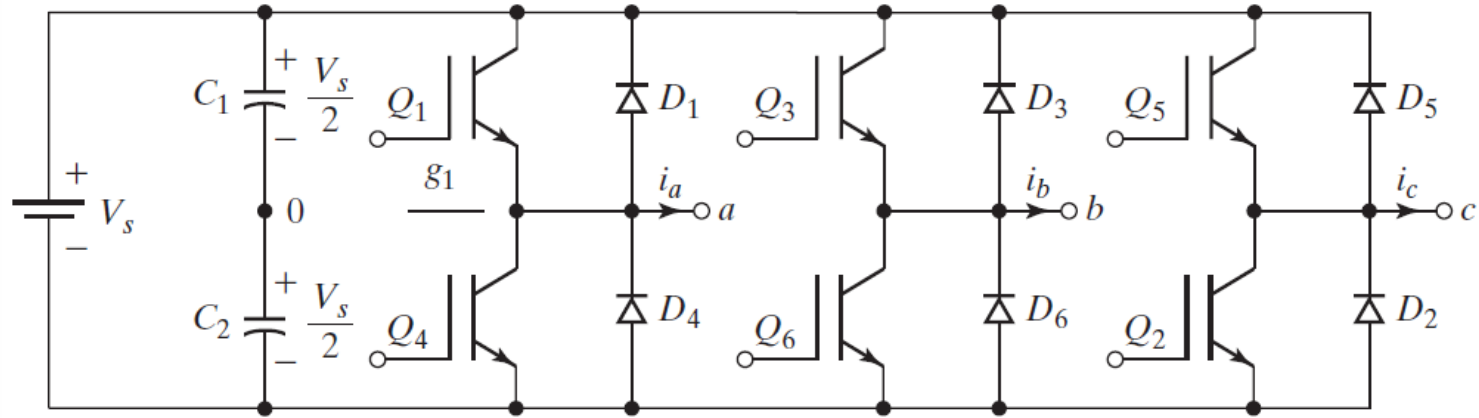
Carga altamente indutiva

# Inversores Trifásicos

- Inversor trifásico formado por três inversores monofásicos:



