



Universidade Federal do ABC

Universidade Federal do ABC

Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica

# Aplicações de Conversores Estáticos de Potência

José L. Azcue Puma, Prof. Dr.

- ✓ *Conversores CC/CA (Inversores)*
- ✓ *Técnicas de modulação de potência*
  - ✓ *Modulação Senoidal*
  - ✓ *Modulação Senoidal com injeção de Terceiro Harmônico*
  - ✓ *Modulação Vetorial*

## Inversores de Tensão (Conversor CC/CA)

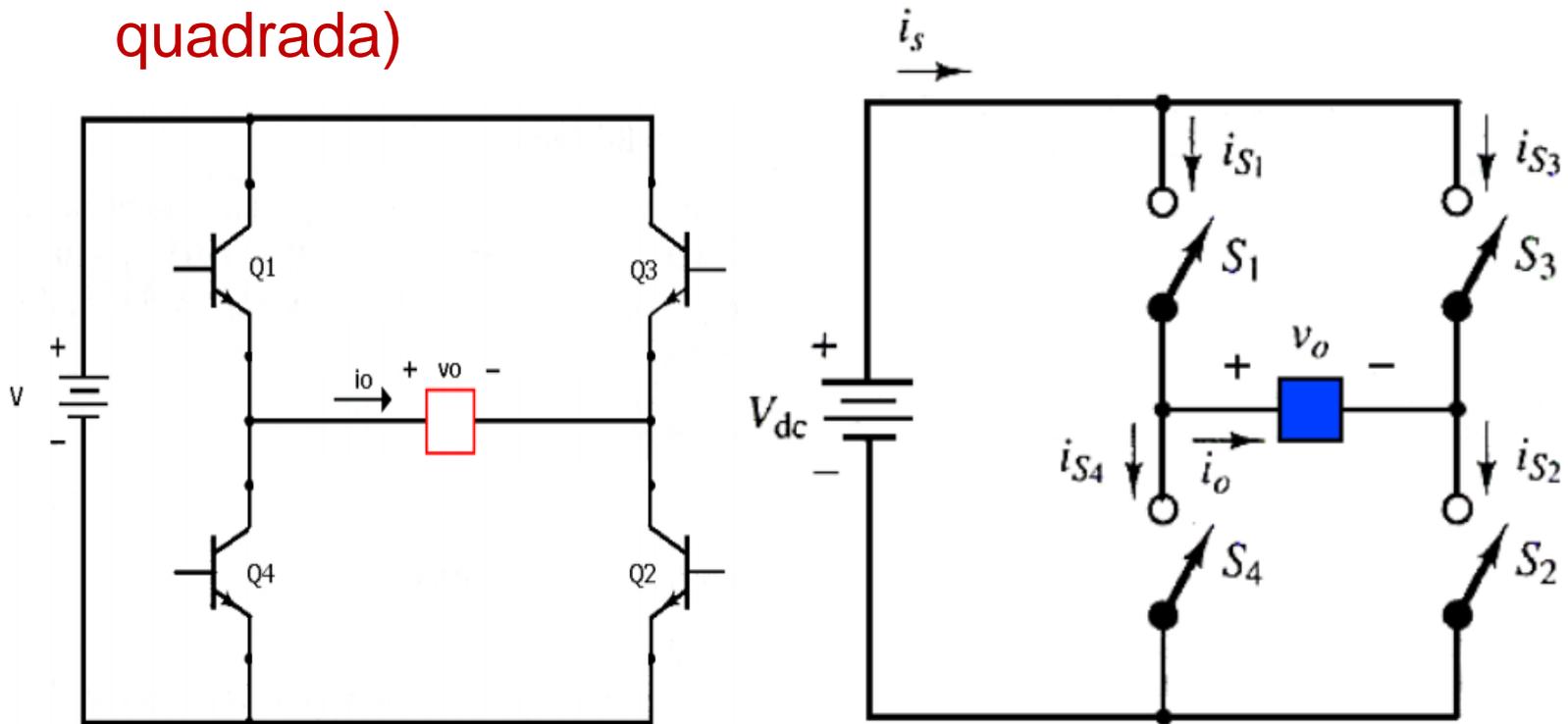
Os inversores de tensão são conversores estáticos destinados a controlar o fluxo de energia entre uma fonte de tensão contínua e uma carga em corrente alternada monofásica ou polifásica, com controle dos níveis do valor eficaz da tensão e da frequência, dependendo da aplicação.

### Aplicações

- a) Acionamento de máquinas de corrente alternada,
- b) Sistemas de alimentação ininterrupta (UPS), em tensão alternada, a partir da bateria.
- c) Sistemas conectados com a rede elétrica, etc.

## Estruturas Básicas

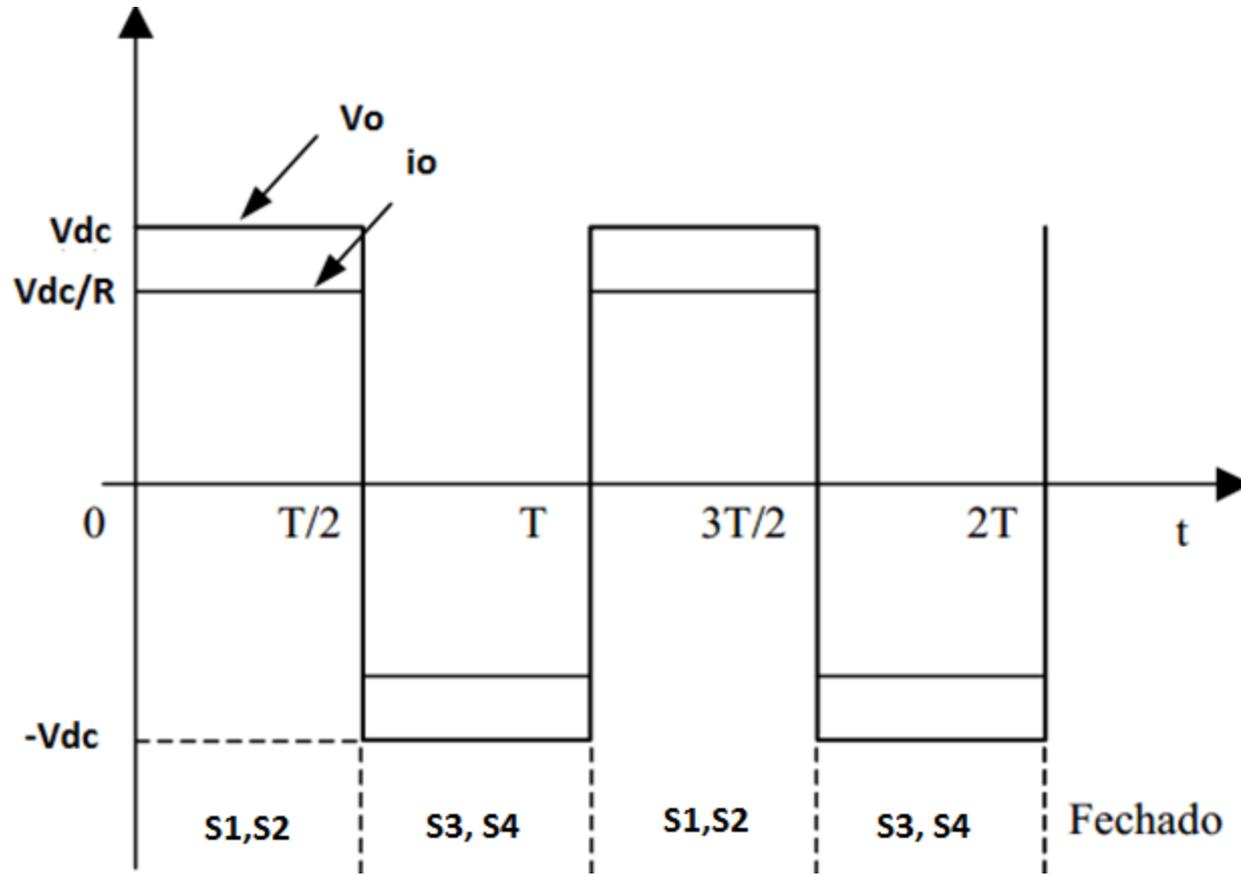
a) Inversor monofásico em ponte (modulação em onda quadrada)



Este tipo de modulação não permite o controle da amplitude nem do valor eficaz da tensão de saída.

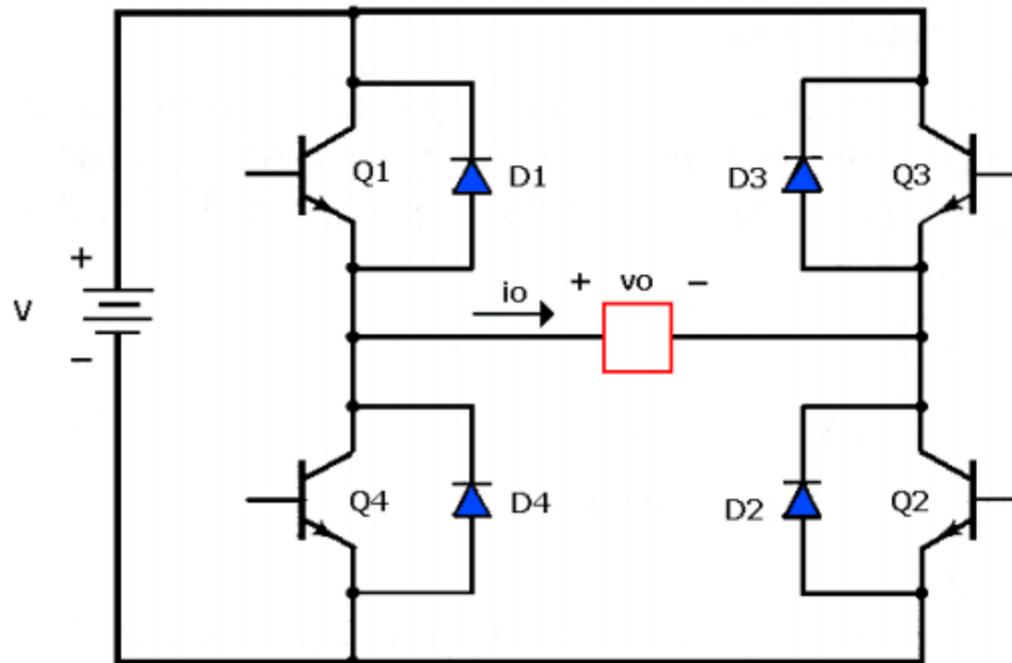
## Estruturas Básicas

Formas de onda da tensão e corrente (carga R)



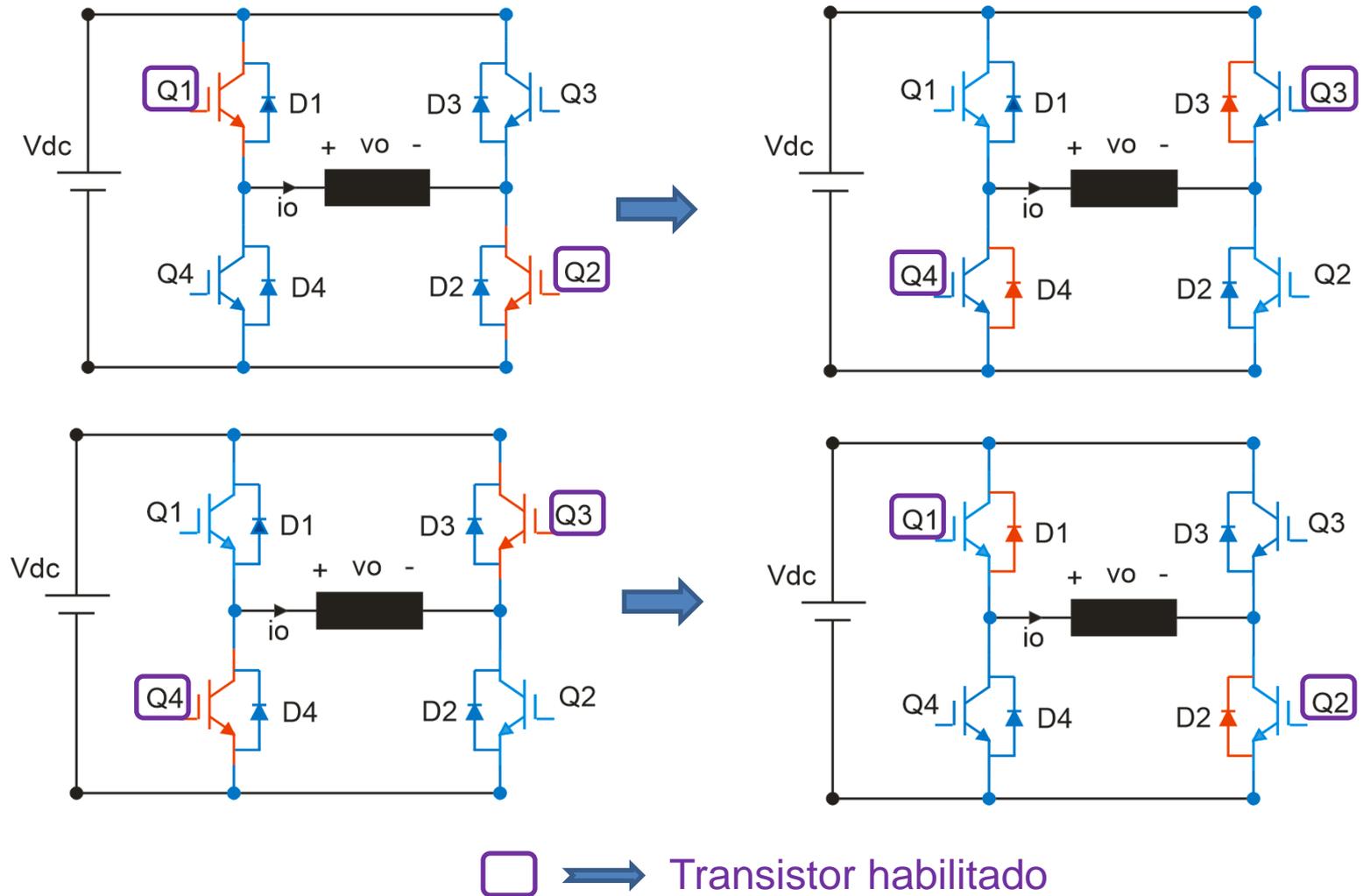
## Estruturas Básicas

Para carga indutiva devem ser adicionados diodos



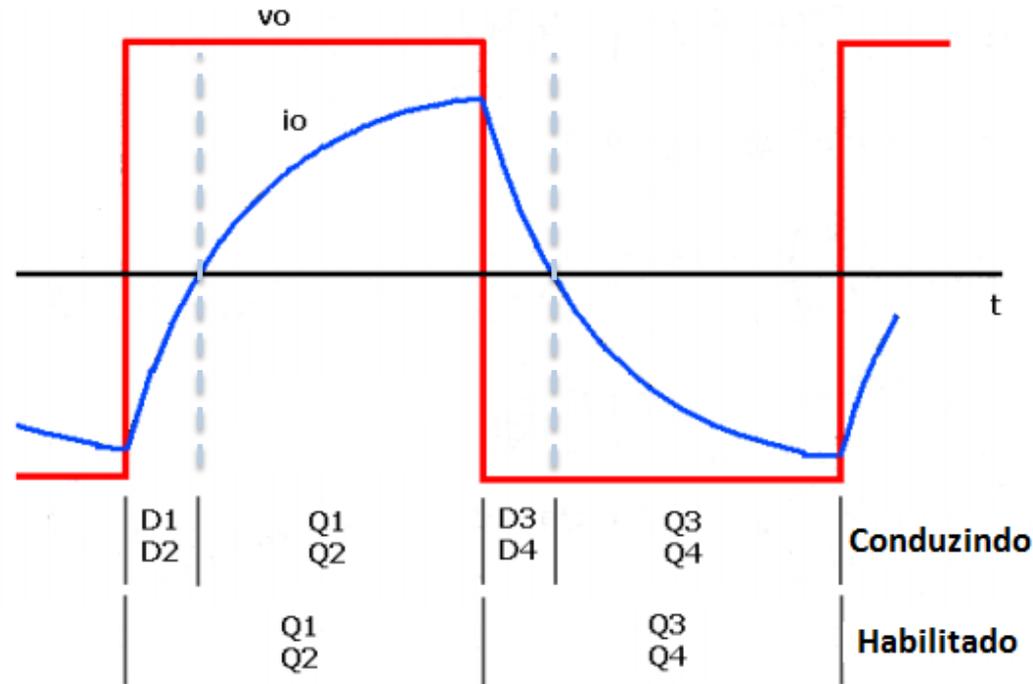
# Estruturas Básicas

## Etapas de funcionamento (mod. em onda quadrada)



## Estruturas Básicas

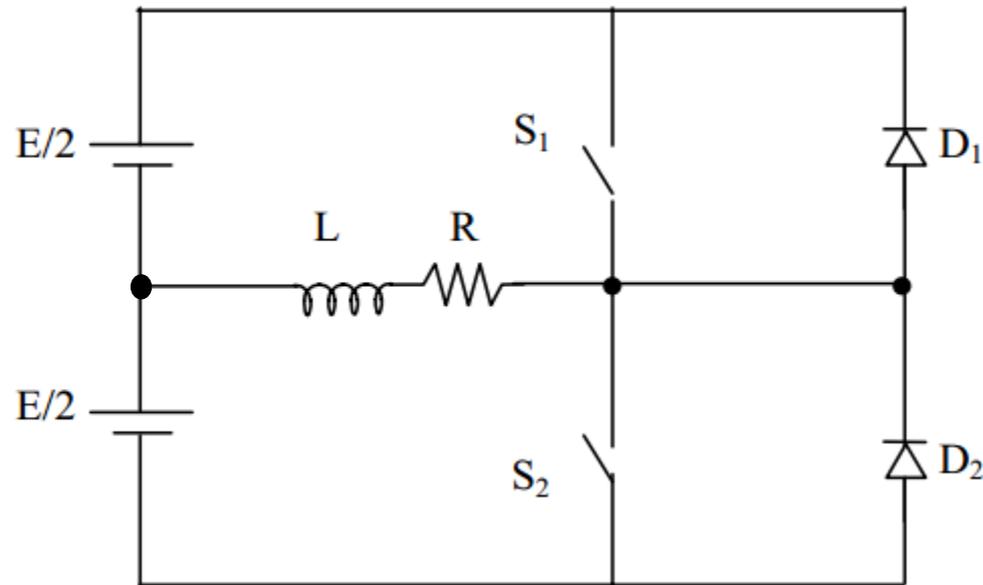
### Formas de onda



Para o seu funcionamento correto, é necessário que a fonte Vdc seja reversível em corrente, para os casos em que a carga é indutiva.