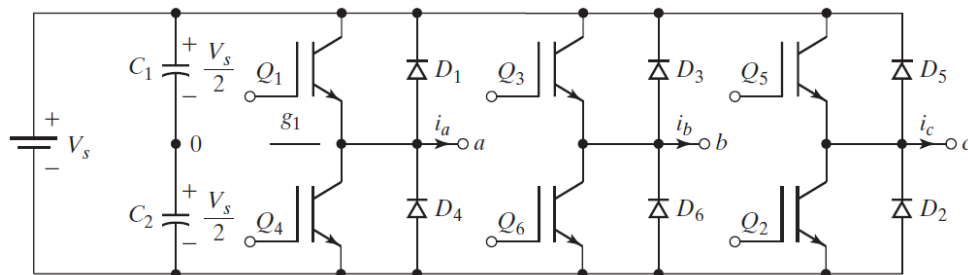
# Inversores Trifásicos



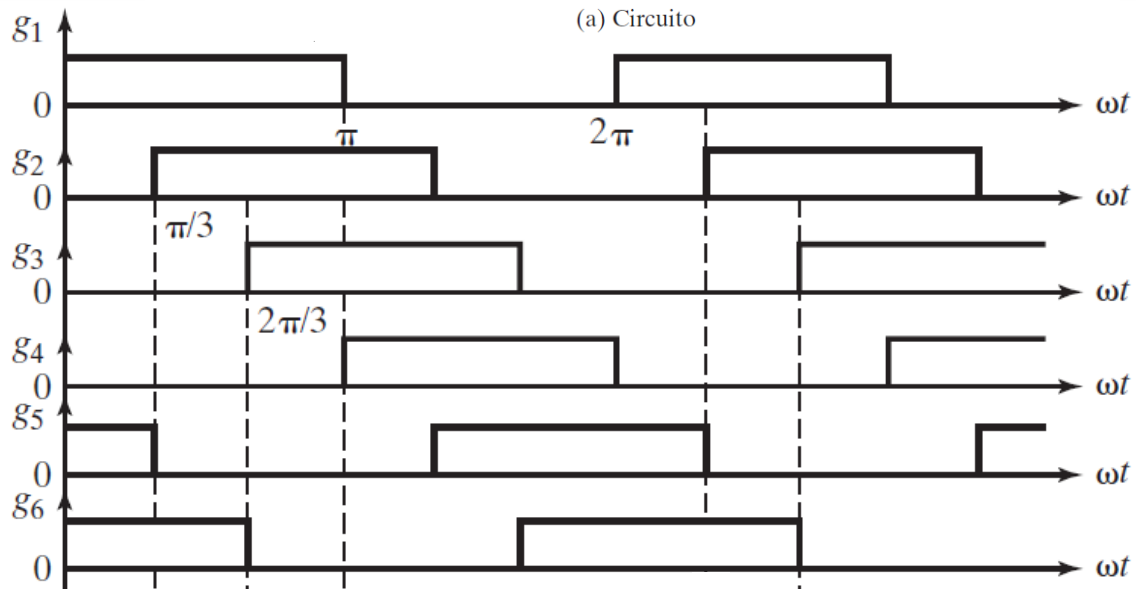
(a) Circuito

# Inversores Trifásicos

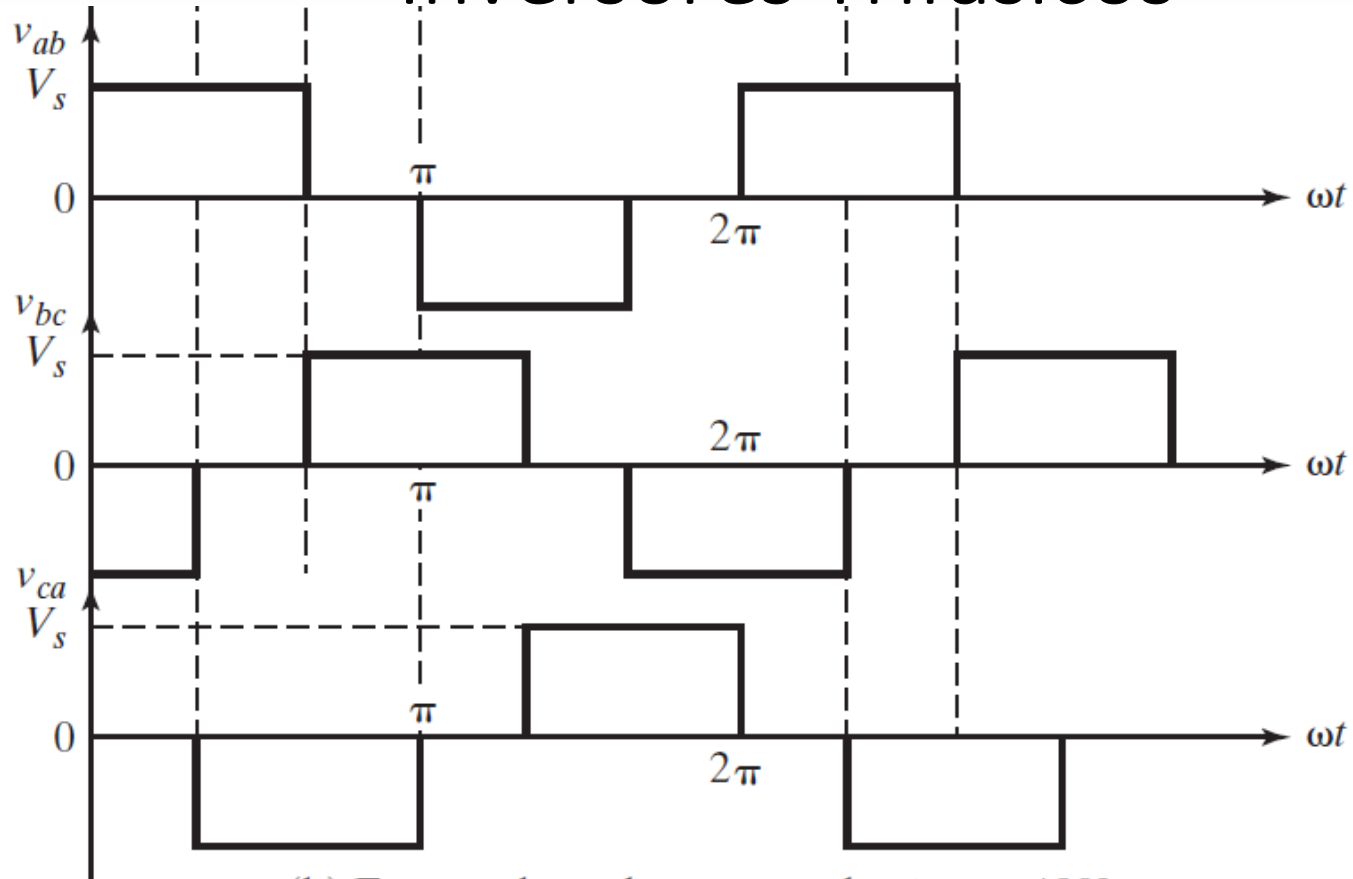
- Condução por 180°



(a) Circuito



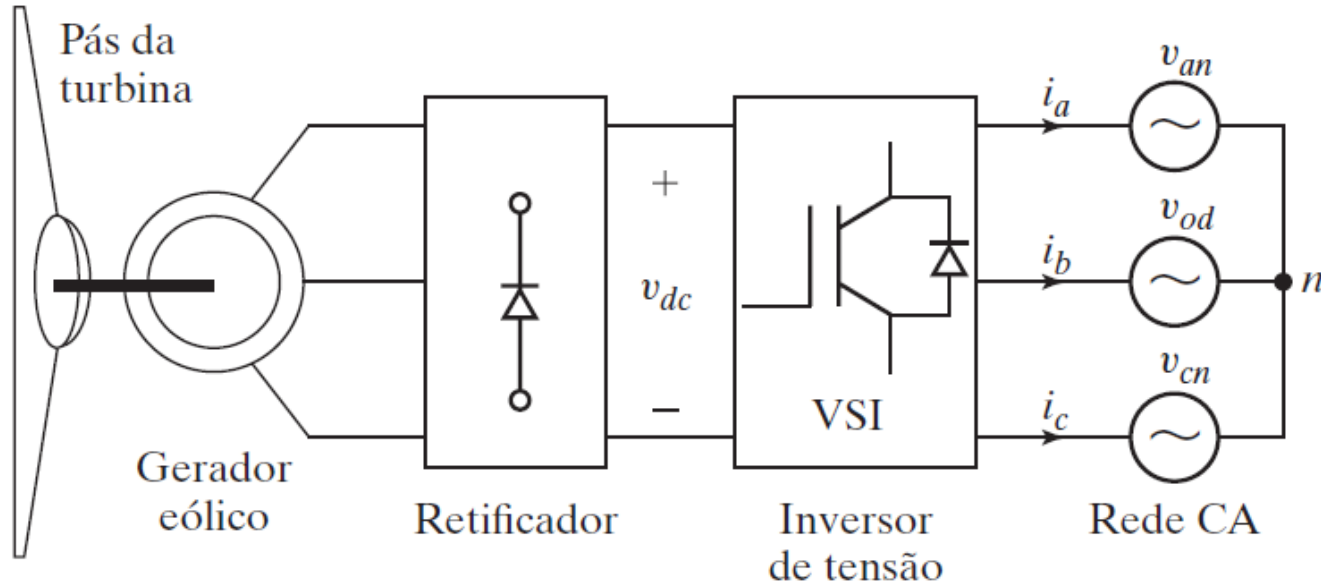
# Inversores Trifásicos



(b) Formas de onda para condução por 180°

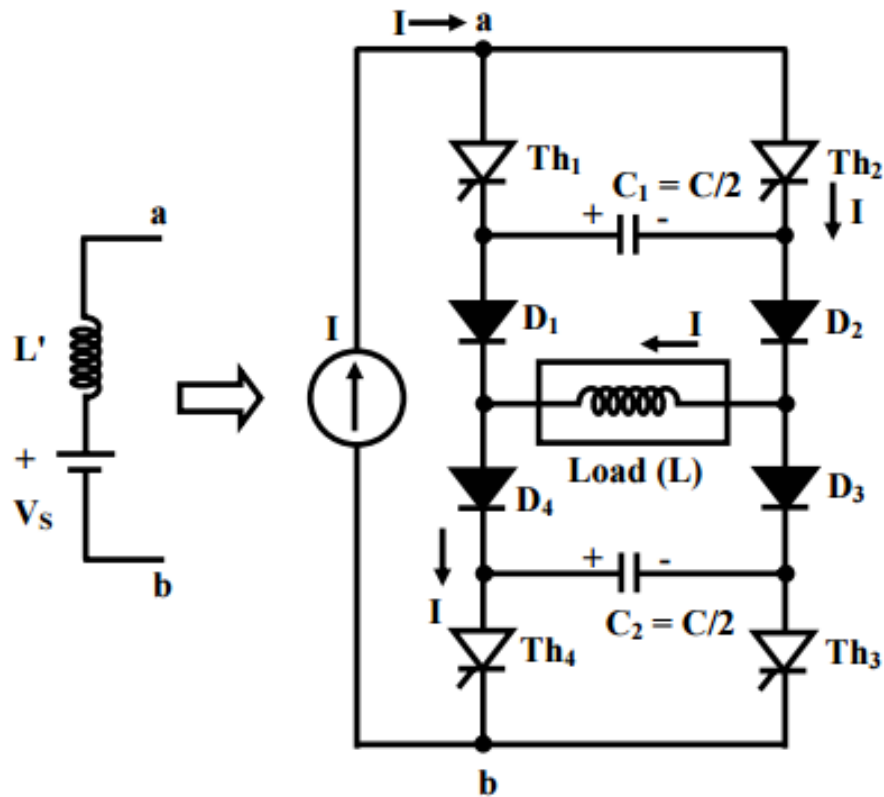


# Inversores Trifásicos

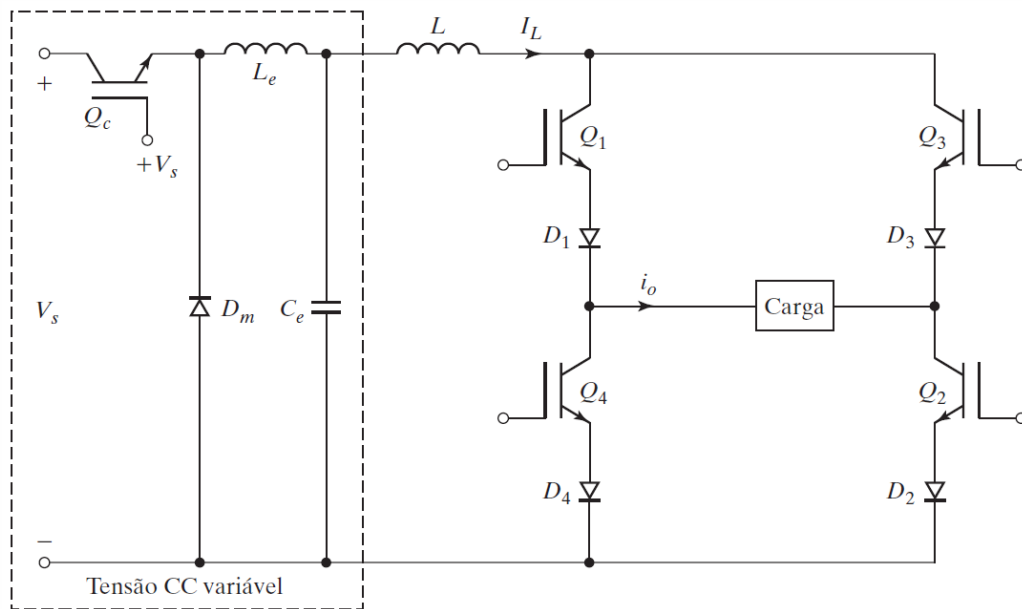


Gerador eólico conectado à rede CA através de um retificador e de um inversor

# Inversores de corrente



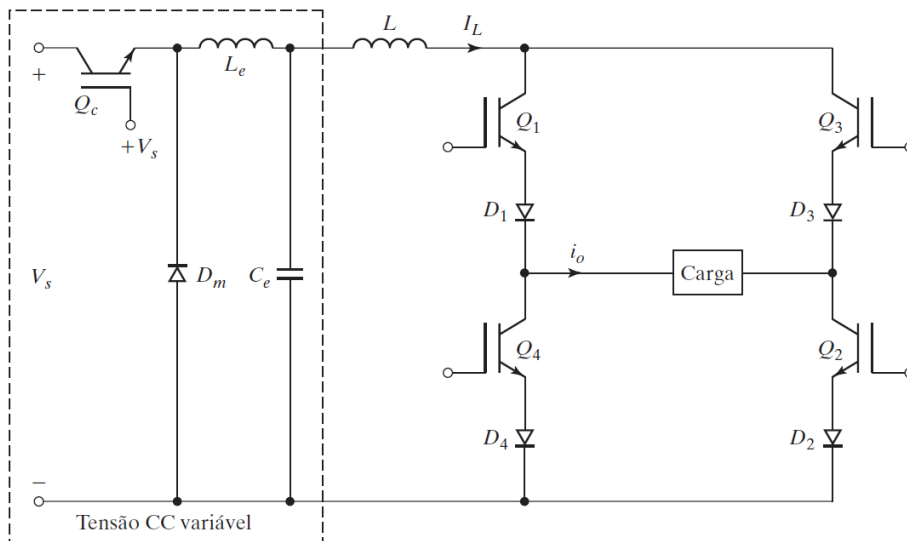
# Inversores de corrente



CSI com transistores

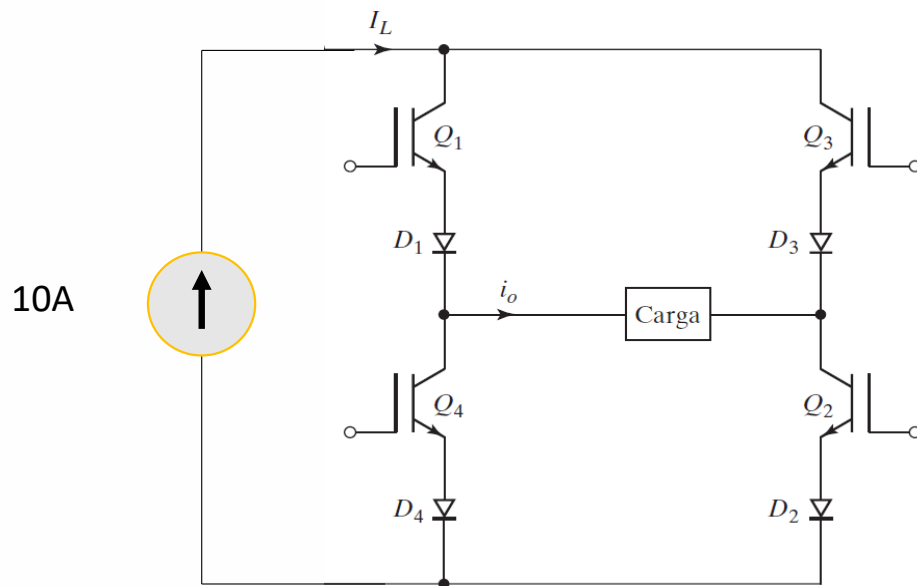
# Inversores de corrente

Estado	Estado nº	Estados das chaves $S_1 S_2 S_3 S_4$	$i_o$	Componentes em condução
$S_1$ e $S_2$ estão ligadas, e $S_4$ e $S_3$ , desligadas	1	1100	$I_L$	$S_1$ e $S_2$ , $D_1$ e $D_2$
$S_3$ e $S_4$ estão ligadas, e $S_1$ e $S_2$ , desligadas	2	0011	$-I_L$	$S_3$ e $S_4$ , $D_3$ e $D_4$
$S_1$ e $S_4$ estão ligadas, e $S_3$ e $S_2$ , desligadas	3	1001	0	$S_1$ e $S_4$ , $D_1$ e $D_4$
$S_3$ e $S_2$ estão ligadas, e $S_1$ e $S_4$ , desligadas	4	0110	0	$S_3$ e $S_2$ , $D_3$ e $D_2$

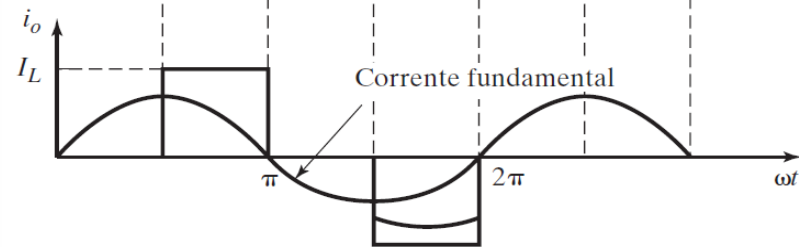
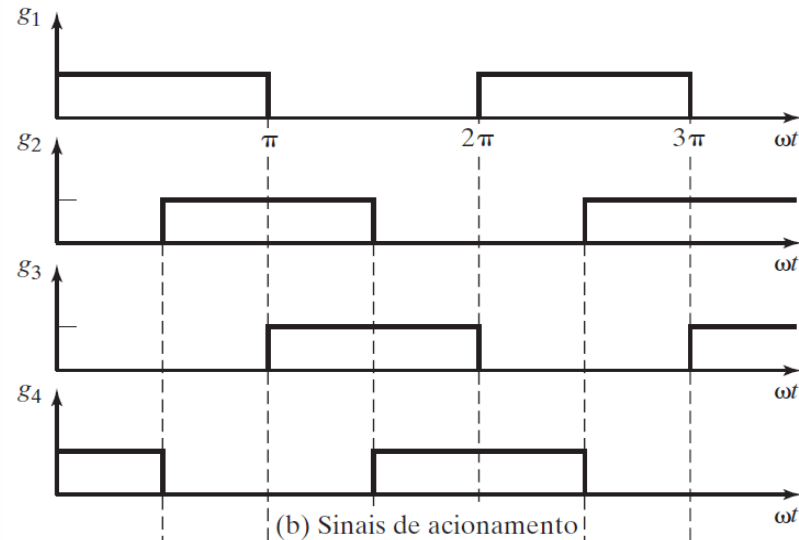
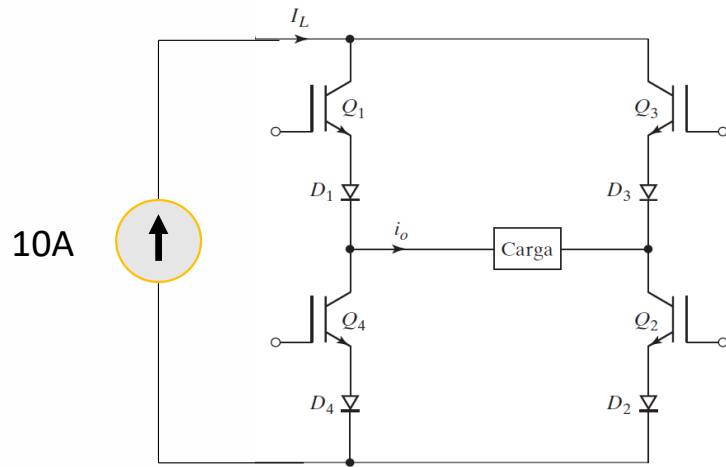