## (b) Inversor monofásico com ponto médio (semiponte)

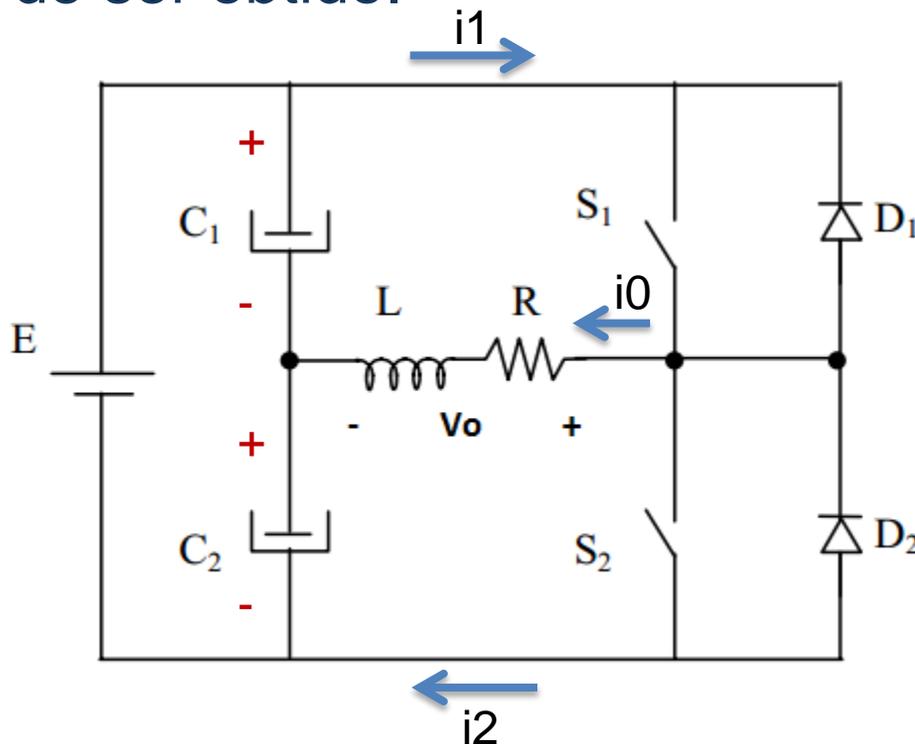
Emprega apenas um braço, sendo mais simples de se comandar que o inversor em ponte.



O funcionamento é semelhante ao circuito anterior. Entretanto, a forma de onda quadrada da tensão na carga terá amplitude  $E/2$ .

## Inversor monofásico com ponto médio capacitivo

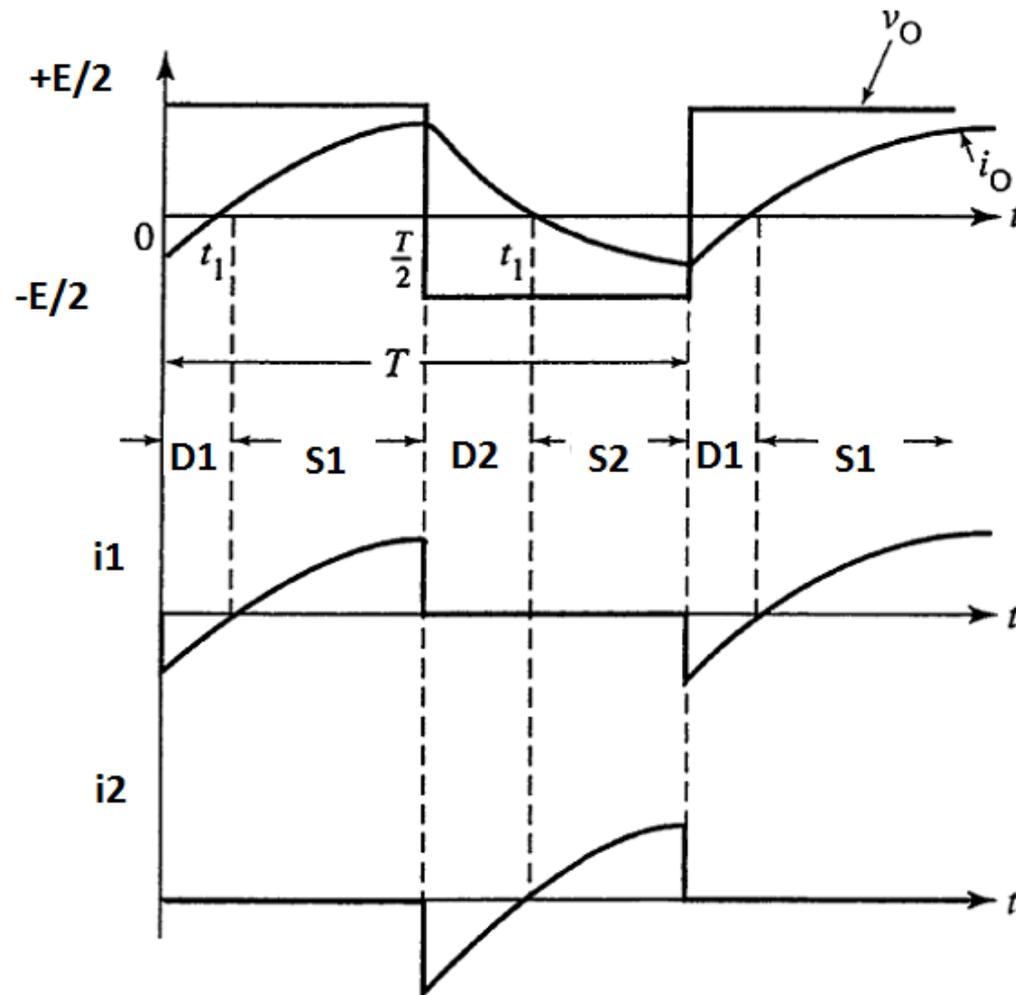
Para baixas potências e frequências elevadas pode ser utilizada a estrutura abaixo. O ponto médio é obtido por meio de um divisor capacitivo, que é muito mais fácil de ser obtido.



Chaves	$V_o$
$S_1$ (on), $S_2$ (off)	$+E/2$
$S_1$ (off), $S_2$ (on)	$-E/2$

# Inversor monofásico com ponto médio capacitivo

## Formas de onda



# Inversor monofásico com ponto médio capacitivo

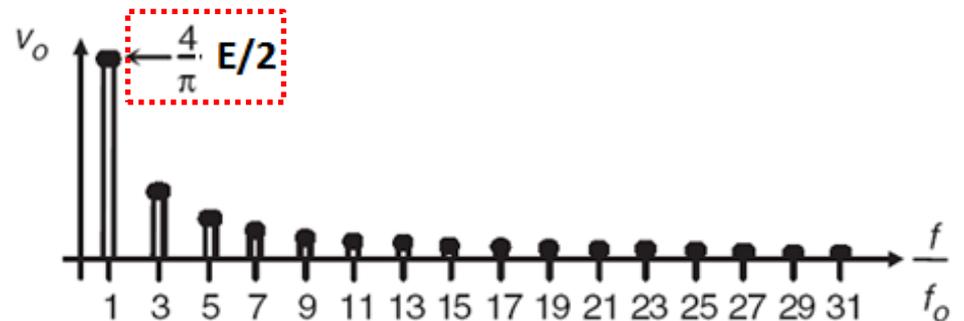
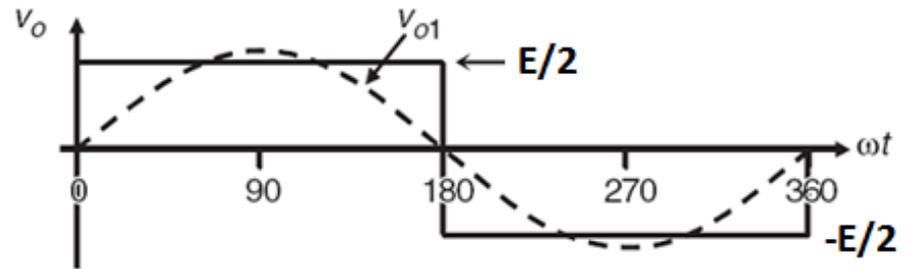
## Componentes Harmônicos

Na frequência fundamental

$$(\hat{V}_o)_1 = \frac{4E}{\pi} = 1,273 \frac{E}{2}$$

Nas frequências harmônicas de ordem ímpar

$$\hat{V}_{oh} = \frac{(\hat{V}_o)_1}{h}$$



## Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

O acionamento dos inversores também pode ser realizado a traves da modulação por largura de pulsos senoidal.

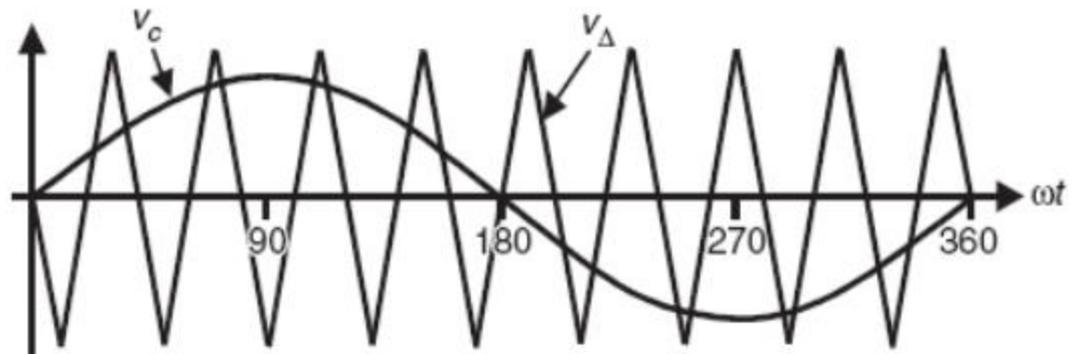
Define-se:

- Sinal de portadora triangular ( $V_{\Delta}$ )

$\hat{V}_{\Delta}$  → valor pico  
 $f_{\Delta}$  → frequência

- Sinal modulante senoidal ( $V_c$ )

$\hat{V}_c$  → valor pico  
 $f_c$  → frequência



Índice de modulação de amplitude

$$m_a = \frac{\hat{v}_c}{\hat{v}_{\Delta}}$$

Índice de modulação de frequência

$$m_f = \frac{f_{\Delta}}{f_c}$$

## Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

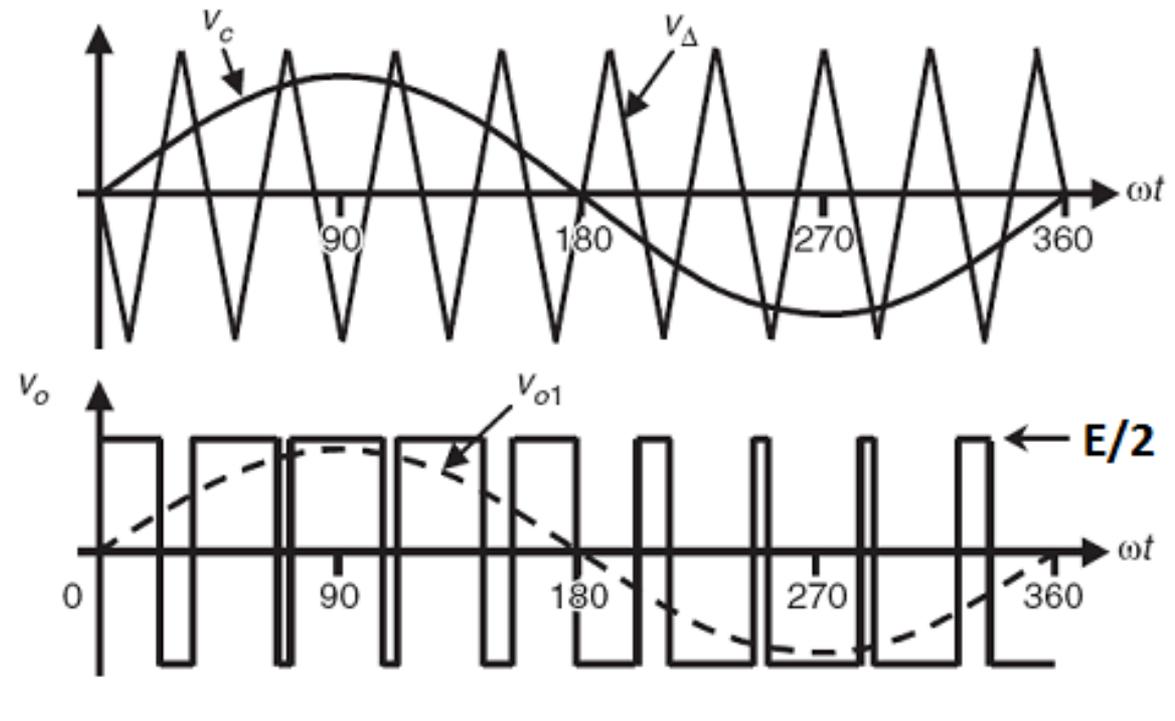
### Sinal modulado

Se  $V_c > V_\Delta$

S1 → on

S2 → off

$V_o \rightarrow E/2$



Se  $V_c < V_\Delta$

S1 → off

S2 → on

$V_o \rightarrow -E/2$

## Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

### Componentes harmônicos

- A amplitude da componente fundamental na região de modulação linear ( $m_a \leq 1$ ) é:

$$\hat{V}_{o1} = \frac{E}{2} m_a$$

- Os demais componentes são de ordem par/impar, dependem de  $m_a$  e  $m_f$  e estão centrados em múltiplos de  $m_f$ .

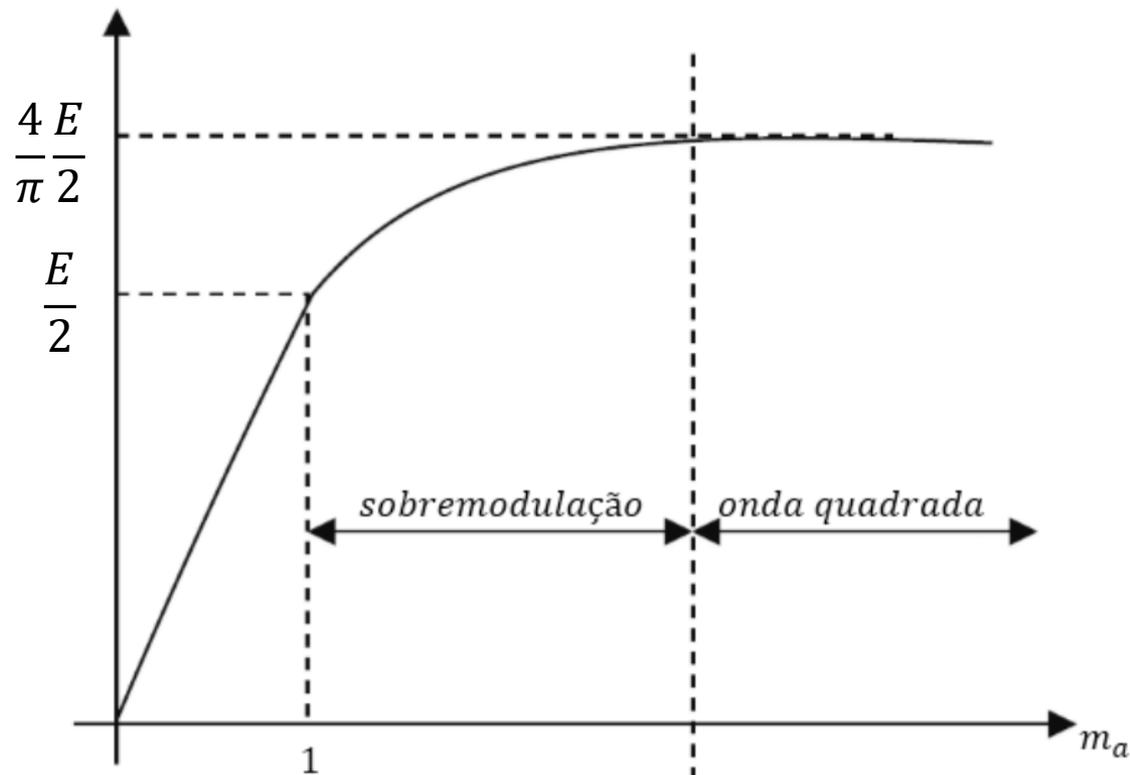
$$h = b * m_f \pm k$$

Para valores impar de  $b$  as harmônicas existem unicamente para valores par de  $k$ .

Para valores par de  $b$  as harmônicas existem unicamente para valores impar de  $k$ .

# Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

Amplitude do primeiro harmônico (fundamental)



# Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

$$E=400V$$

$$m_a = 1$$

$$f_{\Delta} = 1080 \text{ Hz}$$

$$f_c = 60\text{Hz}$$

$$m_f = 18$$

$$h = b * m_f \pm k$$

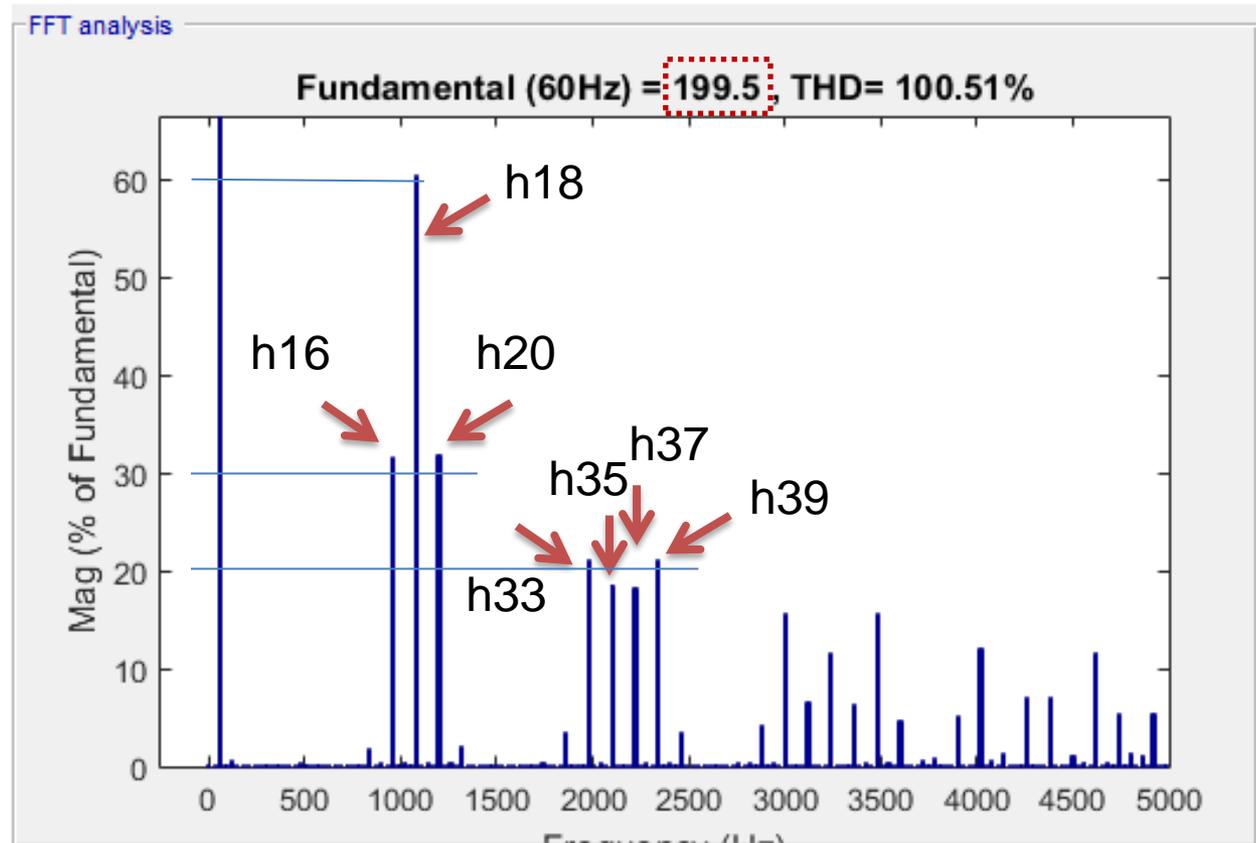
Para  $b=1 \rightarrow k = 0; 2; \dots$

$$h = 16; 18; 20$$

Para  $b=2 \rightarrow k = 1; 3; \dots$

$$h = 33; 35; 37; 39$$

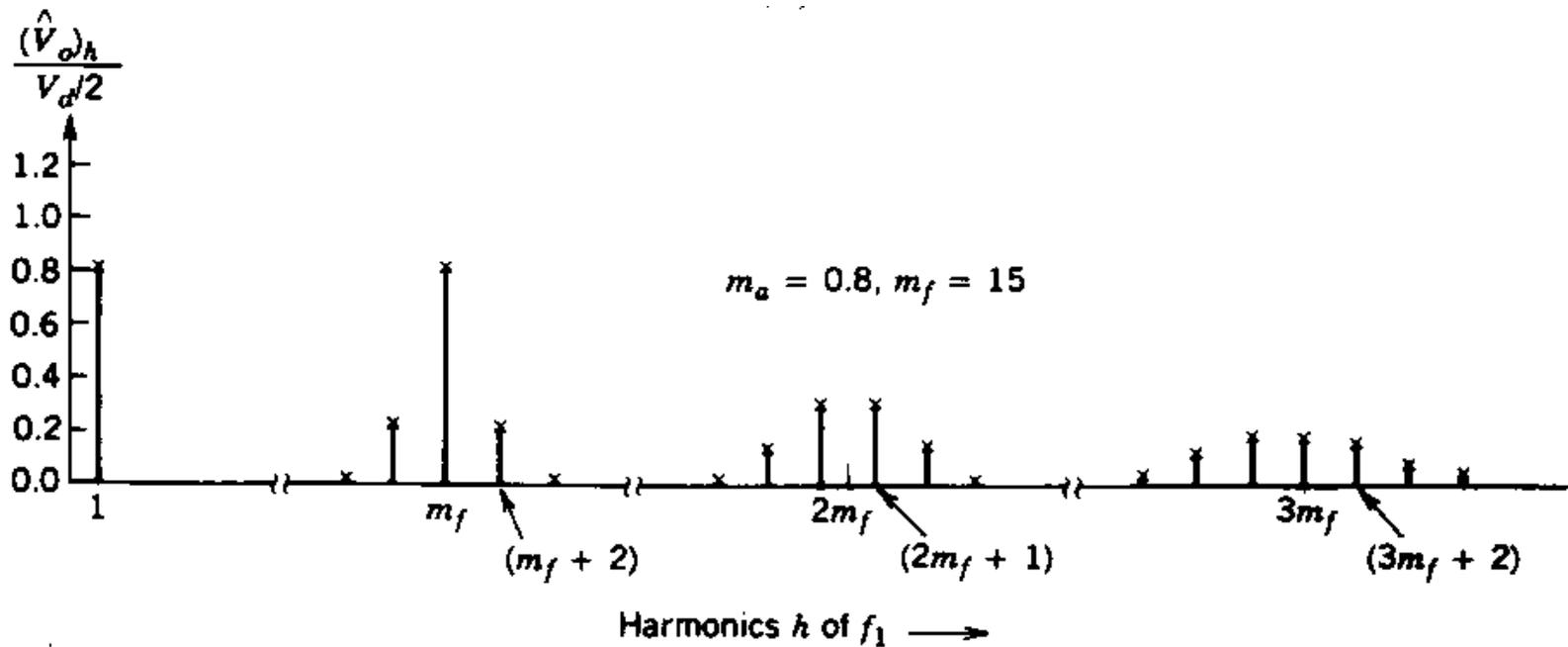
$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (V_{s(h)rms})^2}}{V_{s1rms}}$$



Frequência (Hz)

# Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

## Componentes harmônicos



## Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

O cálculo da amplitude dos componentes harmônicos pode ser realizado a partir da tabela.

O valor pico do harmônico de ordem  $h$  é definido por:

$$\widehat{V}_{o_h} = \frac{E}{2} \times \alpha$$

Sendo  $\alpha$  o valor retirado da tabela.

$h$	$m_a$				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
<i>Fundamental</i>					
$m_f$	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3m_f \pm 6$				0.016	0.044
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050

## Inversor monofásico com ponto médio capacitivo - SPWM

**Exemplo:** encontre o valor eficaz dos componentes harmônicos dominantes na saída de um inversor monofásico com ponto médio com as seguintes características:

$$E=300V, m_a = 0,8 \text{ e } m_f = 39.$$

**Resolução:**

Para calcular o valor eficaz, tem-se:

$$V_{O_{h(rms)}} = \frac{E}{2\sqrt{2}} \times \alpha$$

$$V_{O_{1(rms)}} = 106,07 \times 0,8 = 84,86 \text{ V}$$

$$V_{O_{37(rms)}} = 106,07 \times 0,22 = 23,33 \text{ V}$$

$$V_{O_{39(rms)}} = 106,07 \times 0,818 = 86,76 \text{ V}$$

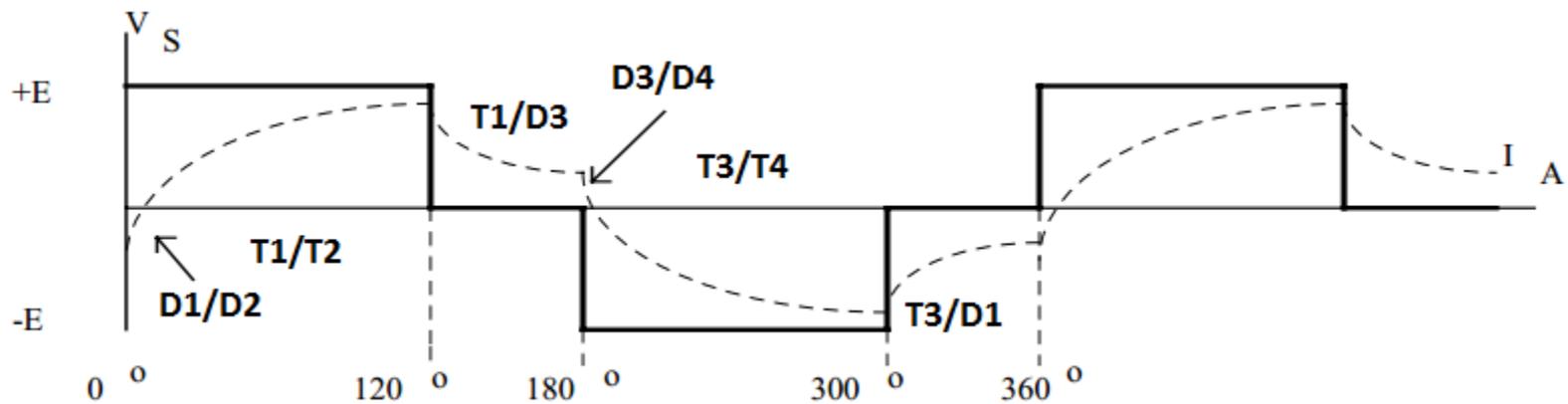
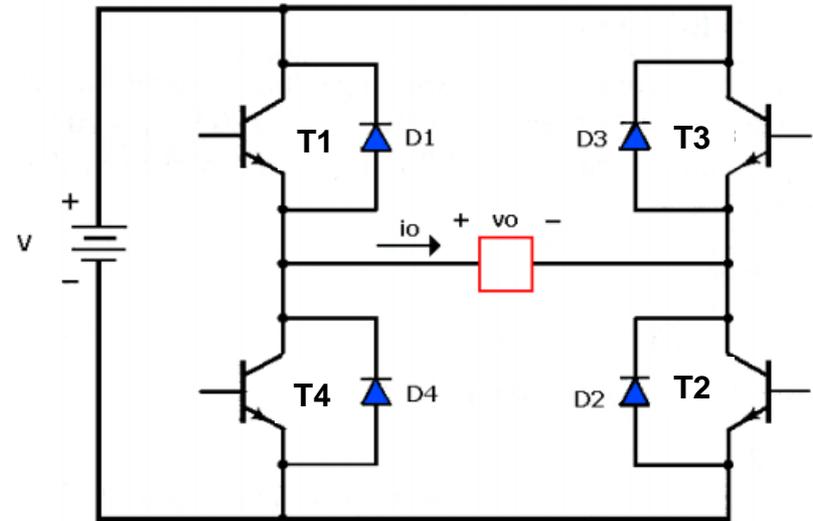
$$V_{O_{41(rms)}} = 106,07 \times 0,22 = 23,33 \text{ V}$$

$$V_{O_{77(rms)}} = 106,07 \times 0,314 = 33,31 \text{ V}$$

$$V_{O_{79(rms)}} = 106,07 \times 0,314 = 33,31 \text{ V}$$

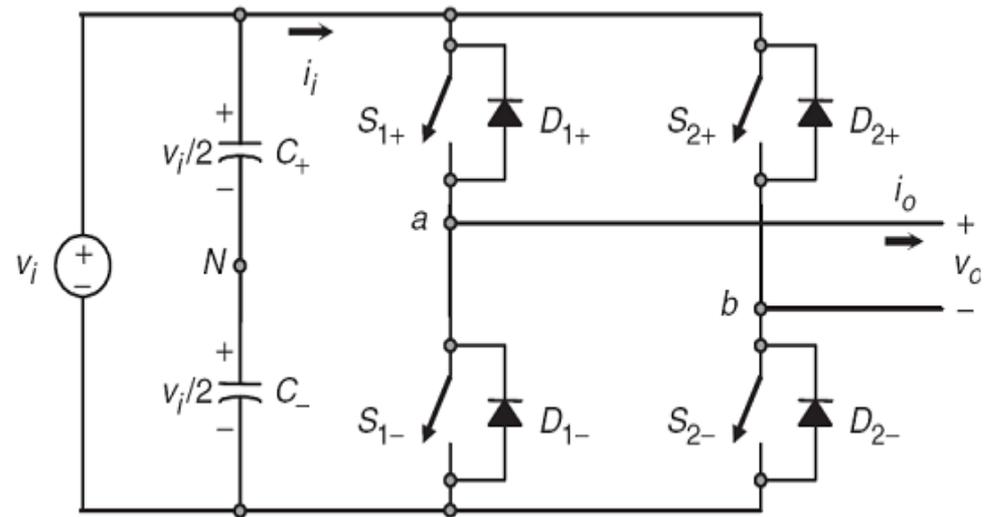
## Inversor em ponte com saída quase-quadrada

Uma alternativa que permite ajustar o valor eficaz da tensão de saída e eliminar algumas harmônicas é a chamada onda quase-quadrada.



# Inversor Monofásico em Ponte Completa

- Pode operar no **modo bipolar** ou seja, com  $V_o$  alternando entre valores positivos e negativos (assim como o VSI em meia ponte).
- E também no **modo unipolar**, gerando uma sequência de pulsos de mesma polaridade.