# Inversores de corrente

Estado	Estado nº	Estados das chaves $S_1 S_2 S_3 S_4$	$i_o$	Componentes em condução
$S_1$ e $S_2$ estão ligadas, e $S_4$ e $S_3$ , desligadas	1	1100	$I_L$	$S_1$ e $S_2$ , $D_1$ e $D_2$
$S_3$ e $S_4$ estão ligadas, e $S_1$ e $S_2$ , desligadas	2	0011	$-I_L$	$S_3$ e $S_4$ , $D_3$ e $D_4$
$S_1$ e $S_4$ estão ligadas, e $S_3$ e $S_2$ , desligadas	3	1001	0	$S_1$ e $S_4$ , $D_1$ e $D_4$
$S_3$ e $S_2$ estão ligadas, e $S_1$ e $S_4$ , desligadas	4	0110	0	$S_3$ e $S_2$ , $D_3$ e $D_2$

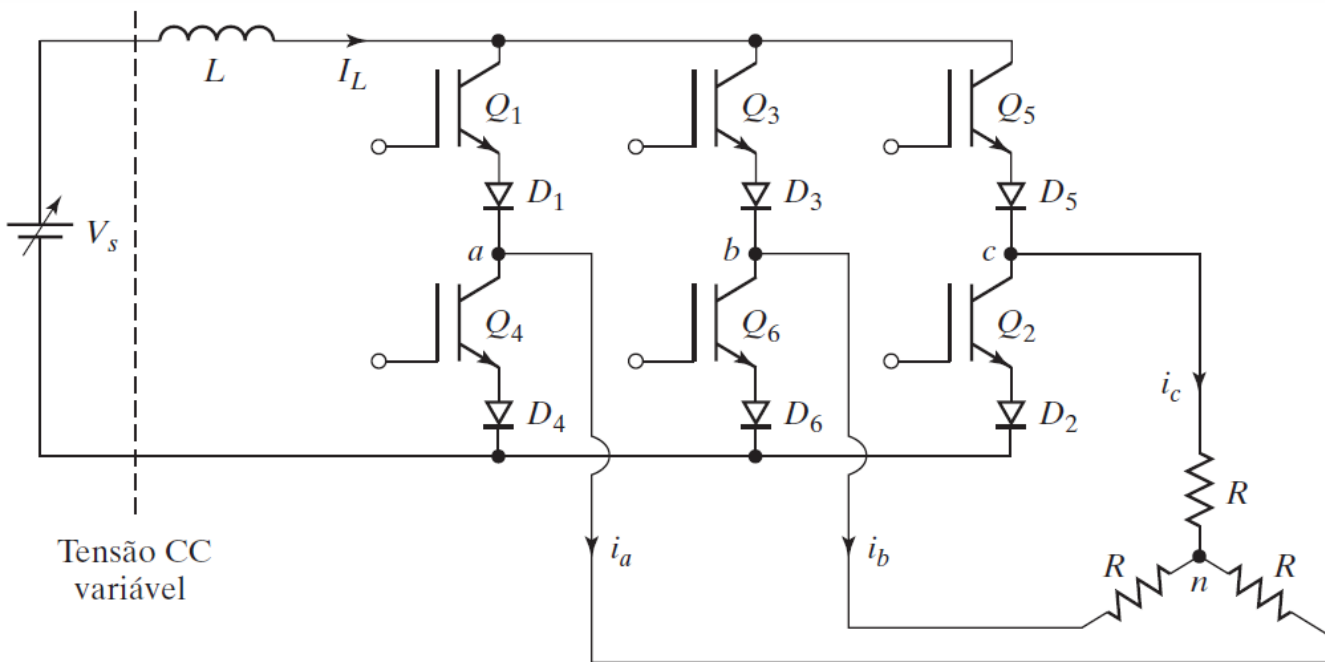


# Inversores de corrente



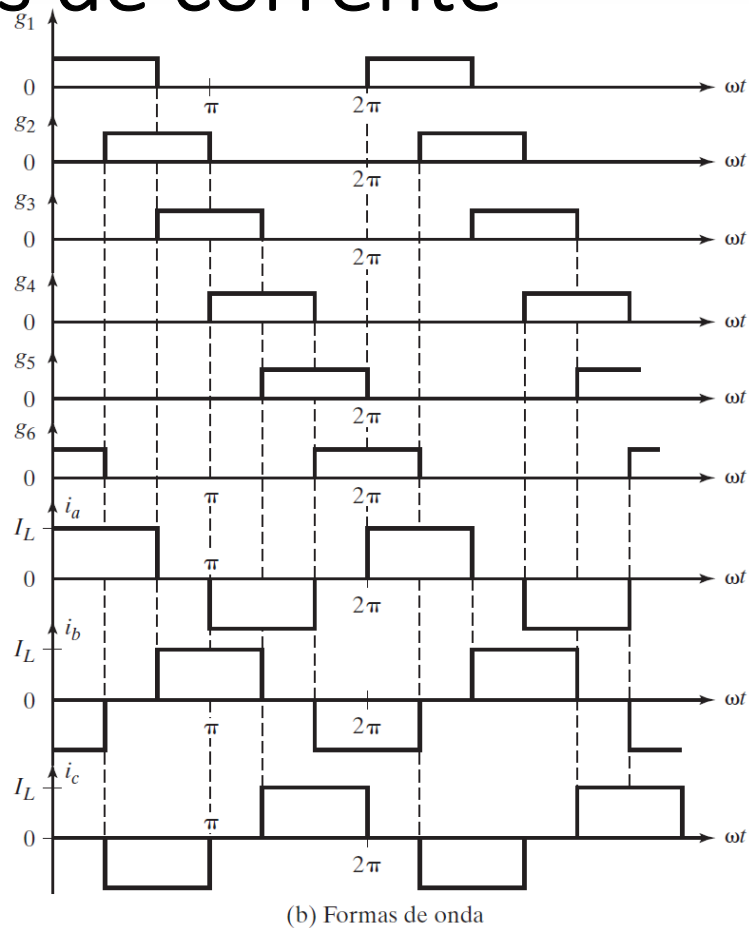
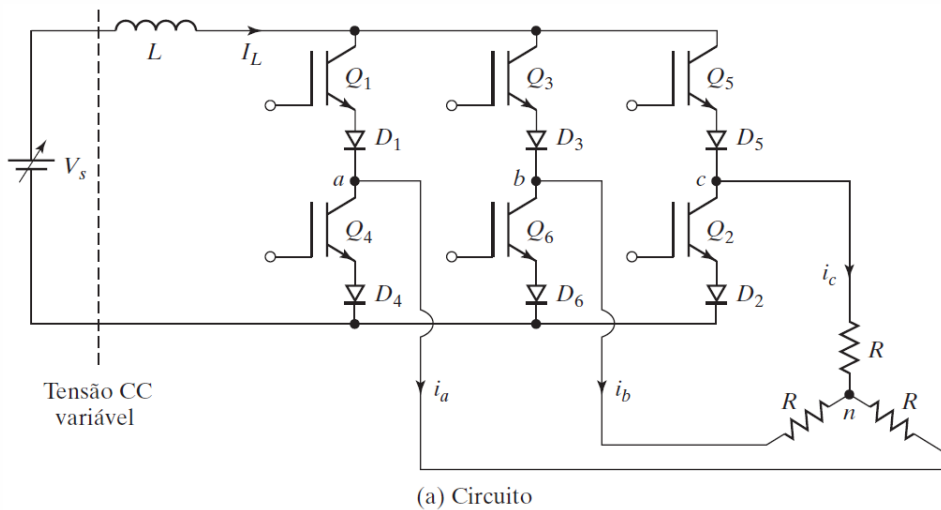
(c) Corrente de carga

# Inversores de corrente trifásico



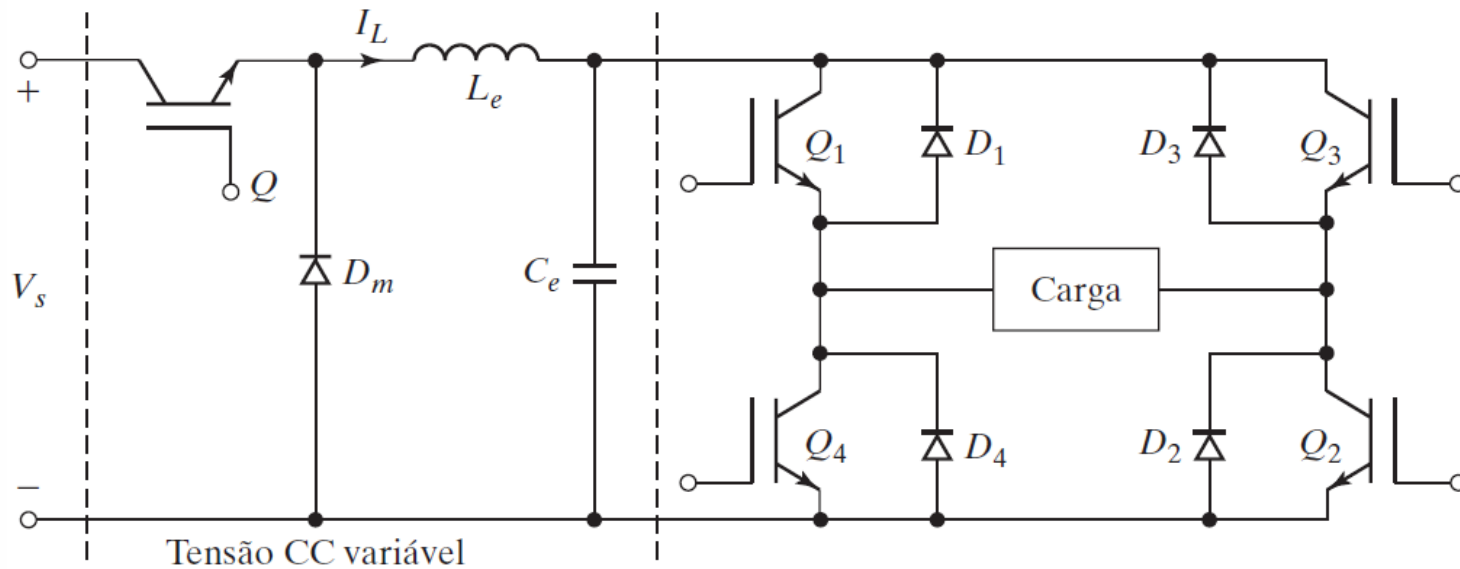
(a) Circuito

# Inversores de corrente





# Inversor com barramento CC variável





# Abraço!

---

**Heverton Augusto Pereira**

Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

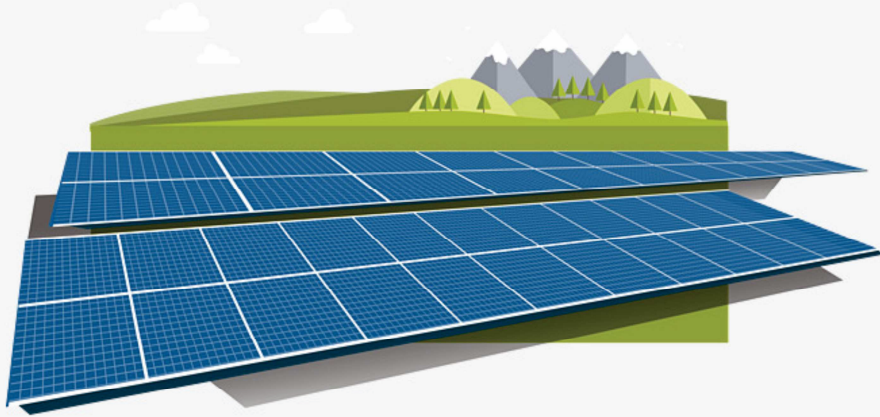
Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: [heverton.pereira@ufv.br](mailto:heverton.pereira@ufv.br)

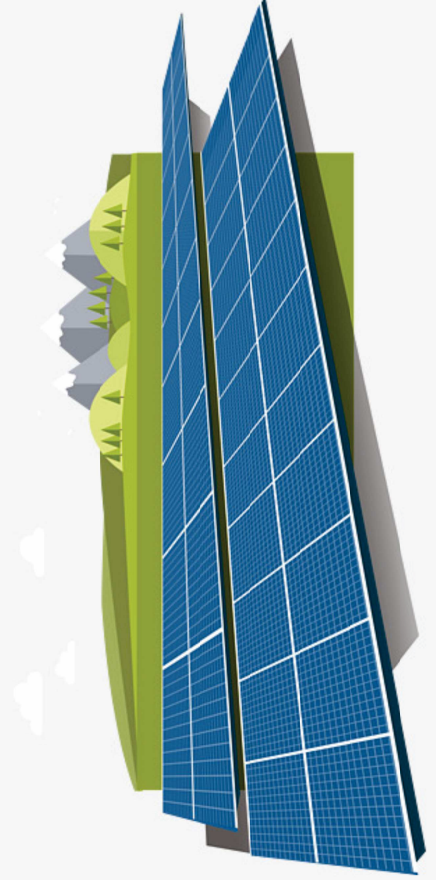
## Aula 08 – Conversores c.c./c.a.