# Inversor Monofásico em Ponte Completa

## Funcionamento

State	State #	$v_{aN}$	$v_{bN}$	$v_o$
$S_{1+}$ and $S_{2-}$ are on and $S_{1-}$ and $S_{2+}$ are off	1	$v_i/2$	$-v_i/2$	$v_i$
$S_{1-}$ and $S_{2+}$ are on and $S_{1+}$ and $S_{2-}$ are off	2	$-v_i/2$	$v_i/2$	$-v_i$
$S_{1+}$ and $S_{2+}$ are on and $S_{1-}$ and $S_{2-}$ are off	3	$v_i/2$	$v_i/2$	0
$S_{1-}$ and $S_{2-}$ are on and $S_{1+}$ and $S_{2+}$ are off	4	$-v_i/2$	$-v_i/2$	0
$S_{1-}$ , $S_{2-}$ , $S_{1+}$ , and $S_{2+}$ are all off	5	$-v_i/2$ $v_i/2$	$v_i/2$ $-v_i/2$	$v_i$ $-v_i$

## Inversor Monofásico em Ponte Completa – PWM Bipolar

### Funcionamento

Os estados 1 e 2 são utilizados para gerar uma sequência de pulsos alternados na tensão de saída

Opera de modo semelhante ao VSI monofásico em meia ponte, porém a amplitude da tensão de saída é duas vezes maior.

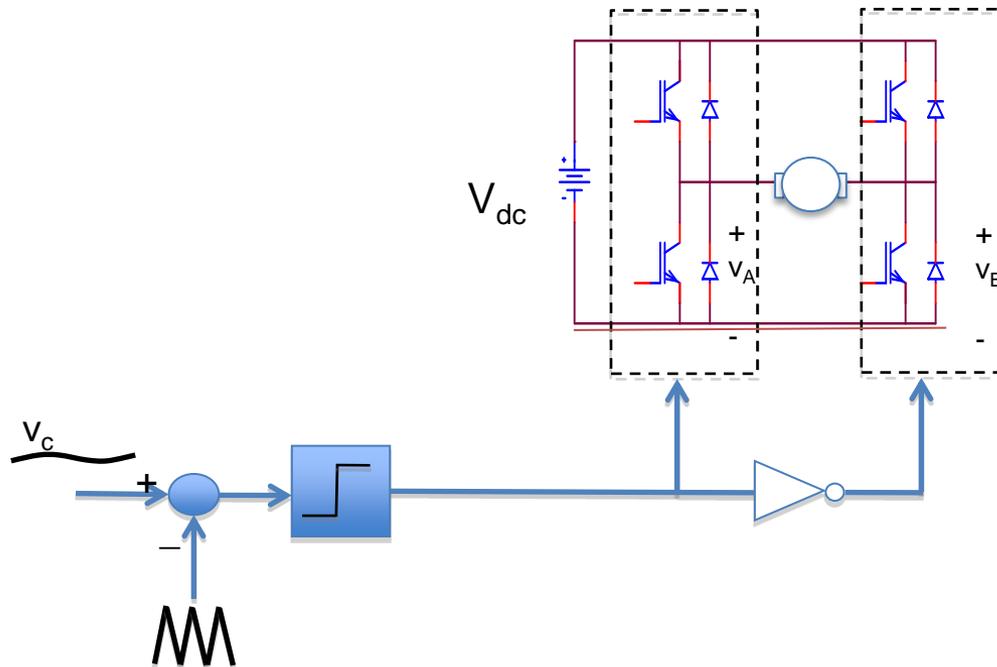
A amplitude do componente na frequência fundamental é:  $\hat{V}_{O_1} = m_a V_i$

A amplitude dos demais componentes pode ser estimada a partir da tabela do slide 18 e usando:

$$\hat{V}_{O_h} = V_i \times \alpha$$

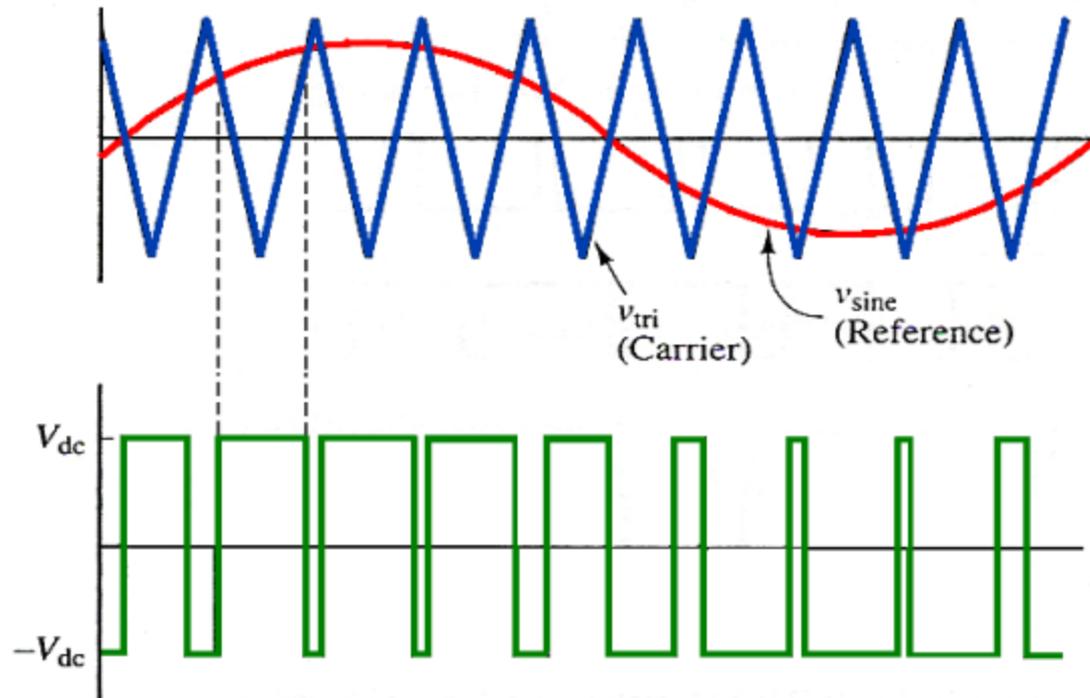
# Inversor Monofásico em Ponte Completa – PWM Bipolar

## PWM Bipolar



# Inversor Monofásico em Ponte Completa – PWM Bipolar

## Formas de onda PWM Bipolar

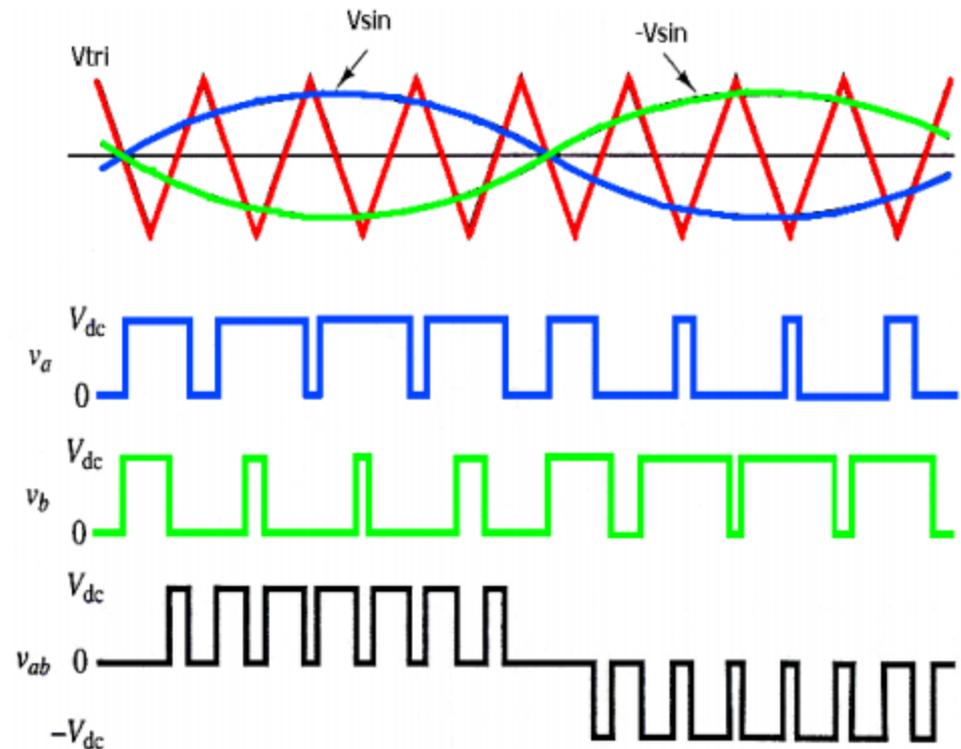


# Inversor Monofásico em Ponte Completa – PWM Unipolar

## Funcionamento

Pode-se considerar que as chaves são controladas por dois sinais modulantes  $V_c$  e  $-V_c$ .

A saída pode assumir três valores:  $v_i$ ,  $-v_i$  e 0.



## Inversor Monofásico em Ponte Completa – PWM Unipolar

### Componentes harmônicos

A amplitude do componente fundamental na região de modulação linear ( $m_a \leq 1$ ) é dada por:

$$\widehat{V}_{O_1} = m_a V_i$$

Os demais componentes são de ordem ímpar, dependem de  $m_a$  e  $m_f$  e estão centrados em múltiplos de  $2m_f$ :

$$h = b * (2m_f) \pm k$$

$$b = 1, 2, 3, \dots$$

$$k = 1, 3, 5, \dots$$

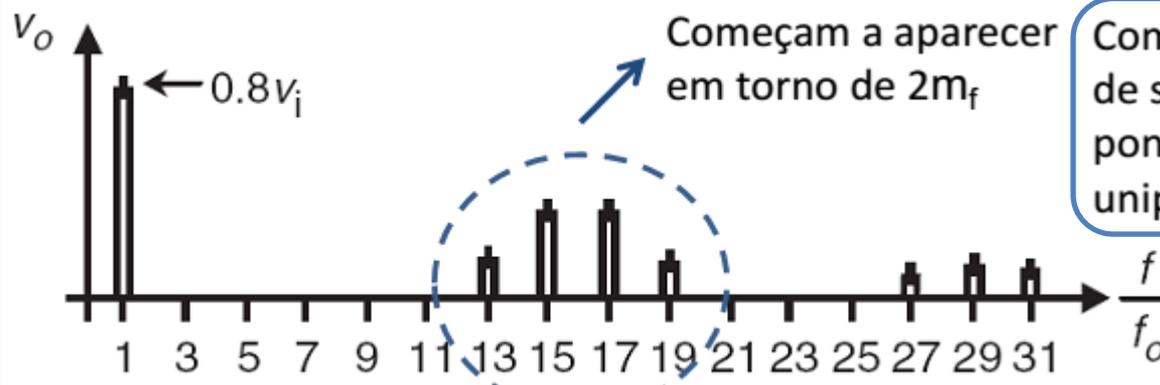
A amplitude dos demais componentes pode ser estimada a partir da tabela do slide 18 utilizando a expressão:

$$\widehat{V}_{O_h} = V_i \times \alpha$$

## Comparação – PWM Bipolar e PWM Unipolar

A principal vantagem do PWM Unipolar é produzir sinais com componentes harmônicos de ordem mais alta, facilitando o processo de filtragem.

O sistema de controle para o PWM Unipolar é um pouco mais complexo, pois cada ramo do conversor é acionado a partir de uma tensão senoidal modulante ( $V_c$  ou  $-V_c$ ).



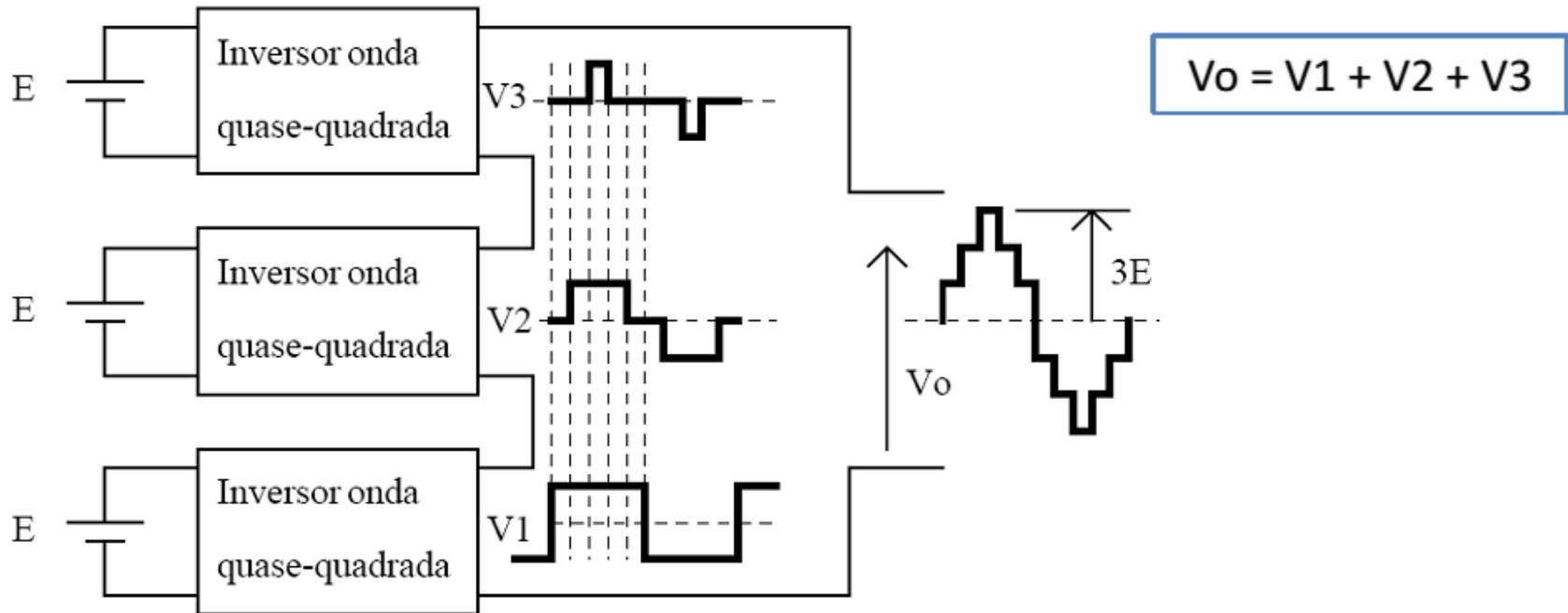
Componentes harmônicos da tensão de saída de um VSI monofásico em ponte completa operando por PWM unipolar com  $m_a = 0,8$  e  $m_f = 8$ .

## Inversor de Múltiplos Níveis

Diversos VSI são conectados em série para produzir um sinal de diversos níveis que se aproxima de uma onda senoidal

A distorção harmônica diminui.

Aumenta a complexidade do sistema de controle (que deve ajustar o ciclo de trabalho e a defasagem entre os diversos módulos inversores).

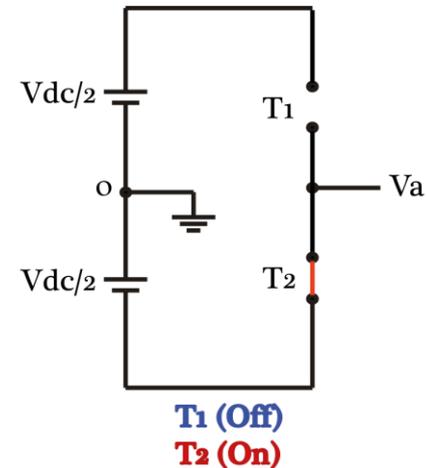
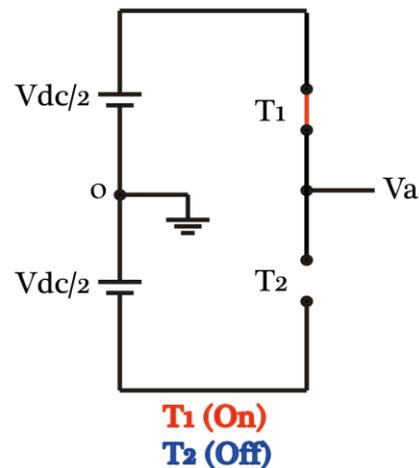
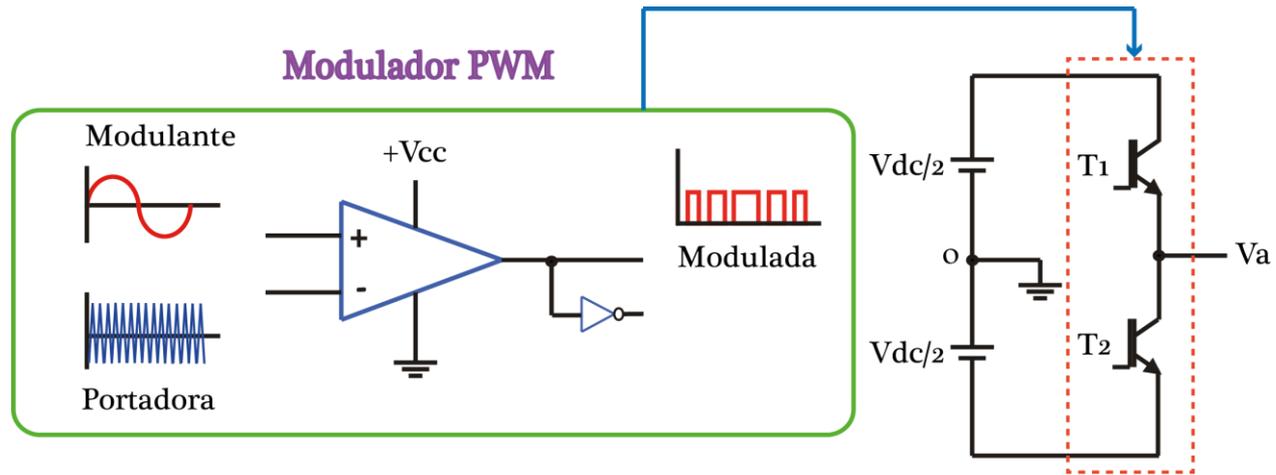


*Técnicas de Modulação por Largura de Pulsos  
(PWM)*

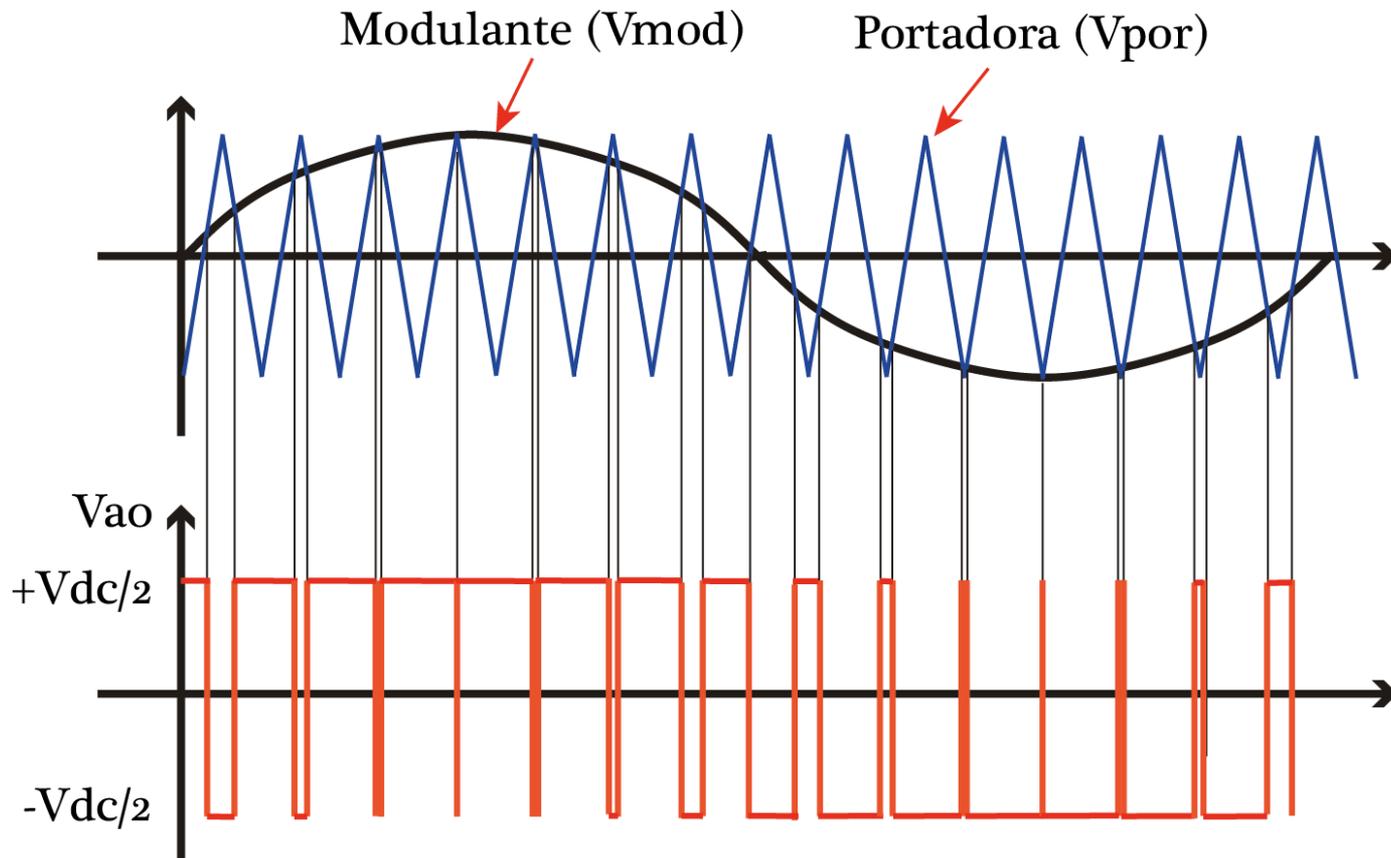
# Modulação por Largura de Pulsos (PWM)

- **Objetivos do PWM**
  - Controlar a tensão de saída do inversor.
  - Reduzir a quantidade de harmônicos.
- **Desvantagens do PWM**
  - Aumento das perdas por chaveamento devido às altas frequências de chaveamento.
  - Redução da tensão disponível.
  - Problemas de compatibilidade eletromagnética (EMC) devido as harmônicas de ordem elevada.

# Modulação PWM Senoidal (SPWM)



# Modulação PWM Senoidal



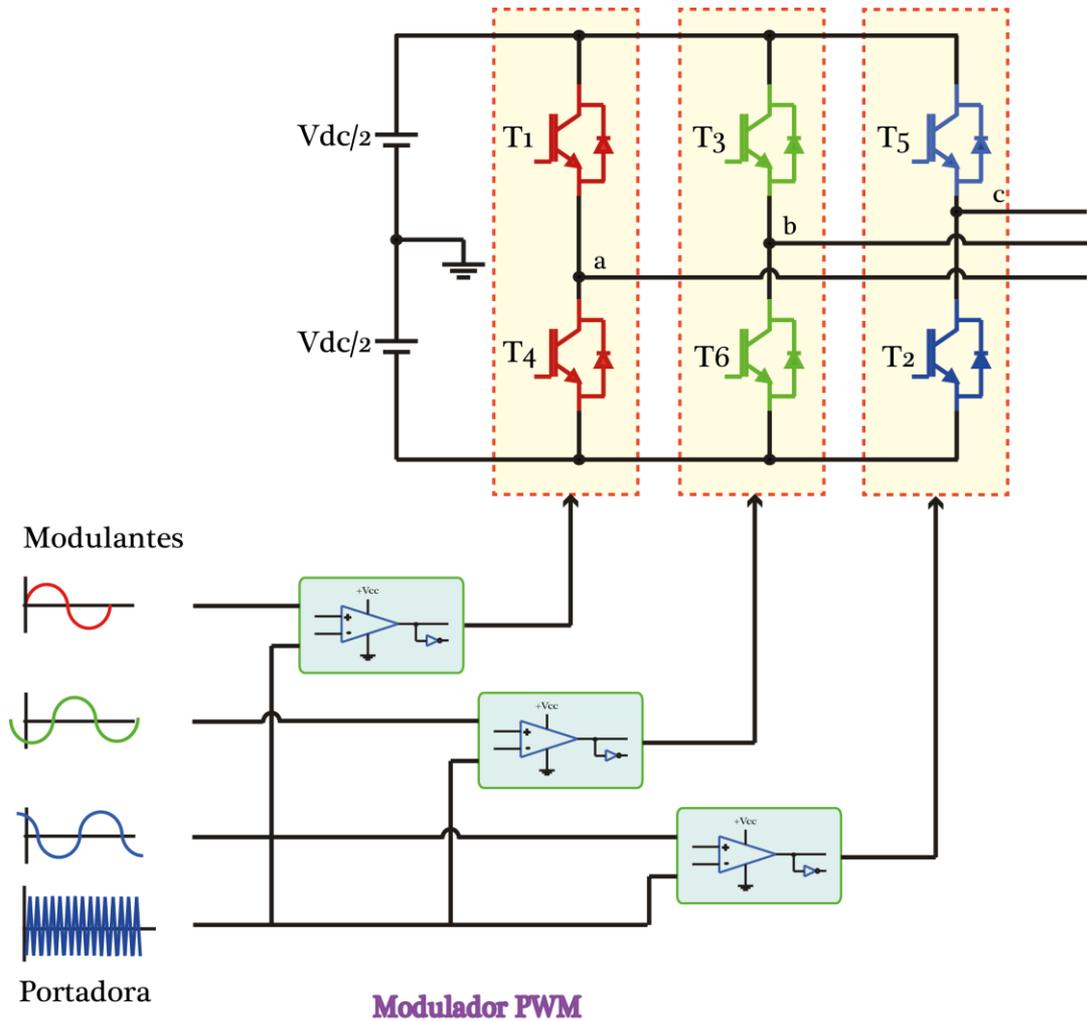
# Modulação PWM Senoidal

- Tensão de saída do inversor
  - Se  $V_{mod} > V_{por} \rightarrow V_{a0} = +V_{dc}/2$ ;
  - Se  $V_{mod} < V_{por} \rightarrow V_{a0} = -V_{dc}/2$ ;
- Controle da tensão de saída do inversor
  - A frequência da portadora define a frequência de chaveamento.
  - A amplitude é controlada com o valor pico da modulante.
  - A frequência da fundamental é determinada pela frequência da modulante.
- Índice de modulação (m)

$$m = \frac{V_{mod}}{V_{por}} = \frac{\text{Valor pico de } (V_{a0})_1}{V_{dc}/2}$$

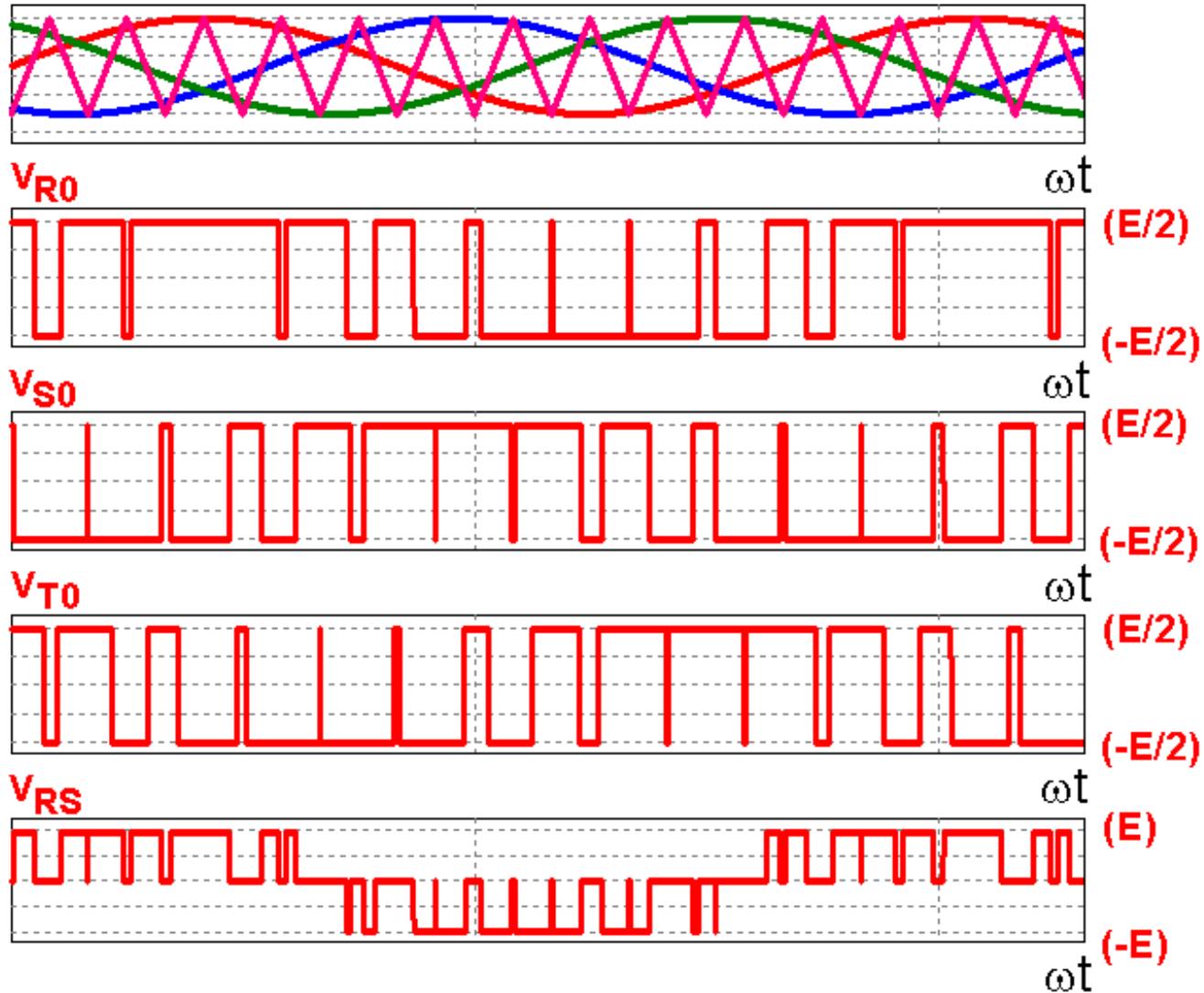
# Modulação PWM Senoidal

Inversor Trifásico



# Formas de Onda do Sinal PWM

FASE 1 FASE 2 FASE 3 TRIANGULAR



[6]

# Modulação PWM Senoidal

- Características

- Frequências

- A frequência da modulante ( $V_{\text{mod}}$ ) será a frequência da fundamental ( $f_1$ ).
    - A frequência da portadora ( $V_{\text{por}}$ ) será a frequência de chaveamento  $f_{\text{chav}}$  do inversor.

- Tensão de saída

- Se  $V_{\text{mod}} > V_{\text{por}} \rightarrow V_{a0} = +V_{\text{dc}}/2$
    - Se  $V_{\text{mod}} < V_{\text{por}} \rightarrow V_{a0} = -V_{\text{dc}}/2$
  - $V_{ab} = V_{a0} - V_{b0}$
    - $V_{bc} = V_{b0} - V_{c0}$
    - $V_{ca} = V_{c0} - V_{a0}$

# Modulação PWM Senoidal

- Índice de modulação de amplitude

$$m_a = \frac{\text{Valor pico de } V_{mod}}{\text{Amplitude de } V_{por}} = \frac{\text{Valor pico de } (V_{a0})_1}{V_{dc}/2}$$

sendo  $(V_{a0})_1$  a componente fundamental de  $V_{a0}$ .

- Índice de modulação de frequência

$$m_f = \frac{f_{chav}}{f_1}$$

- ❖  $m_f$  deve ser um numero inteiro impar

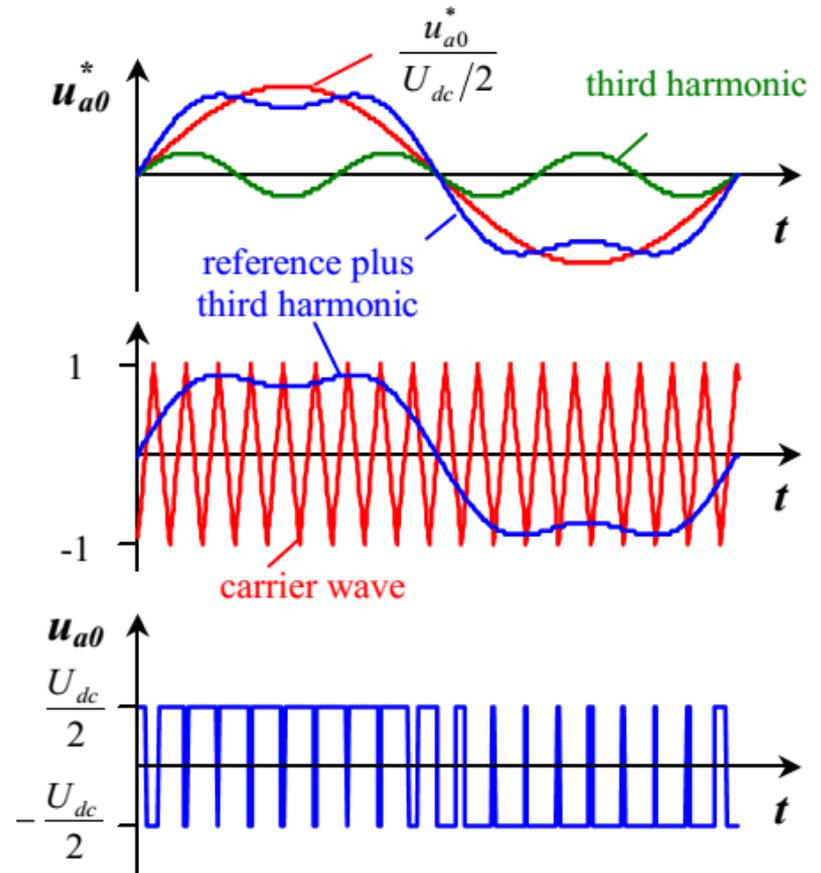
- Se  $m_f$  não é um inteiro, podem surgir subharmônicos na tensão de saída.
- Se  $m_f$  não é impar, pode existir uma componente CC e harmônicos pares na tensão de saída.