### Parte 2 – Aplicação em Sistemas Fotovoltaicos

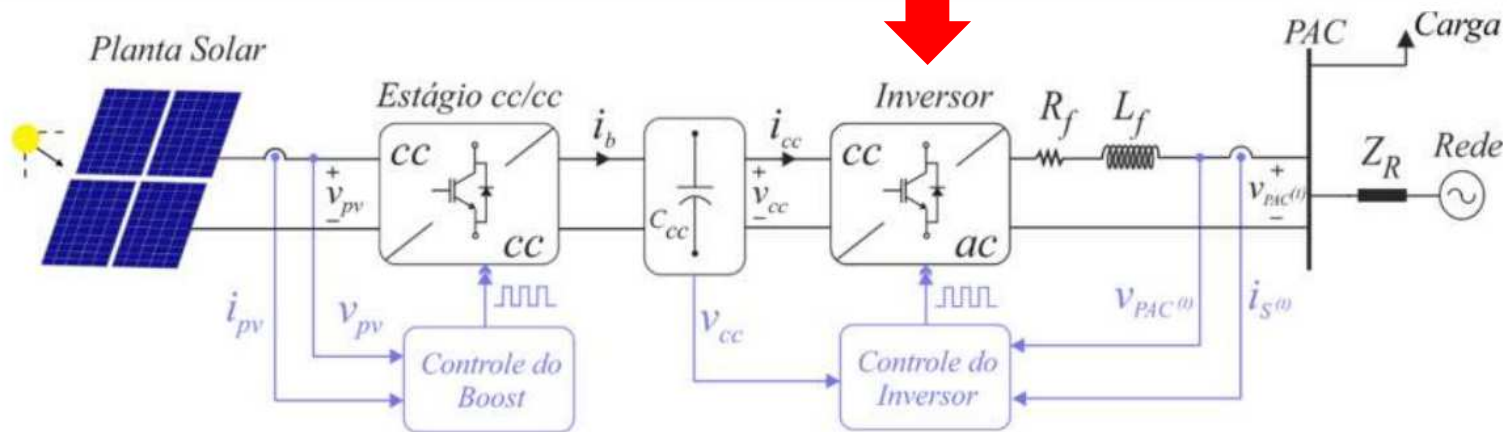


Prof. Heverton Augusto Pereira  
[heverton.pereira@ufv.br](mailto:heverton.pereira@ufv.br)



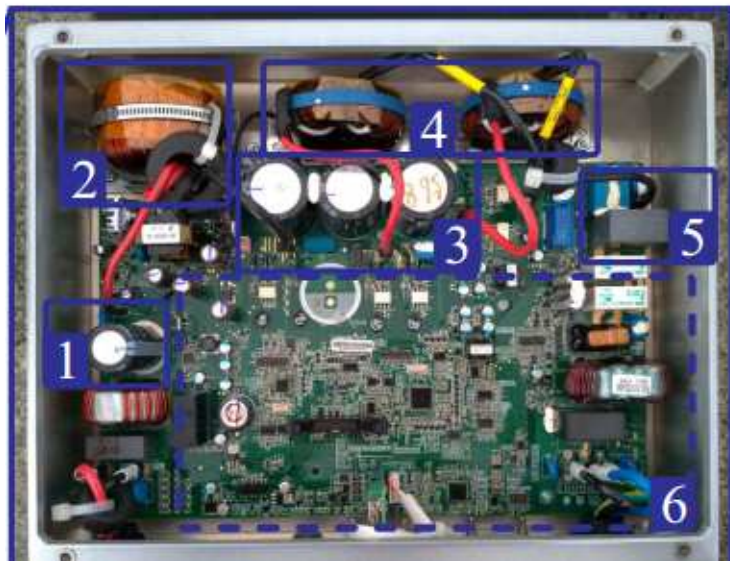


# Inversor Fotovoltaico



- ✓ Controlar a injeção de potência ativa e reativa na rede elétrica;
- ✓ Realiza a proteção do sistema fotovoltaico quando existem problemas na rede elétrica;
- ✓ Podem ser monofásicos ou trifásicos;
- ✓ Geralmente acima de 7kW são trifásicos;

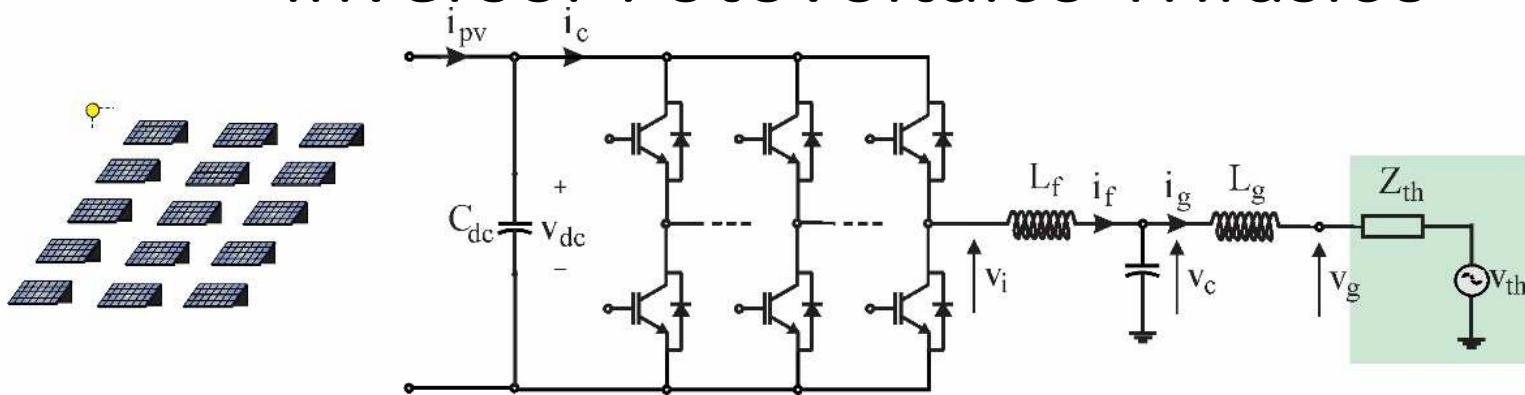
# Inversor Fotovoltaico



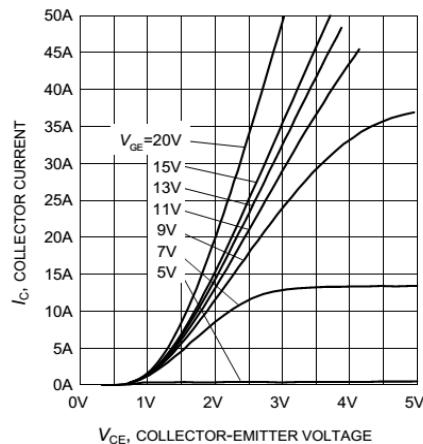
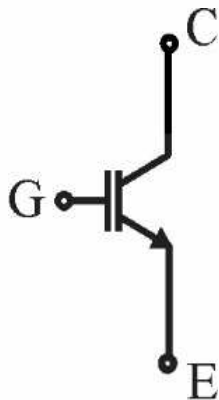
1. Capacitor do boost
2. Indutor do boost
3. Banco de capacitores do estágio c.c./c.a.
4. Indutor do filtro de saída
5. Capacitor do filtro de saída
6. Condicionamento e controle



# Inversor Fotovoltaico Trifásico

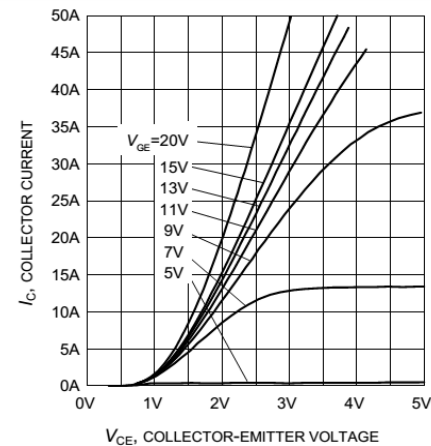
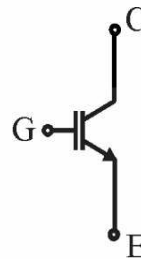


✓ Dentre as chaves semicondutoras mais utilizadas para inversores, pode-se citar o IGBT;



# Chave semicondutoras: IGBT

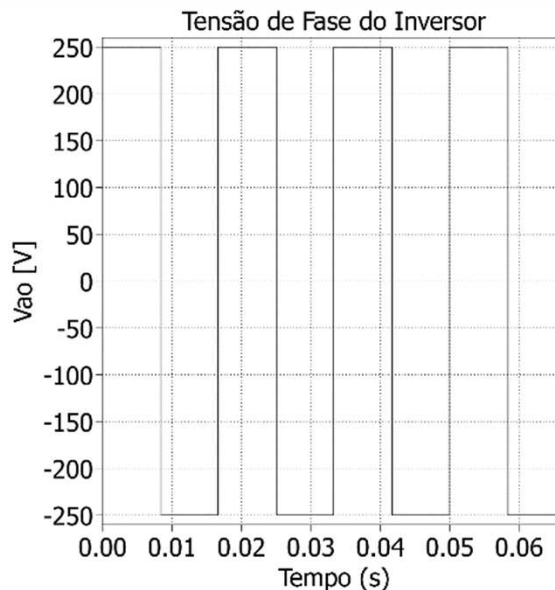
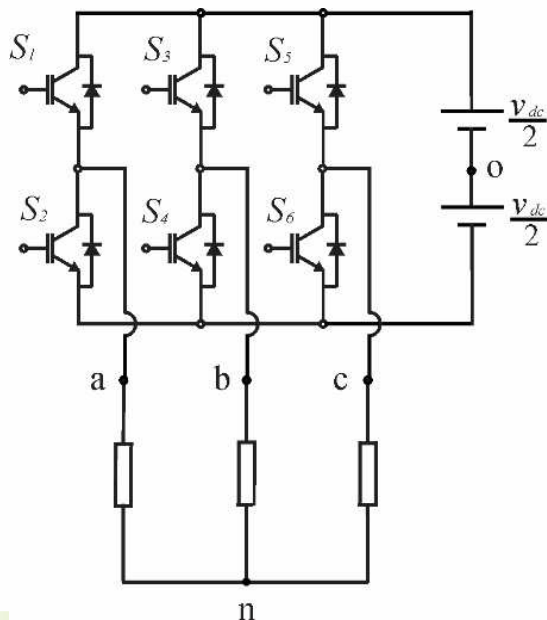
- ✓ A corrente máxima é uma função da temperatura na junção do dispositivo;
- ✓ Necessário um projeto térmico;
- ✓ Não são chaves semicondutoras bidirecionais em corrente;
- ✓ IGBT's são sensíveis a polarização reversa (tensão negativa entre coletor e emissor).
- ✓ Um IGBT de 1800 V pode queimar com uma tensão reversa de -20 V;
- ✓ A queda de tensão diretamente polarizada do diodo não passa de 2,5V;