- ❖  $m_f$  deve ser um múltiplo de 3 em inversores trifásicos com PWM

- Os harmônicos de ordem impar múltiplos de 3 e os pares serão suprimidos.

# Modulação SPWM com injeção de Terceiro Harmônico

- A amplitude do SPWM pode ser incrementado com a injeção do terceiro harmônico no sinal de referencia.
- O mesmo sinal de terceira harmônica é somada para cada um dos três sinais de referência. Isto aumenta a tensão em cada uma das fases, porem não será refletido nos terminais do motor CA com ponto neutro isolado.



$$u_{ab} = u_{a0} - u_{b0} = (u_{a0} + u_{third}) - (u_{b0} + u_{third})$$

# Modulação SPWM + 3ra Harmônica

- Os múltiplos da terceira harmônica não distorcem o espectro da corrente e são sinais que podem ser também injetadas.

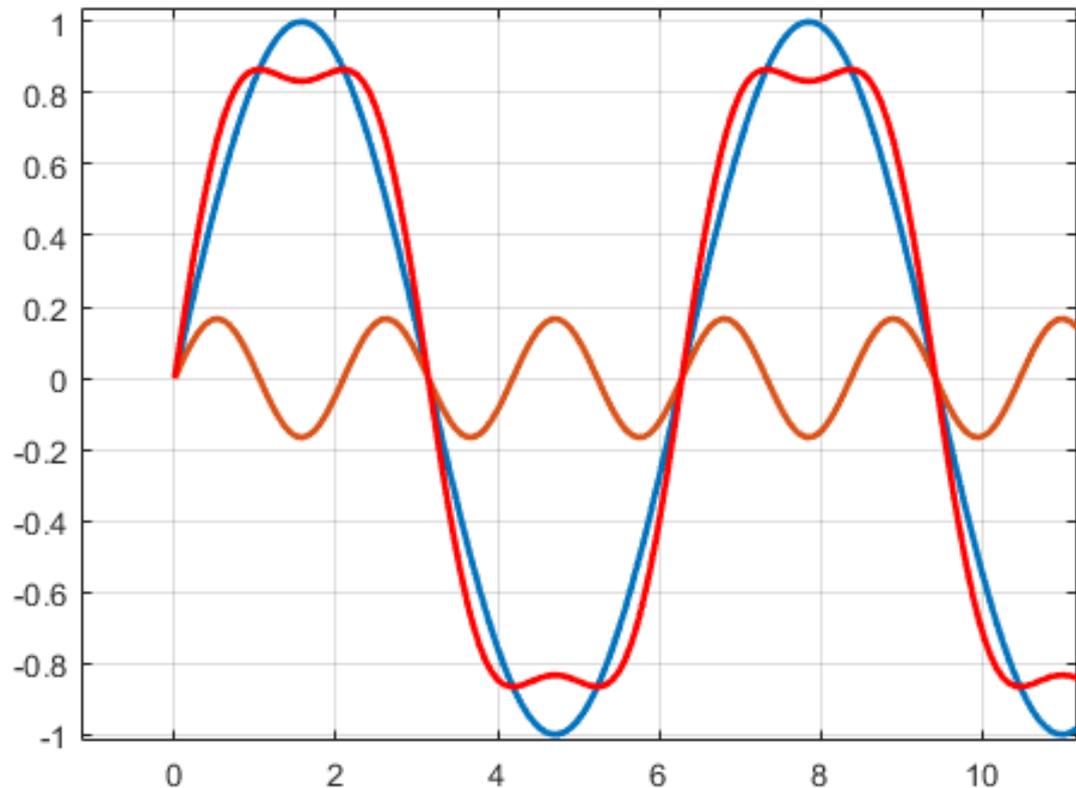
A geometrical calculation yields the maximum possible increase of the linear area with the harmonic amplitude being  $1/6$  of the reference voltage amplitude. Such an injection of a third harmonic results in a 15,5% higher maximum output voltage without overmodulation.

# Modulação SPWM + 3ra Harmônica

$$s1=1.\sin(\theta);$$

$$s2=(1/6)\sin(3\theta);$$

$$s3=s1+s2;$$

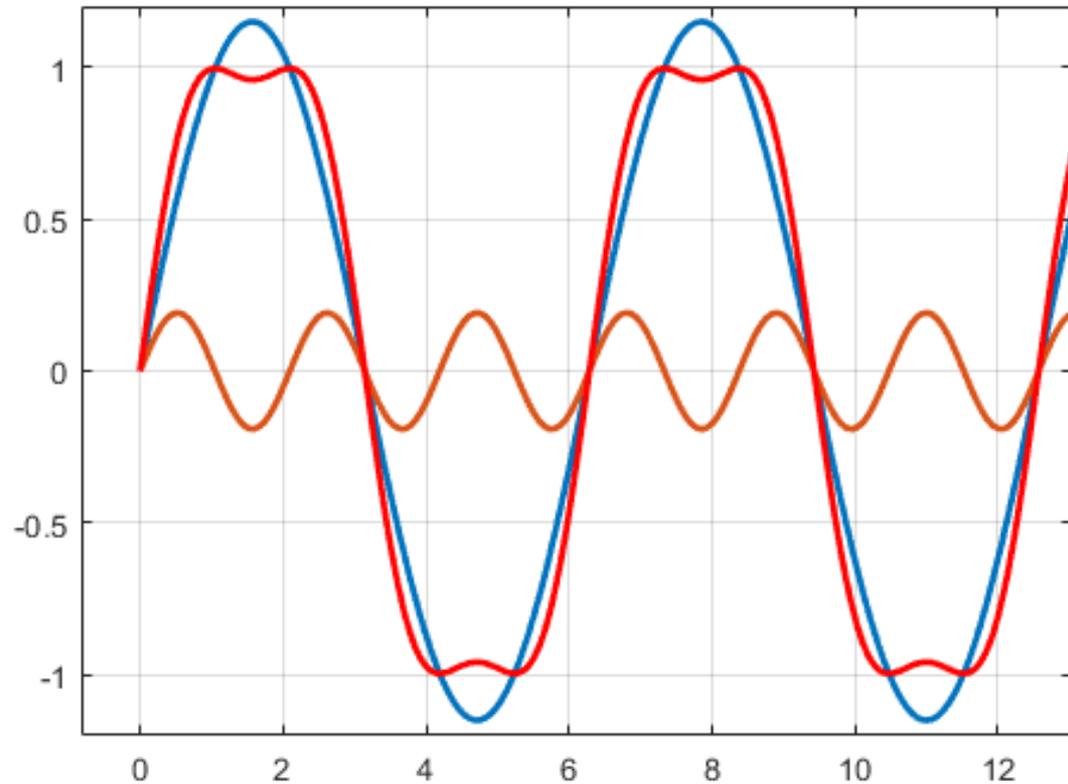


# Modulação SPWM + 3ra Harmônica

$$s1=1,15*\sin(\theta);$$

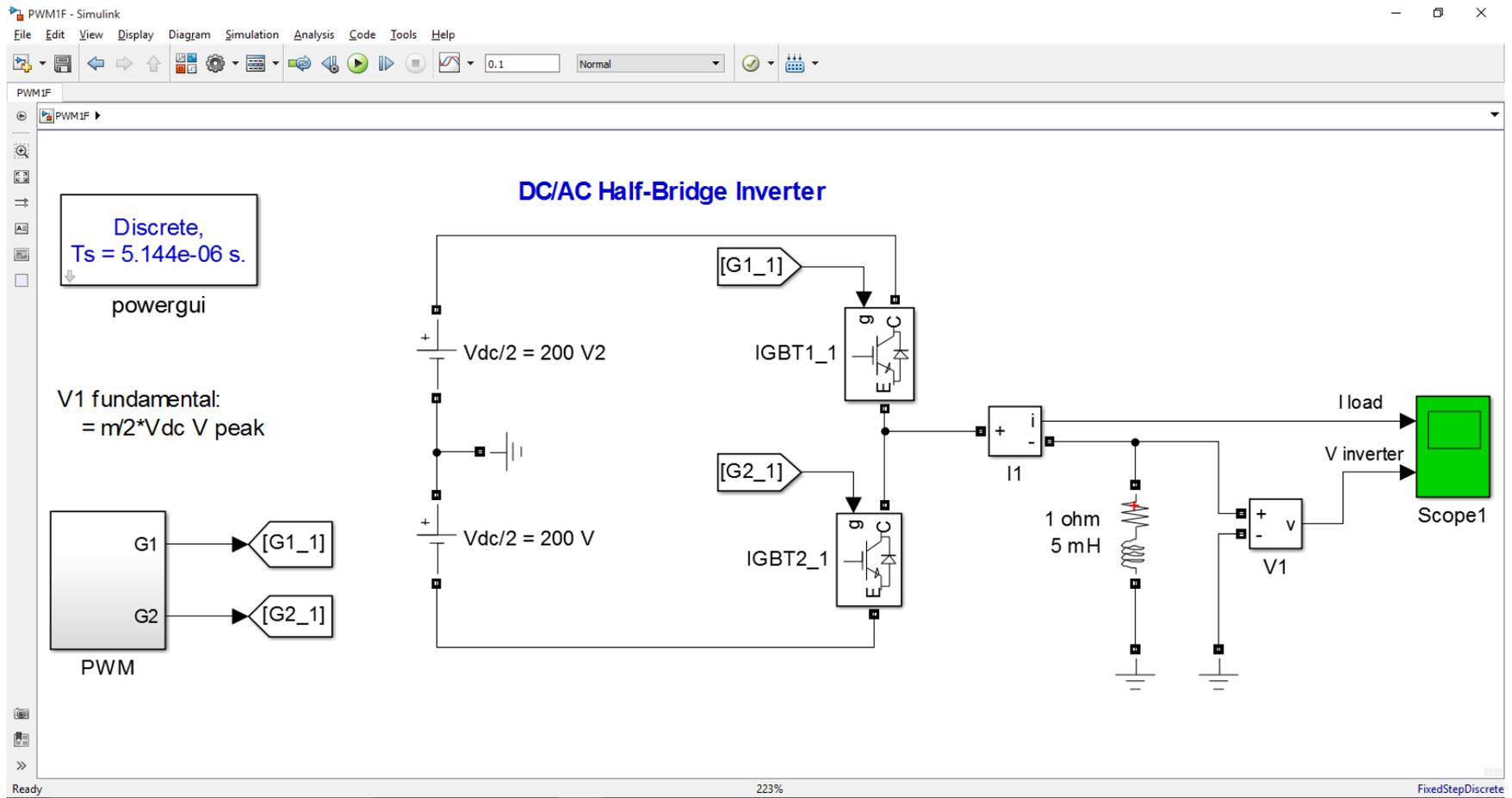
$$s2=(1/6)*1,15*\sin(3*\theta);$$

$$s3=s1+s2;$$



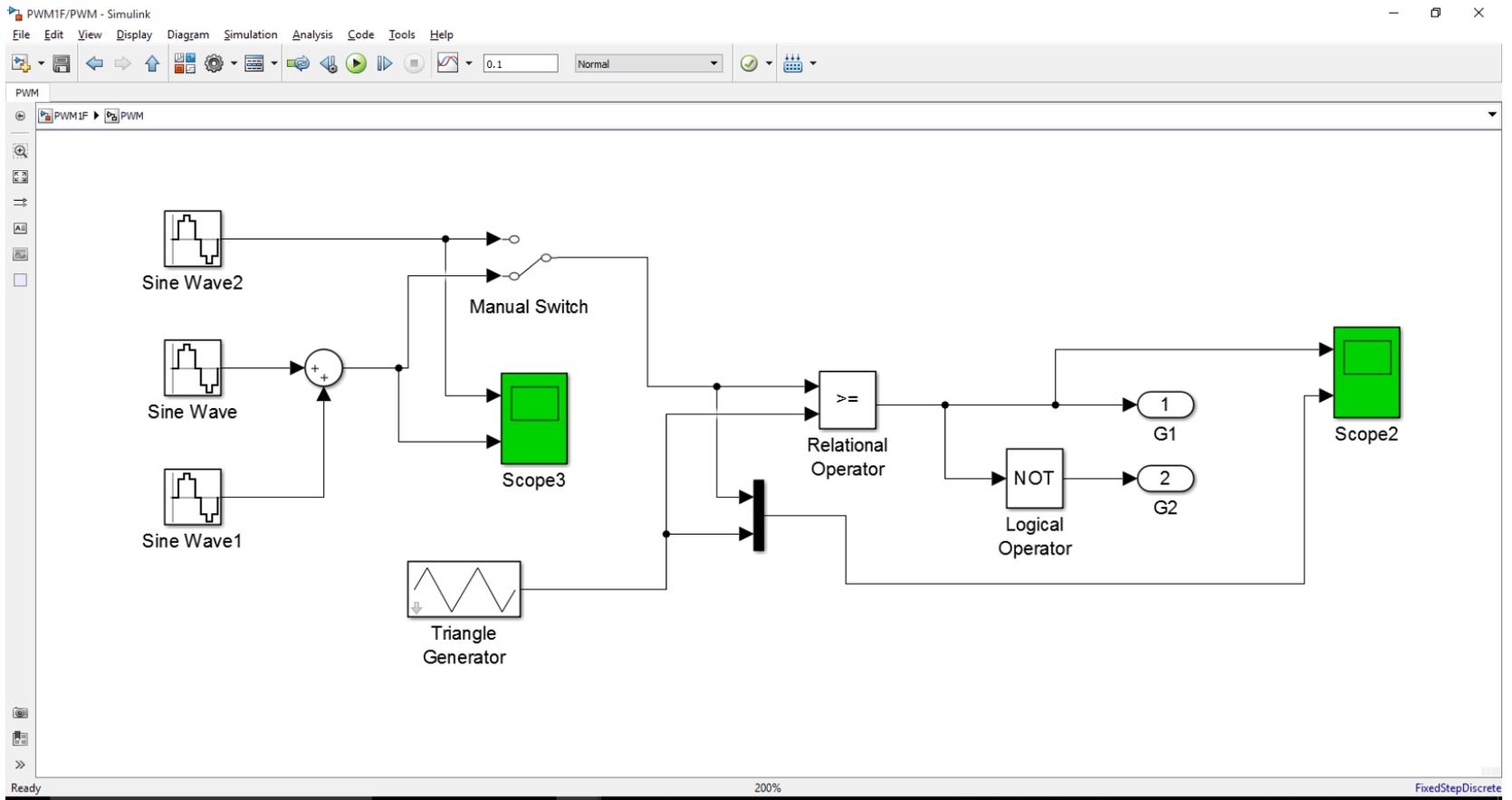
# Modulação SPWM + 3ra Harmônica

- Simulação – Inversor monofásico



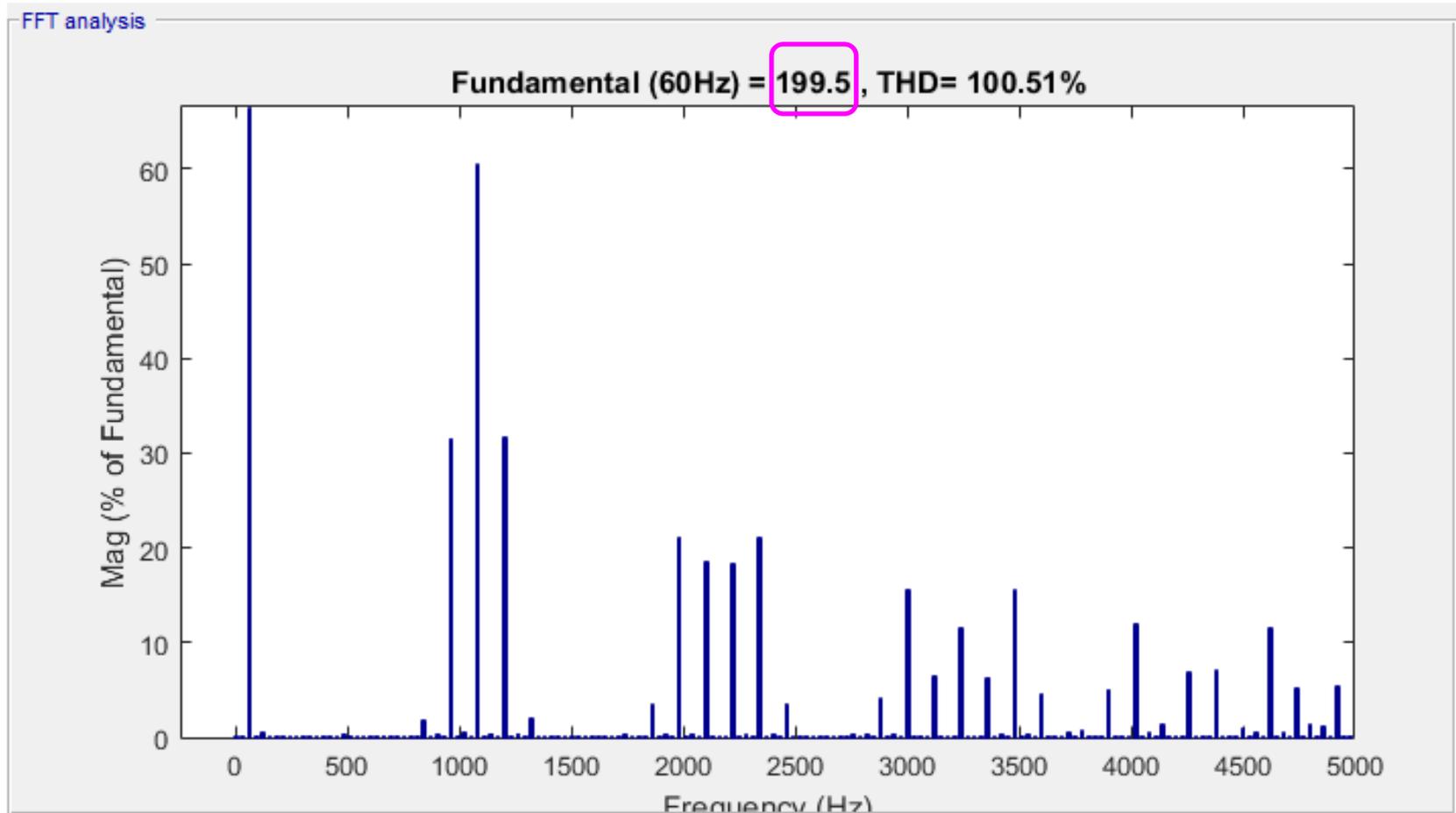
# Modulação SPWM + 3ra Harmônica

- Interior do Bloco PWM



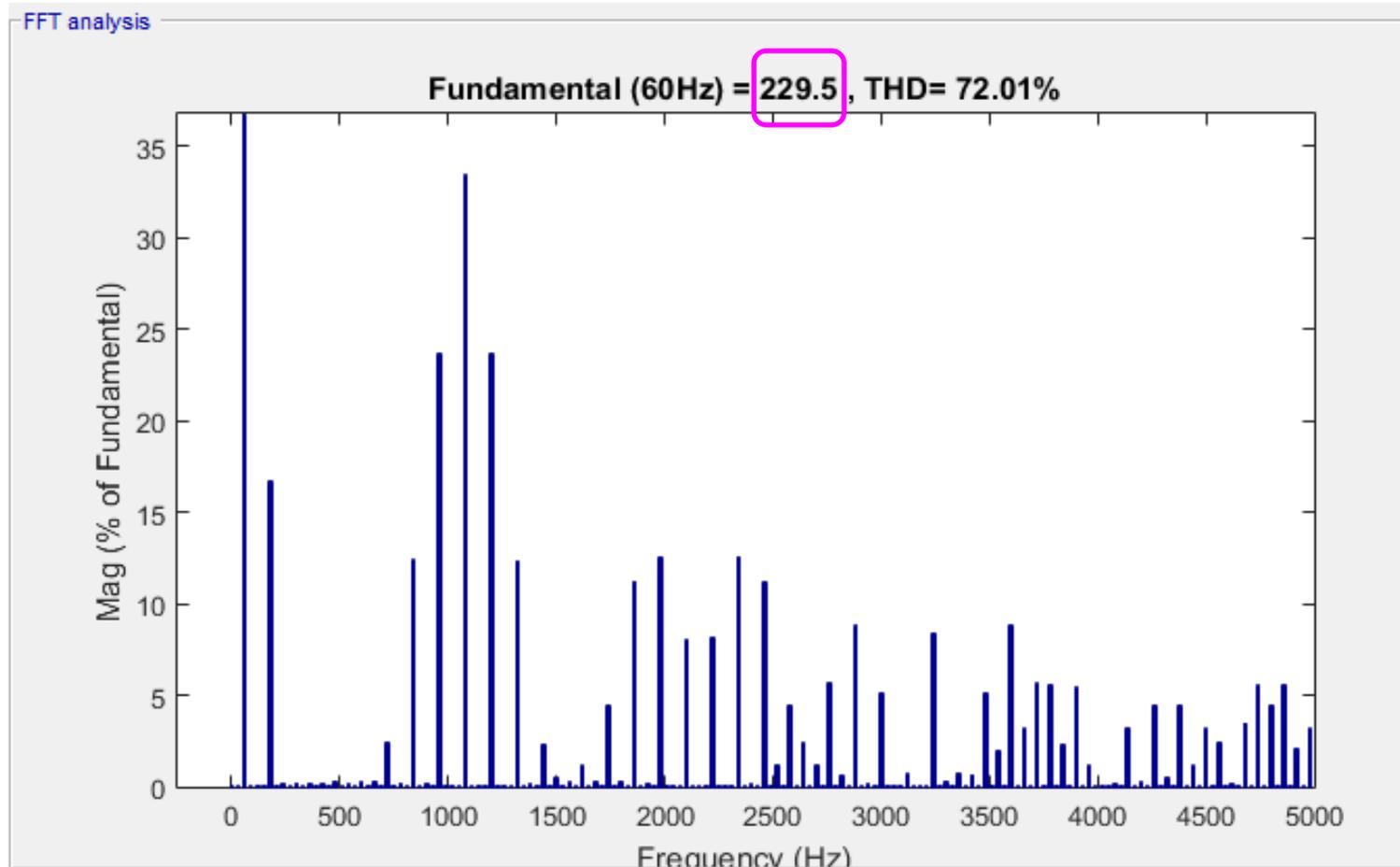
# Modulação SPWM + 3ra Harmônica

- FFT para PWM senoidal



# Modulação SPWM + 3ra Harmônica

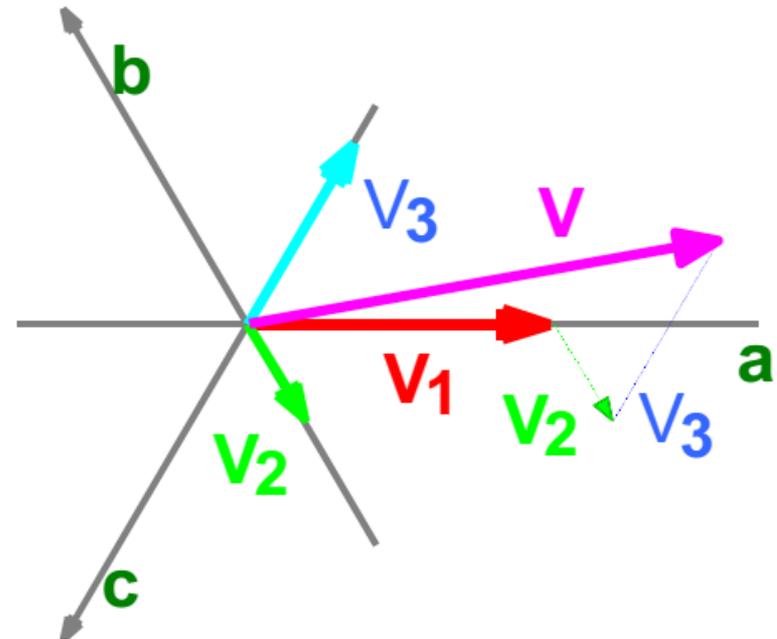
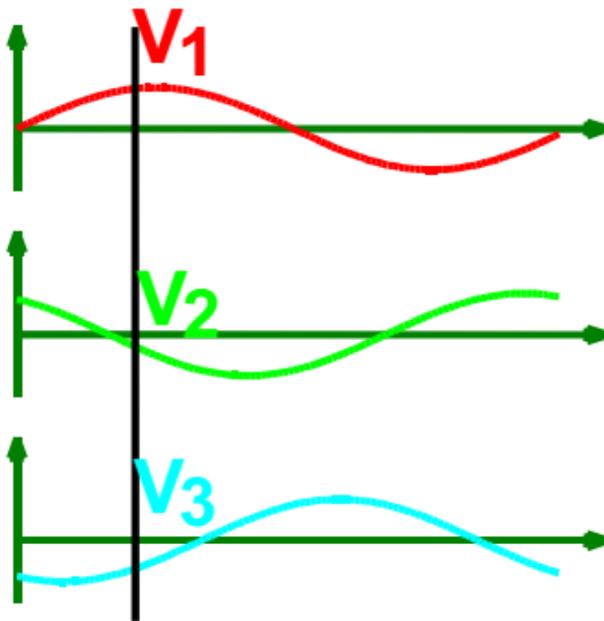
- FFT para PWM senoidal + 3ra harmônica



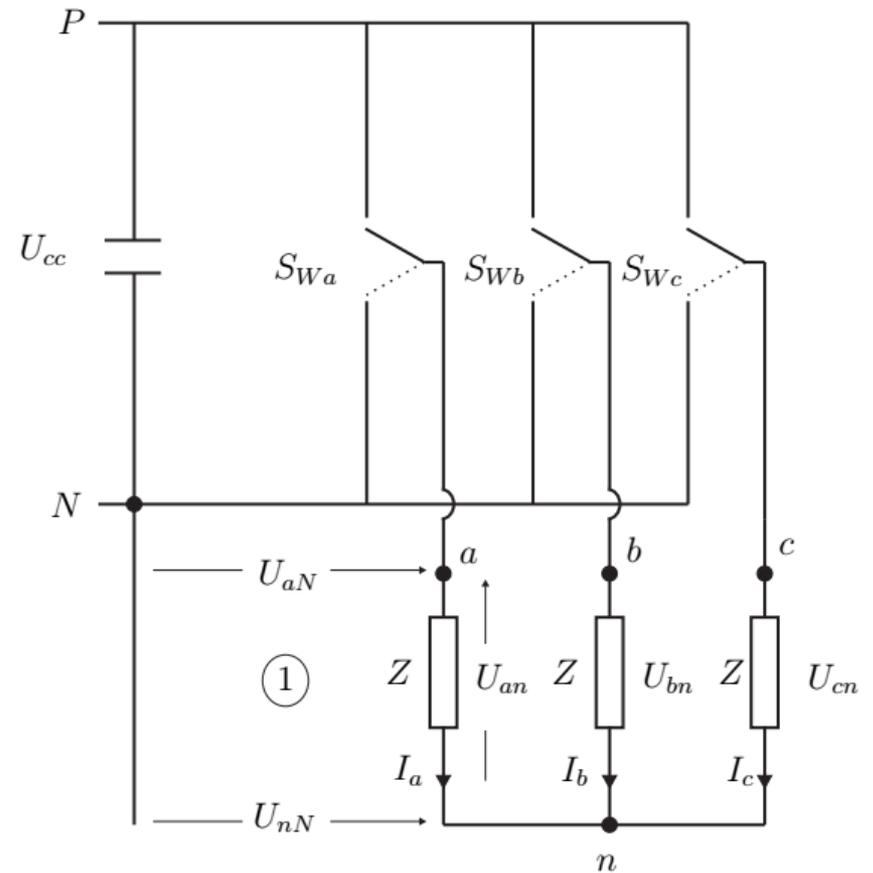
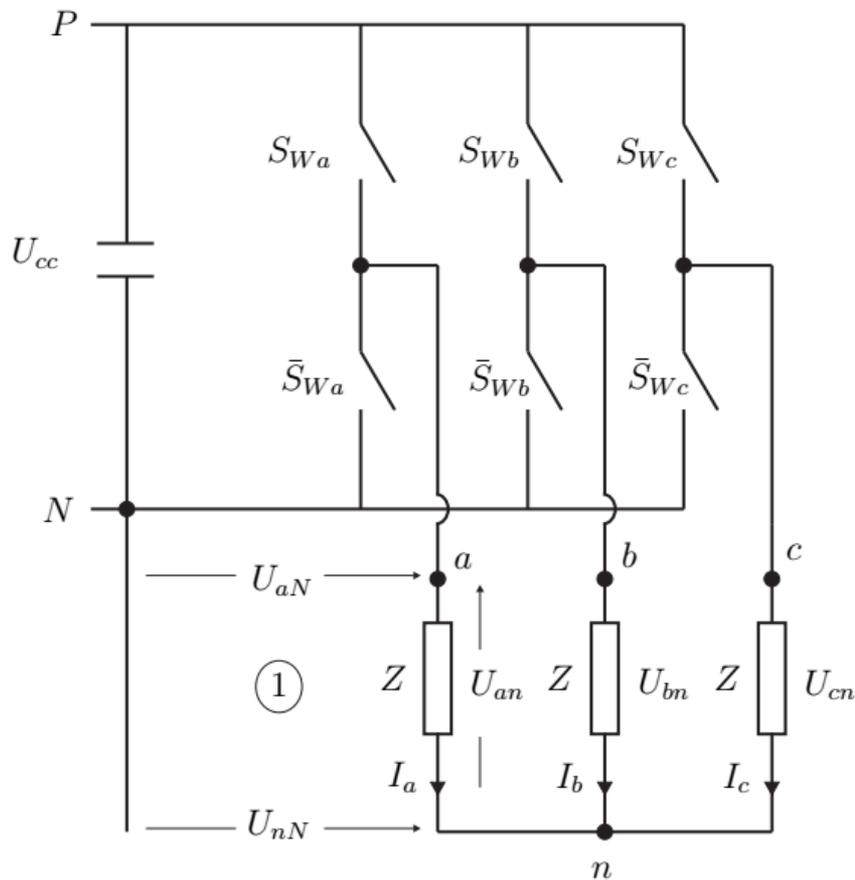
# *Modulação Vetorial*

# Modulação Vetorial

- Qualquer conjunto de três tensões pode ser representado por um vetor no plano definido por eixos **abc**, deslocados  $120^\circ$  um do outro. Normalmente a informação sobre o valor da tensão de neutro é perdida, pois se situaria no eixo ortogonal ao plano abc [3].