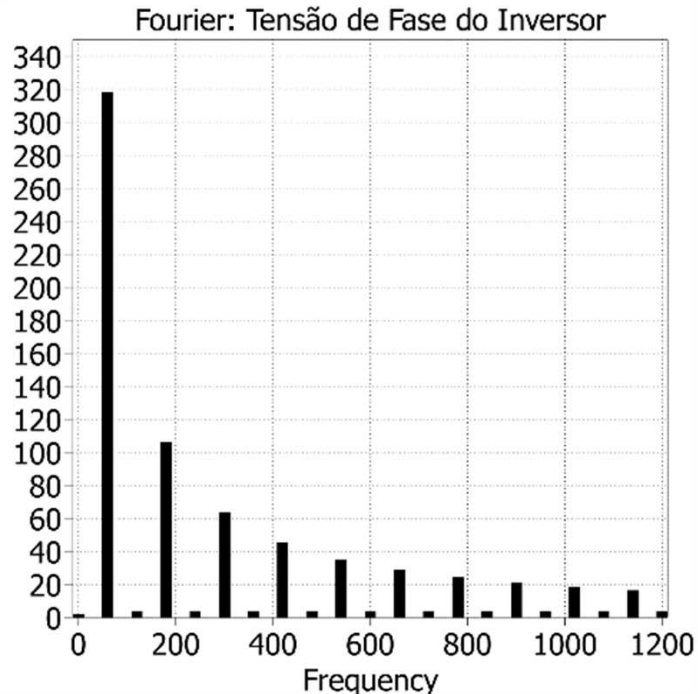
# Estratégias de modulação

- ✓ Os pares de chaves ( $S_1, S_2$ ), ( $S_3, S_4$ ) e ( $S_5, S_6$ ) devem ser complementares a fim de evitar um curto-circuito no barramento;
- ✓ Se as chaves forem comutadas com a frequência da rede elétrica, a forma de onda da tensão é dada por  $v_{ao}$ ;
- ✓ Observe que a forma de onda está com a metade do barramento;
- ✓ Portanto existem dois níveis de tensão apenas, o que justifica chamar esta topologia de inversor de dois níveis.



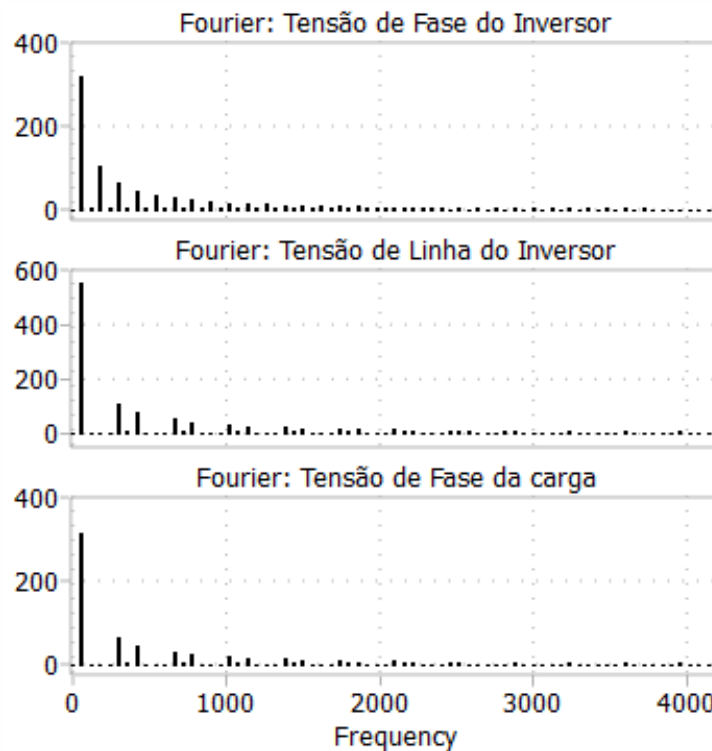
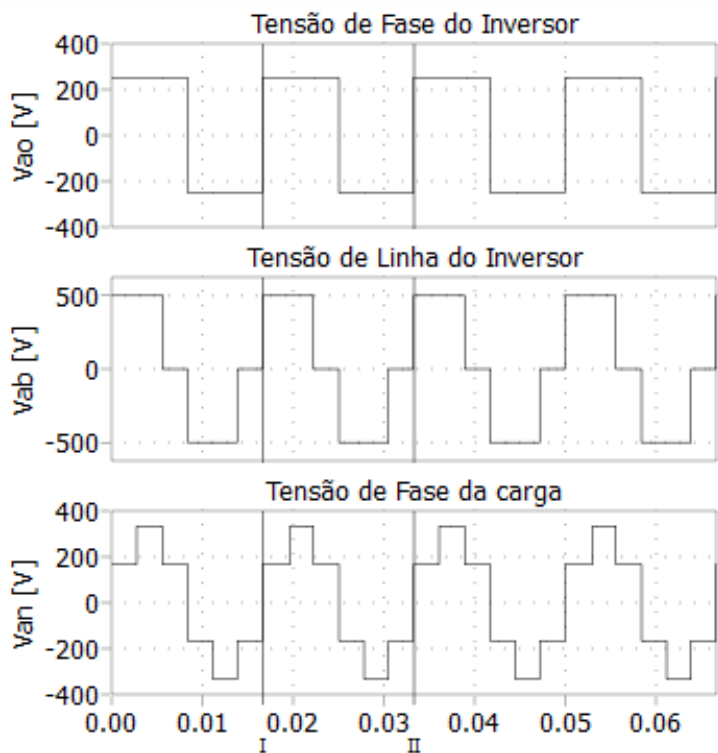
# Harmônicos devido o chaveamento

- ✓ O grande problema desta metodologia é que o espectro de uma onda quadrada contém harmônicos ímpares de baixa ordem que são de difícil filtragem e portanto, são indesejáveis.



# Tensão de fase

- ✓ De fato, a componente fundamental da tensão sintetizada por fase pelo inversor  $v_{ao,f}$  vale:  $v_{ao,f} = \frac{2}{\pi} v_{dc}$

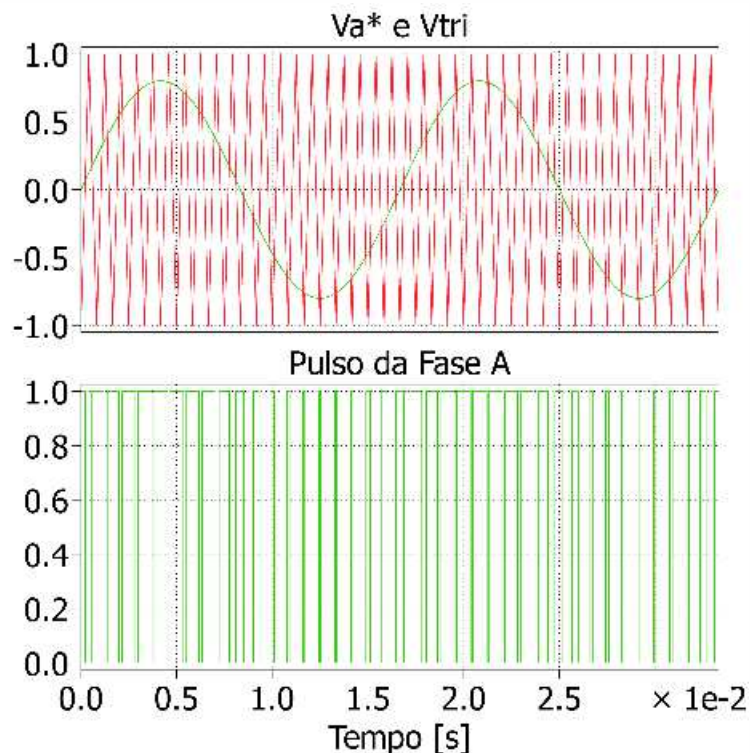
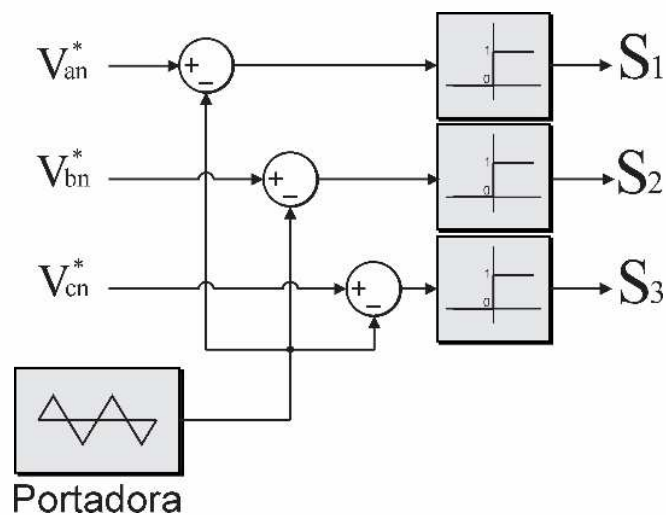


# Estratégias de modulação

- ✓ Esta relação é o limite superior do aproveitamento do barramento cc da topologia estudada;
- ✓ Outro ponto interessante é que a tensão aplicada na carga apresenta 6 saltos dentro de um ciclo.
- ✓ Por este motivo, quando um inversor opera desta forma, costuma-se dizer que ele está operando em modo *six-step*.
- ✓ No modo de operação six-step não é possível controlar a amplitude da tensão que está sendo sintetizada.
- ✓ Desta forma, estratégias que proporcionem obter uma tensão variável sem conteúdo harmônico de baixa frequência é interessante.
- ✓ Neste contexto a modulação por largura de pulso (PWM – do inglês pulse width modulation) é uma técnica largamente utilizada
- ✓ Estratégia PWM permite o controle da tensão e da frequência aplicada na carga

# Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ A estratégia tradicional conhecida como modulação senoidal (SPWM), compara o sinal senoidal a qual deseja-se sintetizar com uma portadora triangular na frequência de chaveamento.

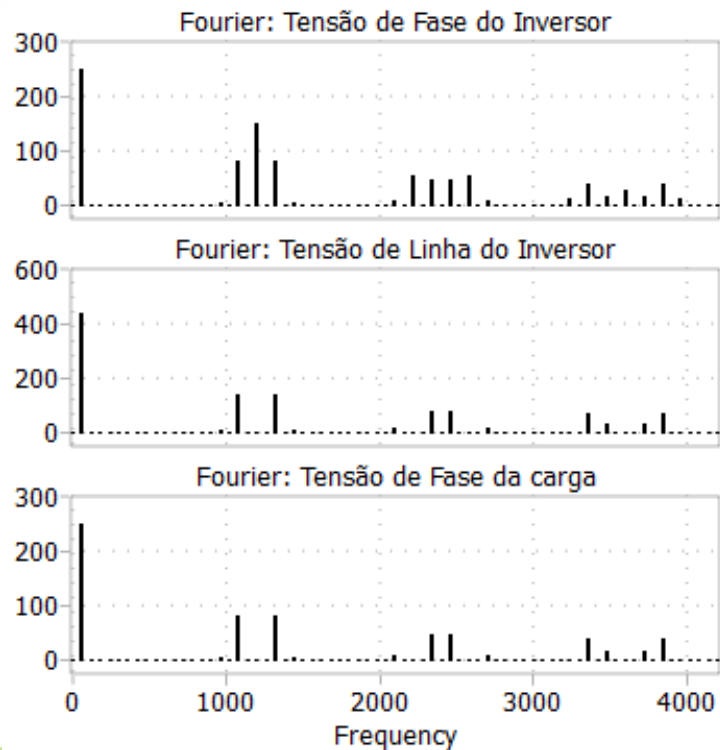
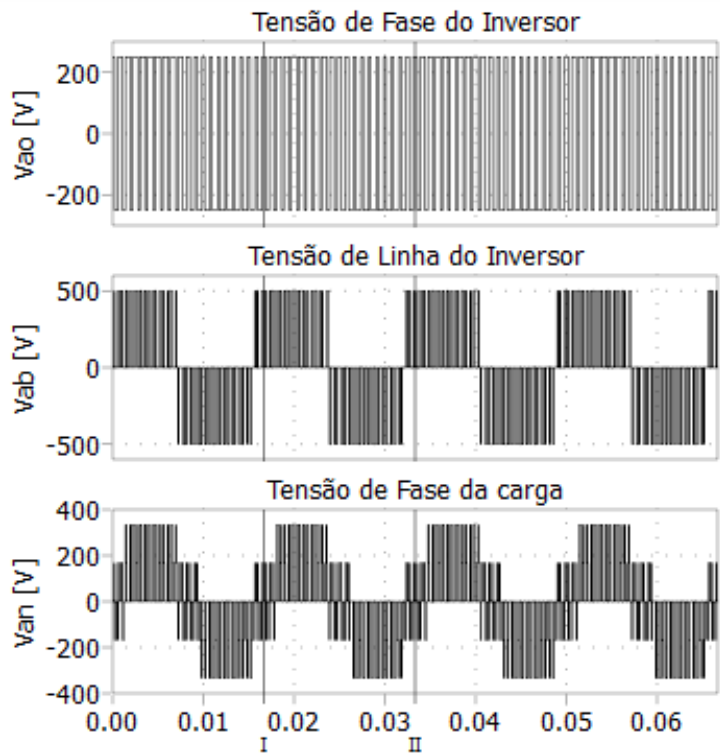


# Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ A medida que a amplitude do sinal senoidal (referência) aumenta em relação a amplitude da triangular (portadora), a tensão sintetizada também aumenta.
- ✓ É possível provar que enquanto a amplitude da referência for menor que da onda triangular a relação é **linear**.
- ✓ Quando o modulador opera nesta região, diz-se que ele está operando na região linear.

# Exemplo:

- ✓ Amplitude da referência igual a amplitude da portadora,
- ✓ Tensão de barramento cc de 500 V
- ✓ Frequência de chaveamento igual a 1200 Hz



## Exemplo:

- ✓ Observa-se que o primeiro conjunto de harmônicos se encontram em torno da frequência de chaveamento, o que facilita a filtragem.
- ✓ No limite da região linear o modulador sintetiza uma tensão máxima igual a

$$v_{ao,f} = \frac{v_{dc}}{2}.$$

- ✓ Define-se o índice de modulação como sendo

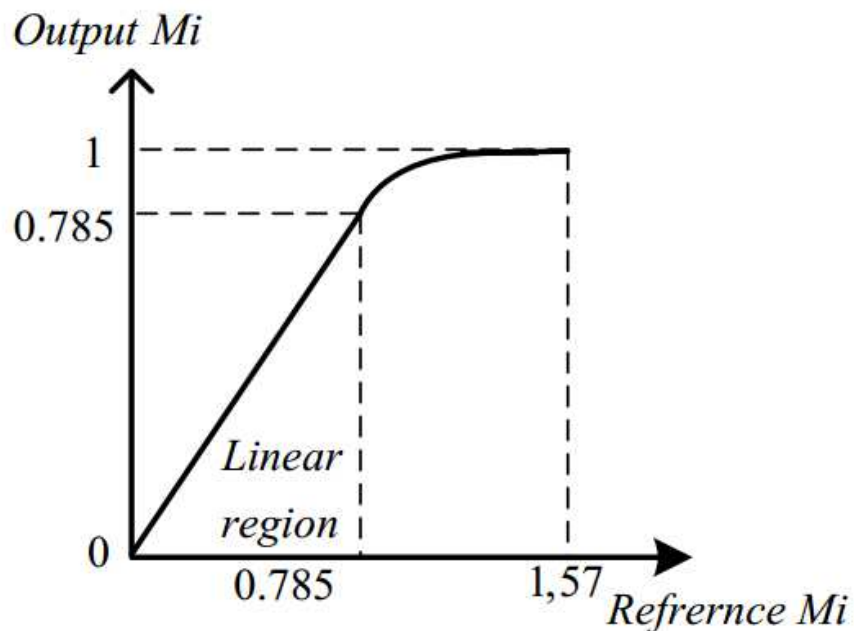
$$m = \frac{v_{ao}}{v_{six\ step}} = \frac{v_{ao}}{\frac{2}{\pi} v_{dc}}.$$

- ✓ O índice de modulação máximo alcançado na região linear do SPWM é 0,785.



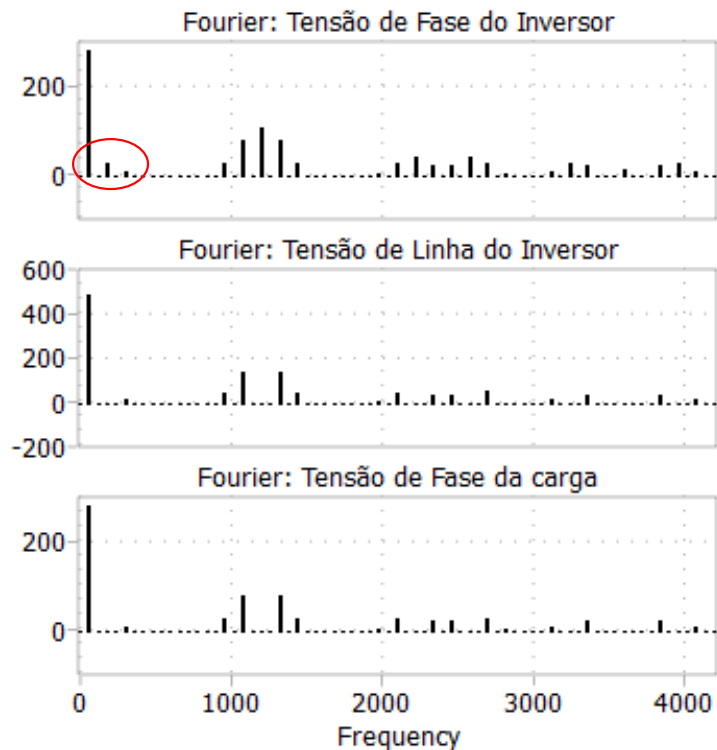
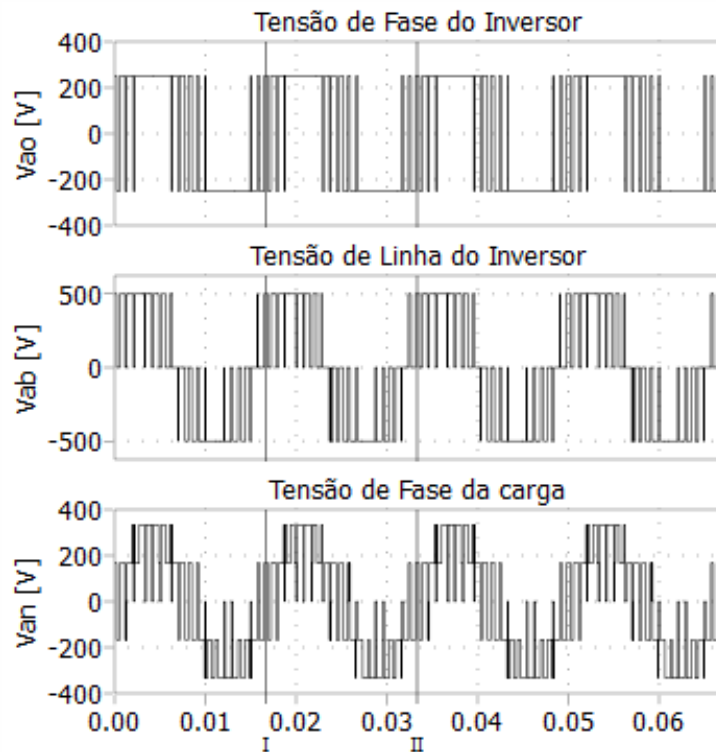
# O que acontece na região não linear?

- ✓ Quando a amplitude da referência se torna maior que a amplitude da portadora, ocorre um fenômeno conhecido como sobremodulação.
- ✓ Nesta região, a relação entre a tensão sintetizada e a amplitude da referência não é mais linear.
- ✓ Além disso, harmônicos de baixa frequência aparecem no sinal sintetizado.



# Exemplo:

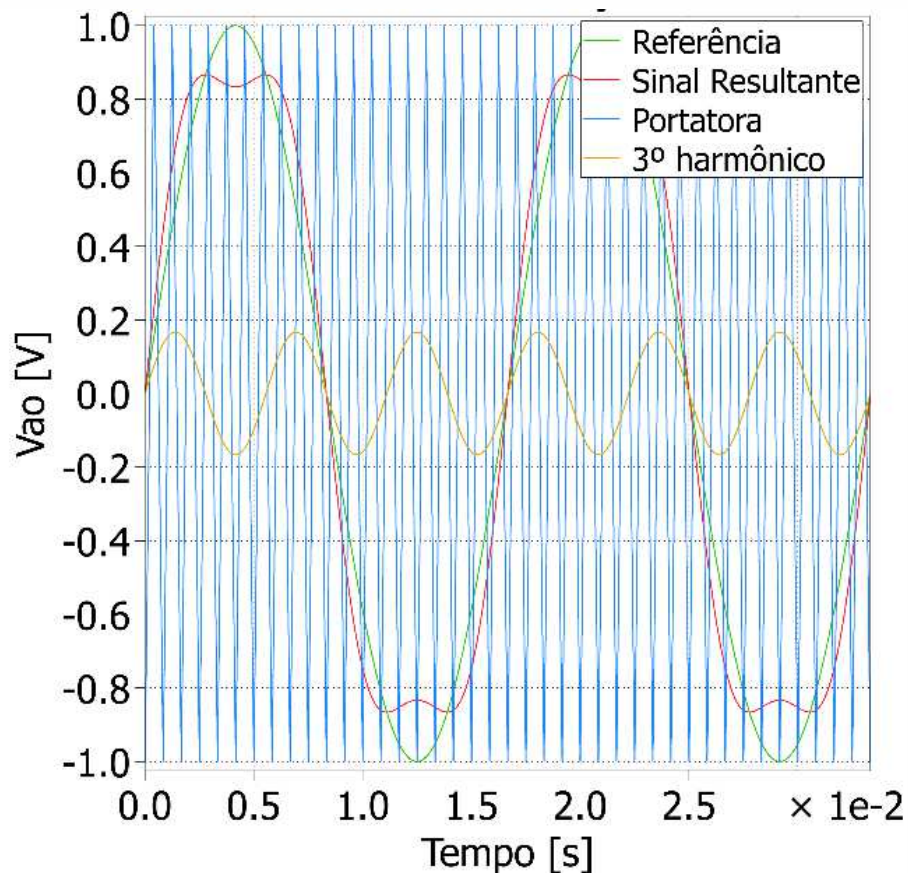
- ✓ Amplitude da referência igual 1,5 vezes a amplitude da triangular;
- ✓ Tensão de barramento cc de 500 V;
- ✓ Frequência de chaveamento igual a 1200 Hz;



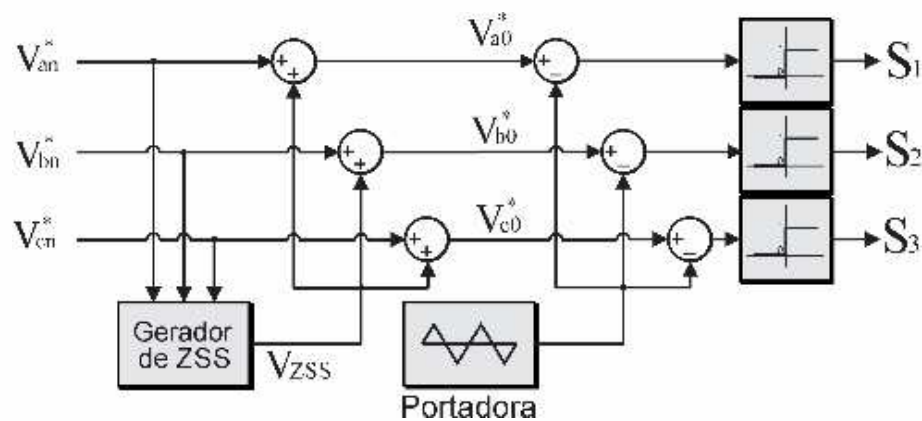
# Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

- ✓ A limitação da máxima tensão a ser sintetizada pela técnica SPWM está intimamente relacionada com a característica do sinal de referência.
- ✓ A inserção de harmônicos ímpares múltiplos de 3 (componentes de sequência zero) ao sinal de referência permite um maior aproveitamento do barramento cc.

# Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero



- ✓ Quando uma onda de terceiro harmônico com um sexto da amplitude do sinal de referência é somada ao sinal de referência.

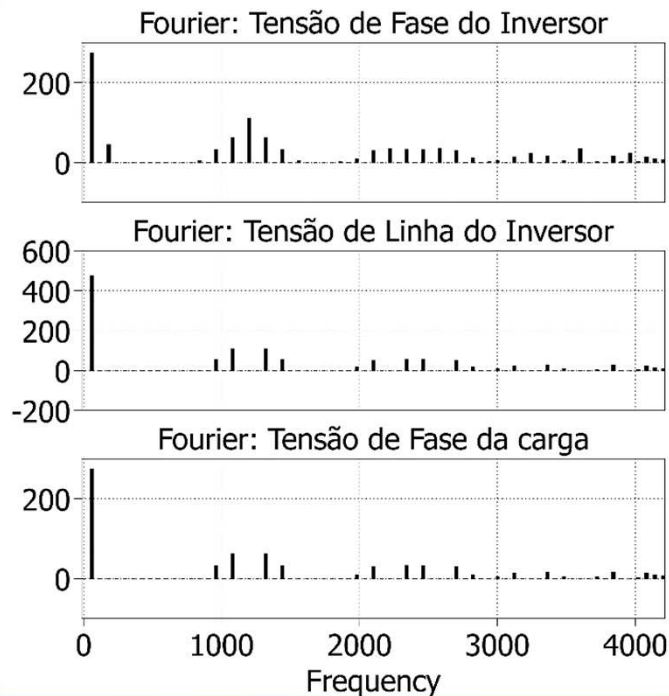
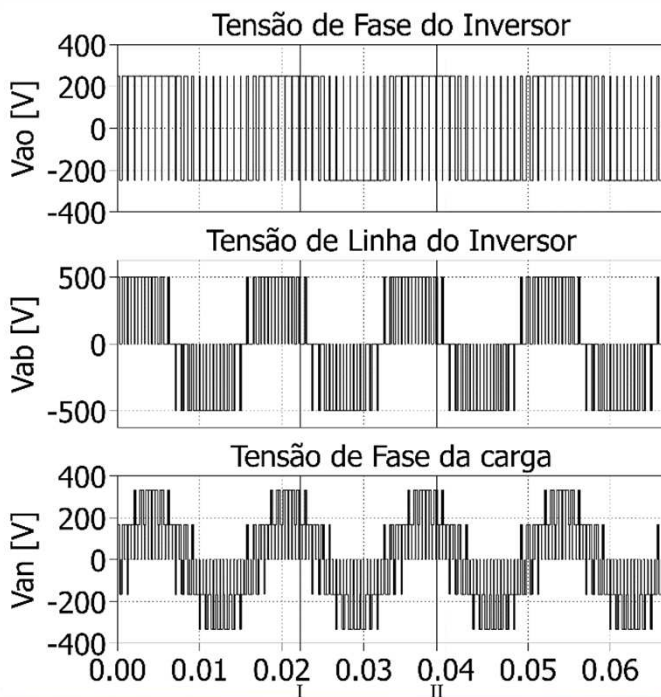


# Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

- ✓ Desta forma, a região linear se estende, visto que pode-se adicionar mais componente fundamental até que as amplitudes do novo sinal de referência e da portadora se igualem.

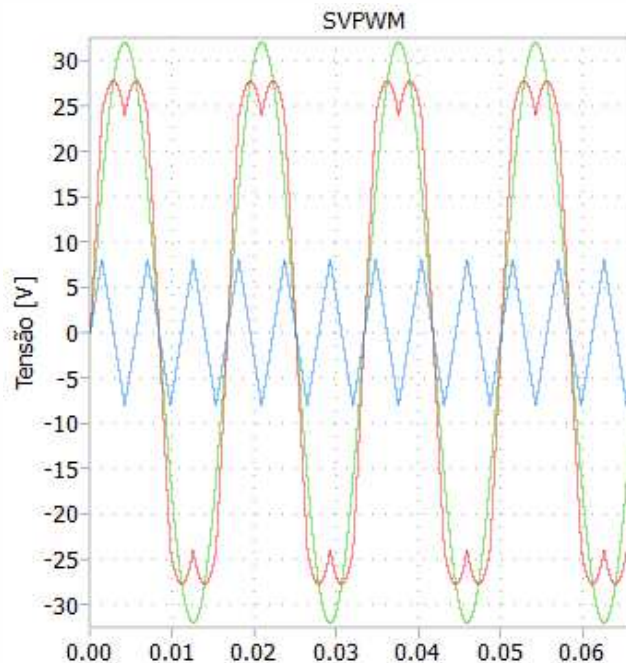
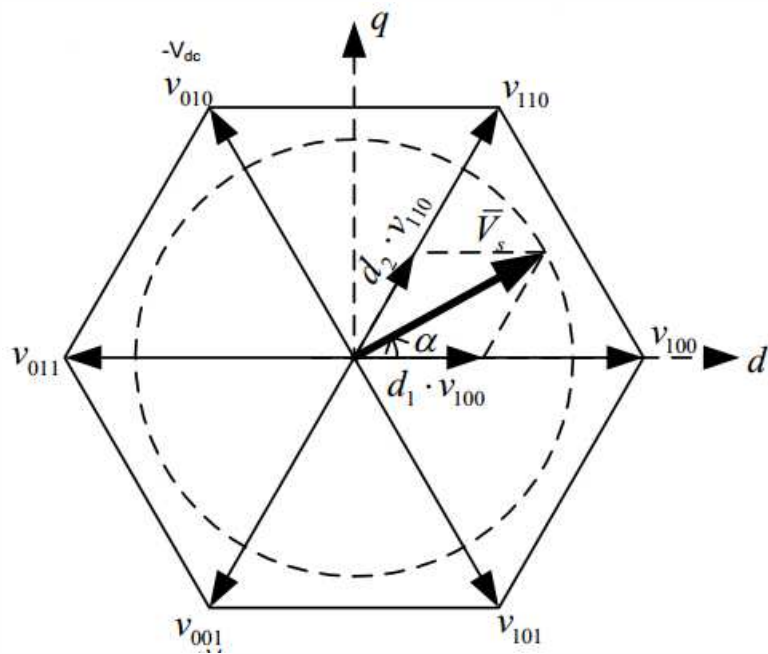
# Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

- ✓ A componente de terceiro harmônico não aparece na tensão de linha do inversor;
- ✓ Não acrescenta harmônicos de baixa frequência na tensão da carga.
- ✓ Desta forma, a região linear se estende, visto que pode-se adicionar mais componente fundamental até que as amplitudes do novo sinal de referência e da portadora se igualem.



# Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ A técnica de modulação conhecida como Space Vector PWM (SVPWM) baseia-se na teoria de fasores espaciais e associa à cada estado de condução das chaves um vetor espacial no plano complexo.
- ✓ Na sua implementação mais elegante, o SVPWM detecta a posição no plano complexo da tensão seleciona sempre quatro vetores para sintetizá-lo.



# Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ No limite da região linear, o modulador SVPWM sintetiza uma tensão máxima igual a:

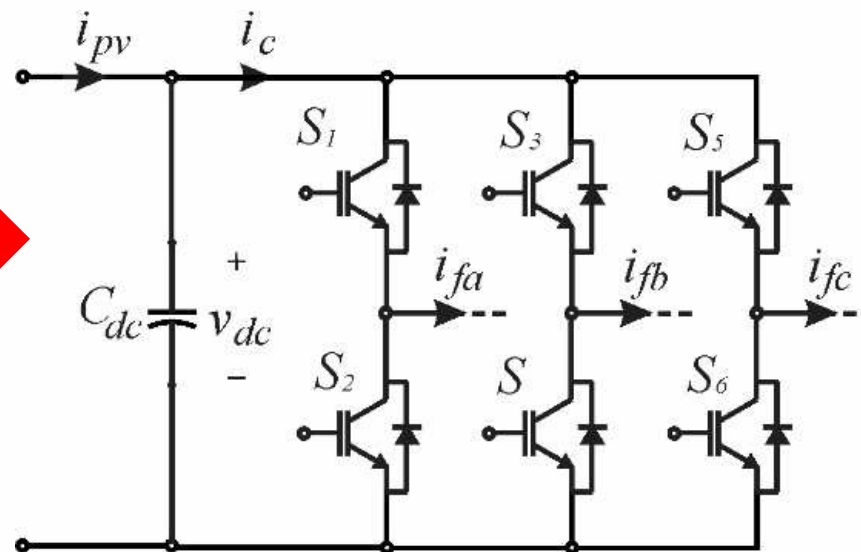
$$v_{ao,f} = \frac{v_{dc}}{\sqrt{3}}$$

- ✓ Observa-se que a estratégia de modulação SVPWM apresenta um ganho de aproximadamente 15% em relação ao SPWM.
- ✓ De fato, a modulação vetorial resulta em um maior aproveitamento do barramento cc do inversor.



# Barramento cc do inversor

- ✓ A topologia de inversor utilizada necessita de uma barramento de corrente contínua com tensão regulada.
- ✓ As especificações deste barramento incluem o valor da tensão do mesmo e o valor da capacitância.



# Barramento cc do inversor: Considerações de projeto

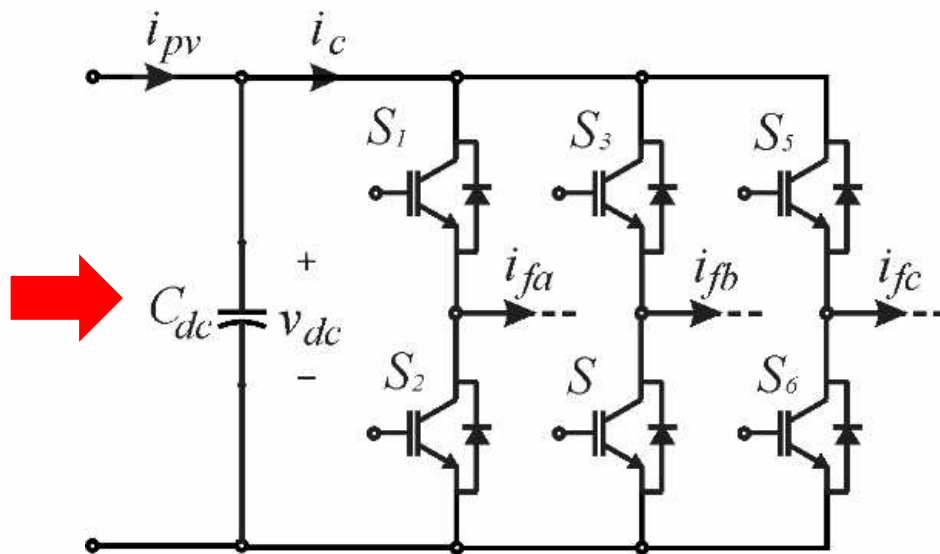
$$C_{dc,min} = \frac{3I}{4 \omega \Delta v_{dc}}$$

Onde:

- ✓  $I$  é o pico da corrente de fase do conversor,
- ✓  $\omega$  é a frequência da rede elétrica e
- ✓  $\Delta v_{dc}$  é a máxima variação de barramento permitida pelo projeto, denominada muitas vezes pelo termo ripple.

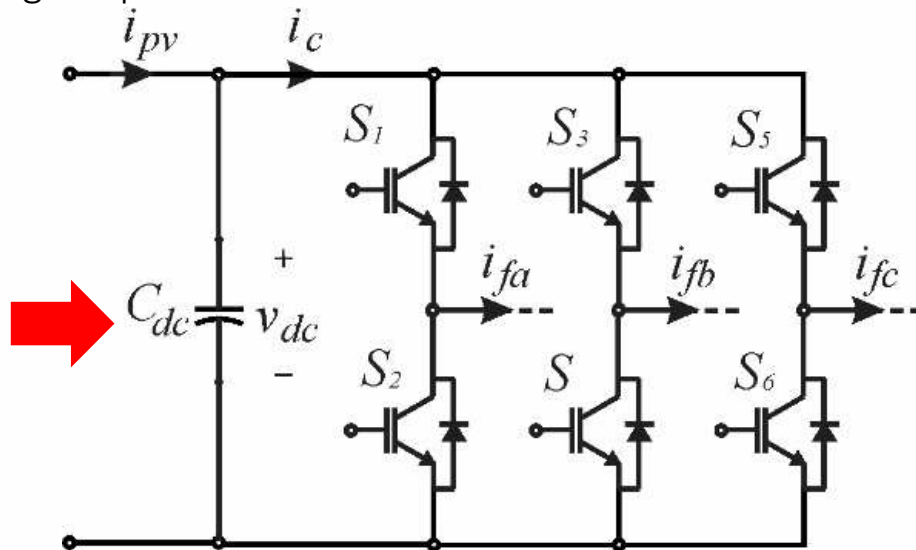
# Barramento cc do inversor

- ✓ Este valor mínimo tem a finalidade de garantir que o modulador irá operar na região linear e portanto não irá gerar harmônicos de baixa frequência;
- ✓ Deve-se lembrar que o inversor está conectado à rede elétrica e portanto deve sintetizar uma tensão superior a tensão da rede a fim de proporcionar injeção de potência na mesma.



# Barramento cc do inversor: Considerações de projeto

1. A impedância de saída do conversor é considerada 0,08 pu com uma variação de 5 % em torno deste valor;
2. A tensão da rede pode variar em torno de 5%;
3. O barramento cc no pior caso de operação irá apresentar 10% de oscilação e um erro de 2% em regime permanente.



# Barramento cc do inversor: Considerações de projeto

- ✓ Baseado nestas considerações, a tensão mínima a ser sintetizada pelo inversor é dada por:

$$\hat{V}_{s,inv} = 1,05 \times (1 + 0,08 \times 1,05)V_g = 1,139\hat{V}_g.$$

onde  $\hat{V}_{s,inv}$  é o pico da tensão de fase sintetizada pelo inversor e  $\hat{V}_g$  é o pico da tensão de fase no ponto de conexão com a rede.

- ✓ De acordo com a 3ª consideração realizada, o valor mínimo da tensão do barramento cc será:

$$v_{dc,min} = 0,88 v_{dc}.$$

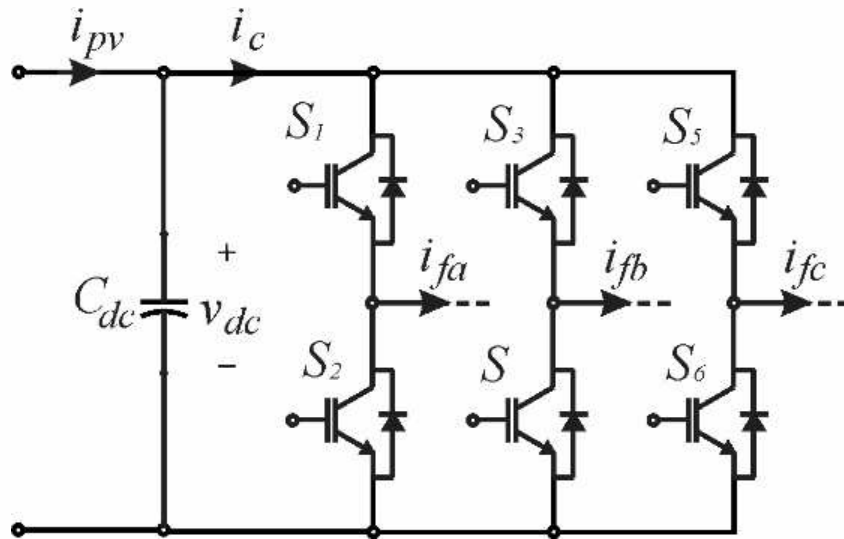
$$\frac{0,88 v_{dc}}{\sqrt{3}} = 1,139\hat{V}_g \Leftrightarrow \boxed{v_{dc} = 2,24 \hat{V}_g}.$$

# Barramento cc do inversor: Considerações de projeto

- ✓ Por sua vez, o capacitor de barramento cc é importante para filtrar as oscilações de tensão do barramento cc.

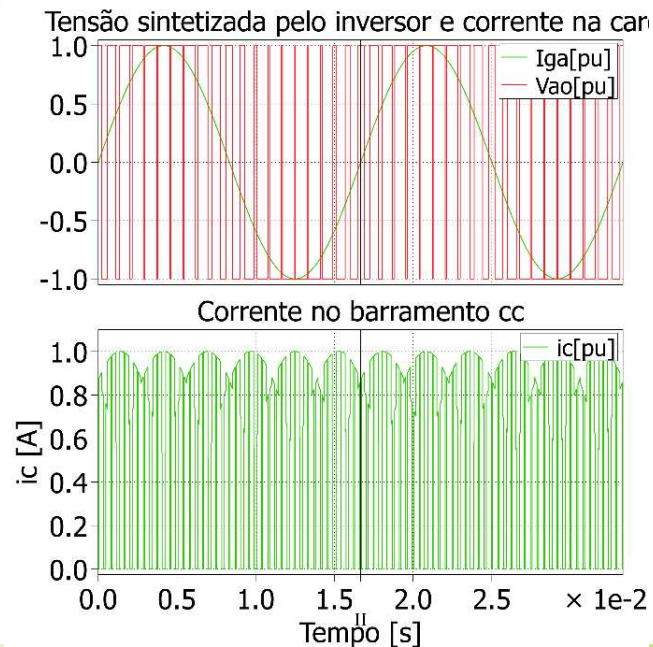
$$i_c = d_1 i_a + d_2 i_b + d_3 i_c.$$

onde  $d_i$  corresponde ao sinal do chaveamento da chave semicondutora  $S_i$  da parte superior da ponte.

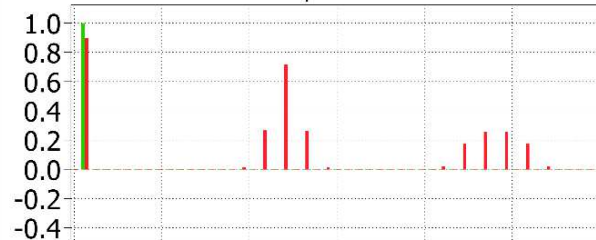


# Barramento cc do inversor: Considerações de projeto

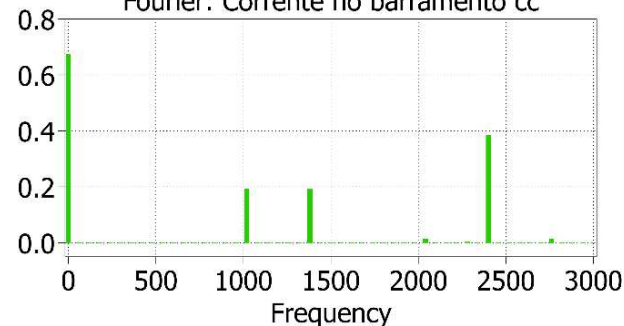
- ✓ Considerando-se o inversor injetando potência ativa;
- ✓ A corrente do barramento cc apresenta um valor médio, que corresponde a transferência de potência ativa da fonte contínua para a fonte alternada
- ✓ Apresenta também um ripple de alta frequência, que corresponde ao ripple do barramento c.c.



Fourier: Tensão sintetizada pelo inversor e corrente na

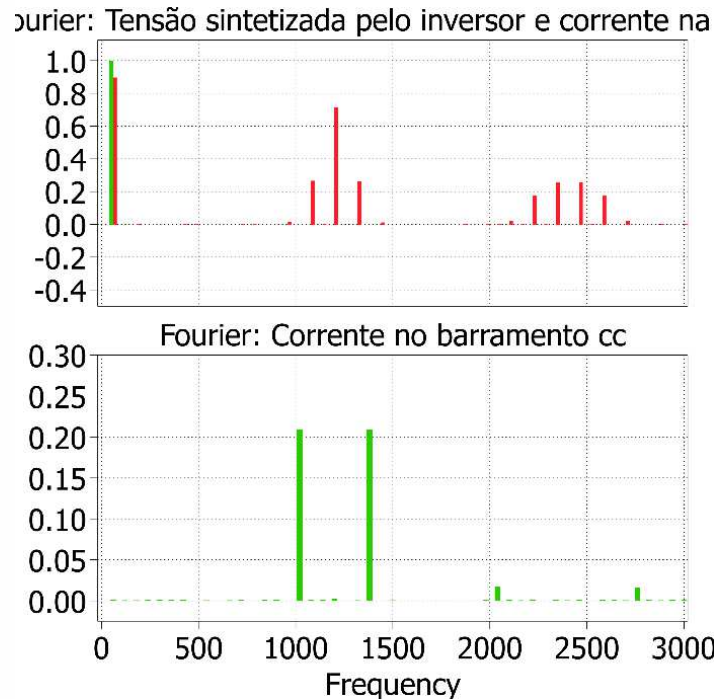
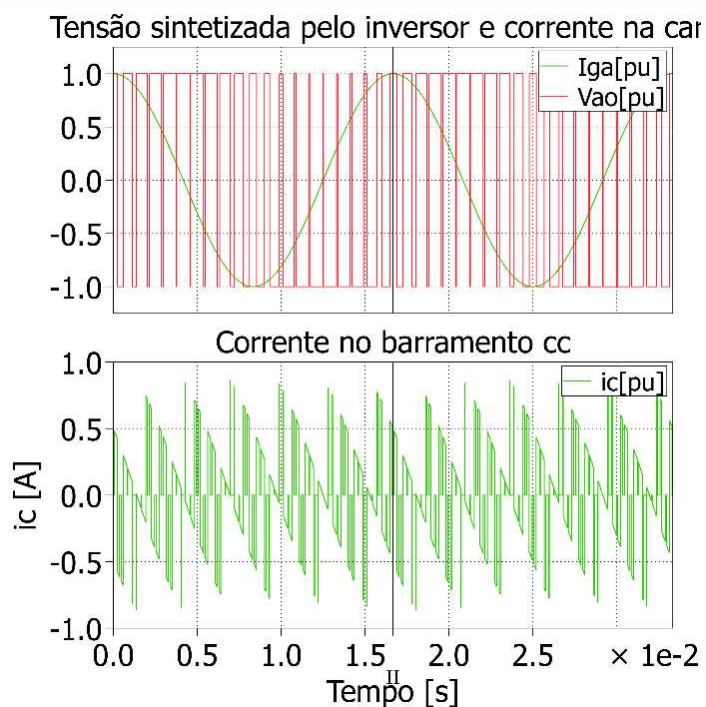


Fourier: Corrente no barramento cc



# Barramento cc do inversor: Considerações de projeto

- ✓ Considerando o inversor injetar potência reativa;
- ✓ Observe que a componente cc da corrente no barramento é aproximadamente zero.
- ✓ Isto significa que para gerar potência reativa em condições ideais, não é necessário consumir potência ativa.







# Abraço!

---

**Heverton Augusto Pereira**

Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: [heverton.pereira@ufv.br](mailto:heverton.pereira@ufv.br)