# Modulação Vetorial



Inversor trifásico com carga em configuração estrela

# Modulação Vetorial

Estado das chaves

$$S_{Wi} = \begin{cases} 1, & \text{a chave } S_{Wi} \text{ está ligada e a chave } \bar{S}_{Wi} \text{ está desligada} \\ 0, & \text{a chave } S_{Wi} \text{ está desligada e a chave } \bar{S}_{Wi} \text{ está ligada} \end{cases}$$

$i = a, b, c$

Vetores de chaveamento:

Vetor	$S_{Wa}$	$S_{Wb}$	$S_{Wc}$
$\vec{S}_0$	0	0	0
$\vec{S}_1$	1	0	0
$\vec{S}_2$	1	1	0
$\vec{S}_3$	0	1	0
$\vec{S}_4$	0	1	1
$\vec{S}_5$	0	0	1
$\vec{S}_6$	1	0	1
$\vec{S}_7$	1	1	1

## Modulação Vetorial

Então, tem-se:

$$U_{aN} = \begin{cases} U_{cc} & , \text{ para } S_{Wa} = 1 \\ 0 & , \text{ para } S_{Wa} = 0 \end{cases}$$

Portanto, pode-se afirmar que

$$\begin{aligned} U_{aN} &= S_{Wa} \cdot U_{cc} \\ U_{bN} &= S_{Wb} \cdot U_{cc} \\ U_{cN} &= S_{Wc} \cdot U_{cc} \end{aligned}$$

Da malha de tensão 1, tem-se:

$$U_{aN} = I_a \cdot Z + U_{nN}$$

Considerando uma carga balanceada (mesma impedância):

$$\begin{aligned} U_{bN} &= I_b \cdot Z + U_{nN} \\ U_{cN} &= I_c \cdot Z + U_{nN} \end{aligned}$$

Somando as três tensões:

$$U_{aN} + U_{bN} + U_{cN} = \underbrace{(I_a + I_b + I_c)}_{\text{Igual a zero} \rightarrow \text{Carga equilibrada}} \cdot Z + 3 \cdot U_{nN}$$

## Modulação Vetorial

Então: 
$$U_{aN} + U_{bN} + U_{cN} = 3 \cdot U_{nN}$$

$$U_{nN} = \frac{1}{3} (U_{aN} + U_{bN} + U_{cN})$$

Da malha de tensão 1, também tem-se:

$$U_{aN} = U_{an} + U_{nN}$$

$$U_{an} = U_{aN} - U_{nN}$$

$$U_{an} = U_{aN} - \left[ \frac{1}{3} (U_{aN} + U_{bN} + U_{cN}) \right]$$

$$U_{an} = \frac{2}{3} U_{aN} - \frac{1}{3} U_{bN} - \frac{1}{3} U_{cN}$$

# Modulação Vetorial

A partir das expressões anteriores, tem-se que

$$U_{an} = \frac{2}{3}(S_{Wa} \cdot U_{cc}) - \frac{1}{3}(S_{Wb} \cdot U_{cc}) - \frac{1}{3}(S_{Wc} \cdot U_{cc})$$
$$U_{an} = \frac{U_{cc}}{3}(2 \cdot S_{Wa} - S_{Wb} - S_{Wc})$$

Da mesma forma para as outras fases:

$$U_{bn} = \frac{U_{cc}}{3}(2 \cdot S_{Wb} - S_{Wa} - S_{Wc})$$
$$U_{cn} = \frac{U_{cc}}{3}(2 \cdot S_{Wc} - S_{Wa} - S_{Wb})$$

Representação na sua forma vetorial

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix}$$

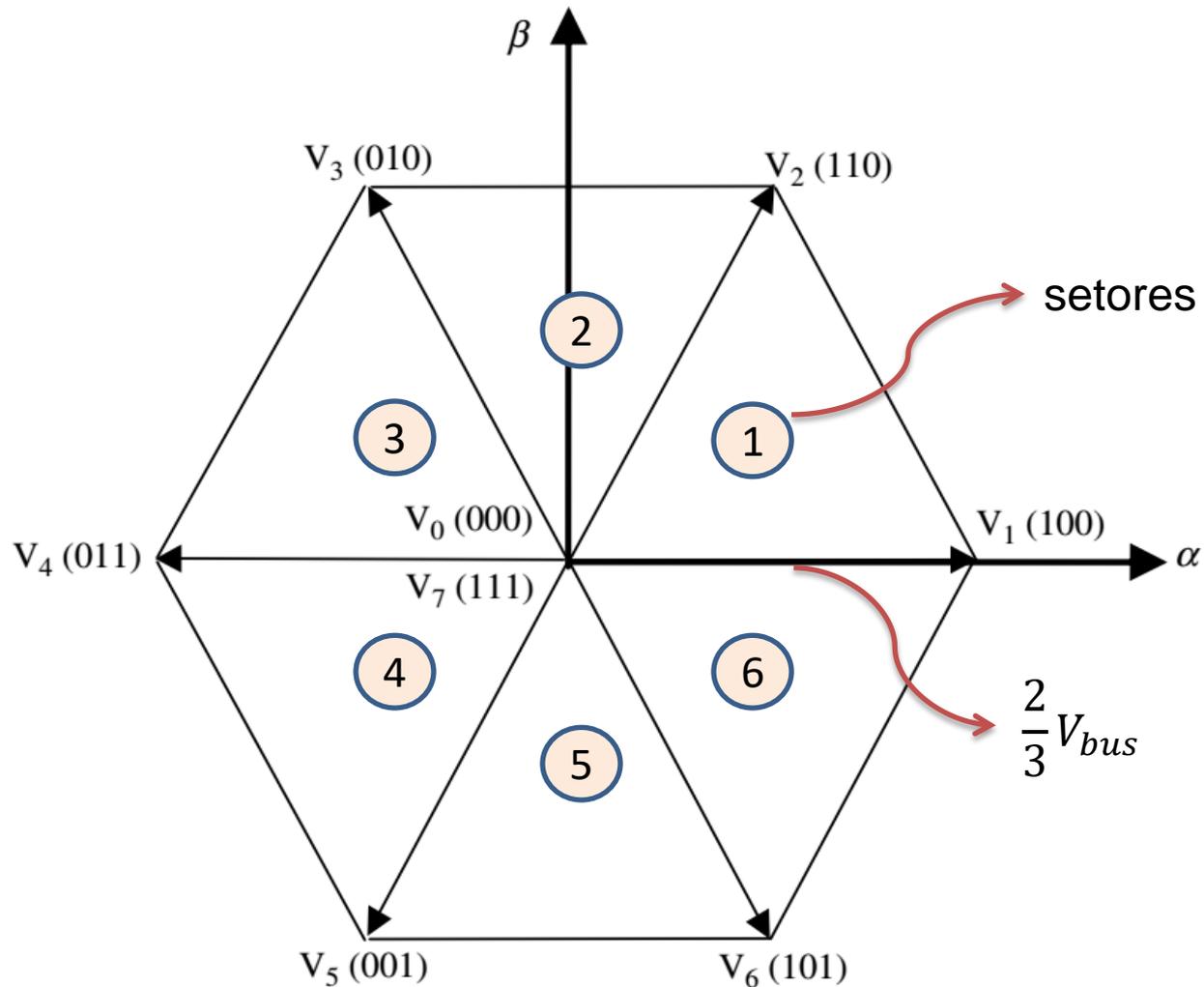
# Modulação Vetorial

Tabela resumida para todos os vetores de chaveamento

$S_{a\_g}$	$S_{b\_g}$	$S_{c\_g}$	$v_\alpha$	$v_\beta$	Vector
0	0	0	0	0	$V_0$
0	0	1	$-\frac{V_{bus}}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}V_{bus}}{3}$	$V_5$
0	1	0	$-\frac{V_{bus}}{3}$	$\frac{\sqrt{3}V_{bus}}{3}$	$V_3$
0	1	1	$-\frac{2}{3}V_{bus}$	0	$V_4$
1	0	0	$\frac{2}{3}V_{bus}$	0	$V_1$
1	0	1	$\frac{V_{bus}}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}V_{bus}}{3}$	$V_6$
1	1	0	$\frac{V_{bus}}{3}$	$\frac{\sqrt{3}V_{bus}}{3}$	$V_2$
1	1	1	0	0	$V_7$

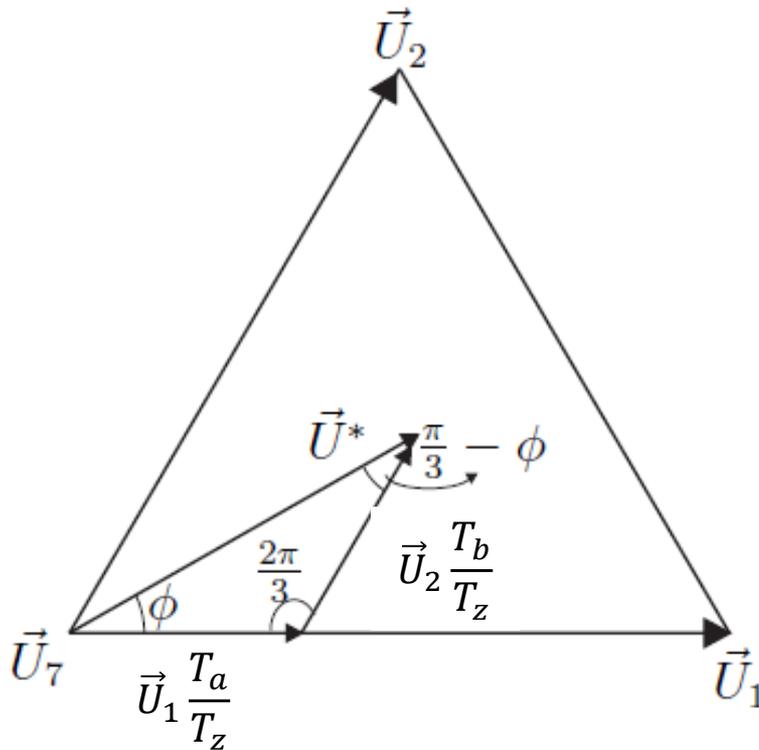
# Modulação Vetorial

Representação dos oito vetores espaciais (6 ativos , 2 nulos)



# Modulação Vetorial

Sintetizar um vetor espacial de tensão qualquer



Componentes do Vetor de Tensão  
no Setor 1

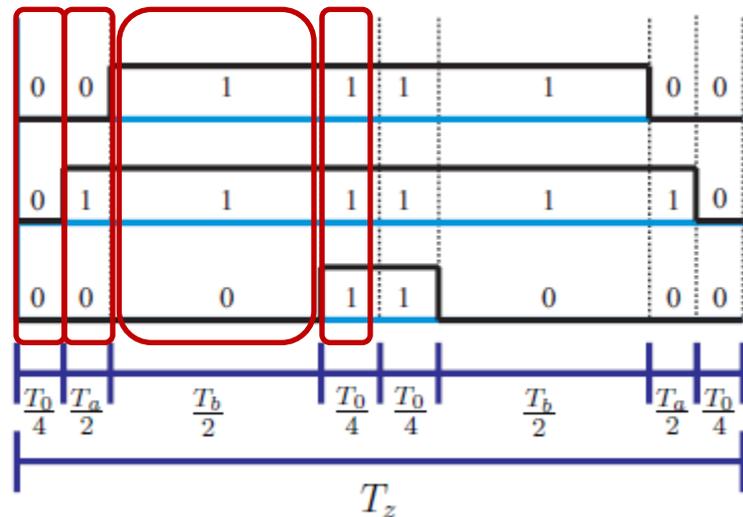
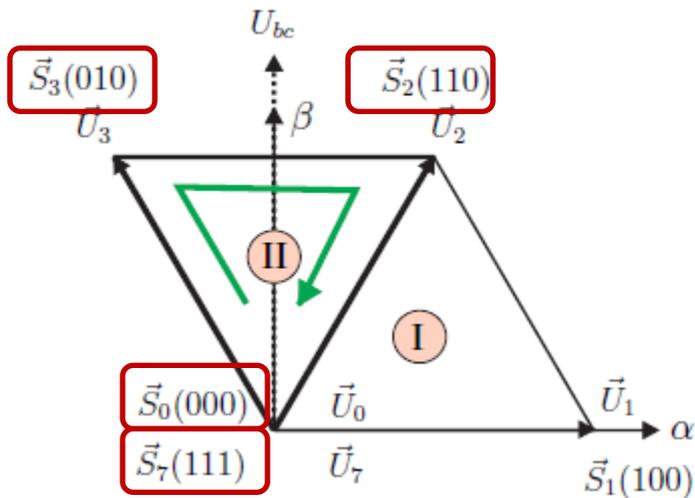
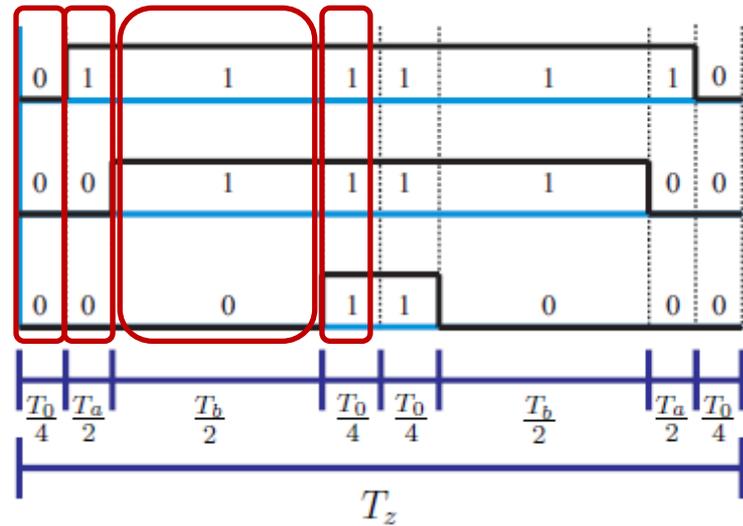
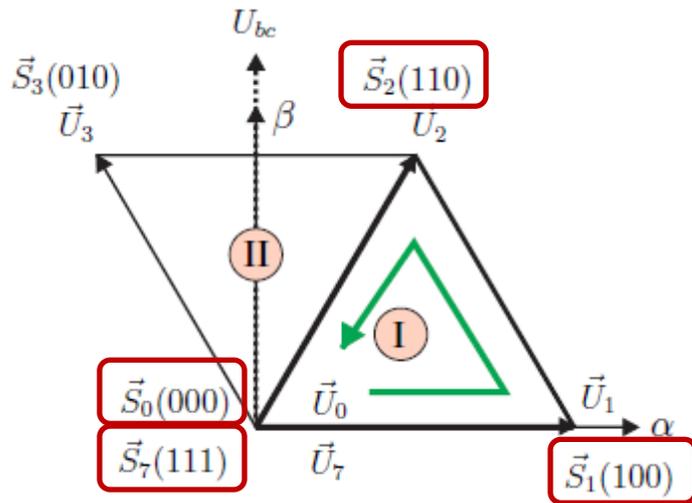
$$T_a = (T_z)(a) \frac{\sin(v_2 - \phi)}{\sin(v_2 - v_1)}$$

$$T_b = (T_z)(a) \frac{\sin(\phi - v_1)}{\sin(v_2 - v_1)}$$

$$T_0 = T_z - T_a - T_b$$

Sendo que **v1** e **v2** são os ângulos dos vetores de chaveamento que delimitam o setor. **Tz** é o período de chaveamento e **a** é a amplitude normalizada do vetor espacial da tensão que será sintetizada.

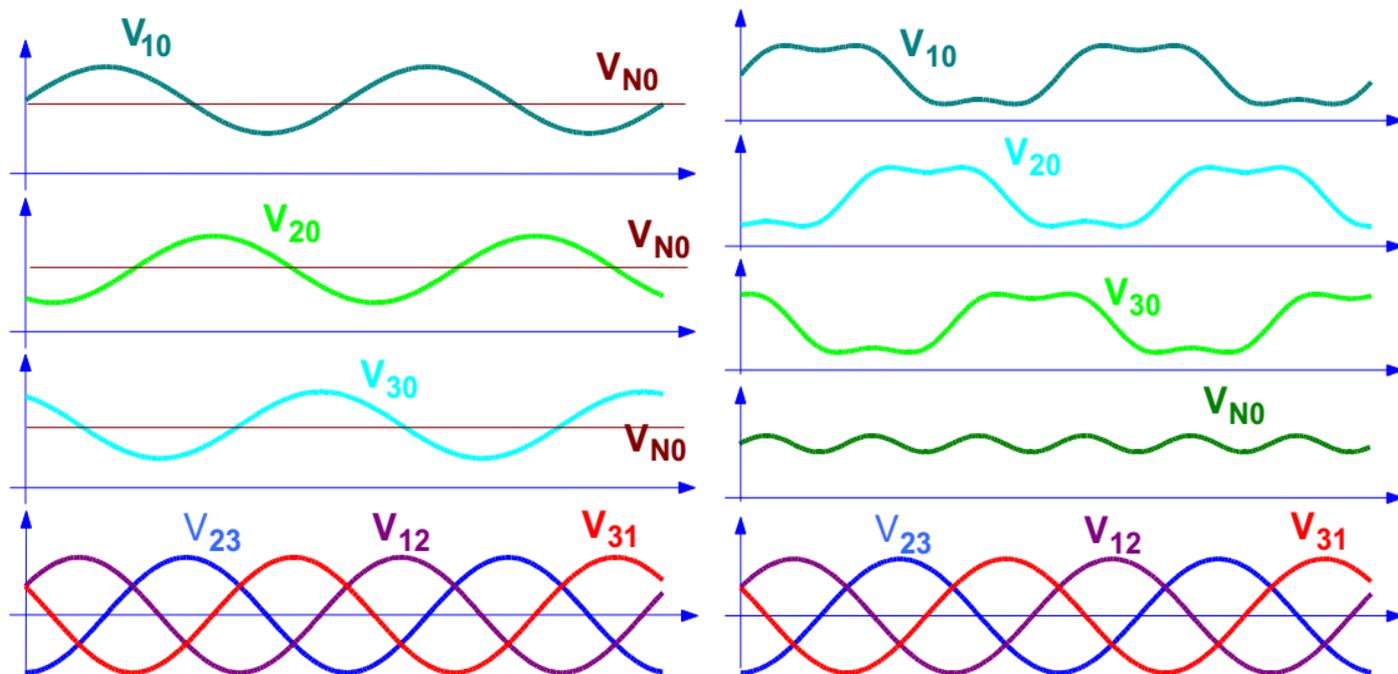
# Modulação Vetorial – sequência de chaveamento



## Modulação Vetorial – 3ra harmônica

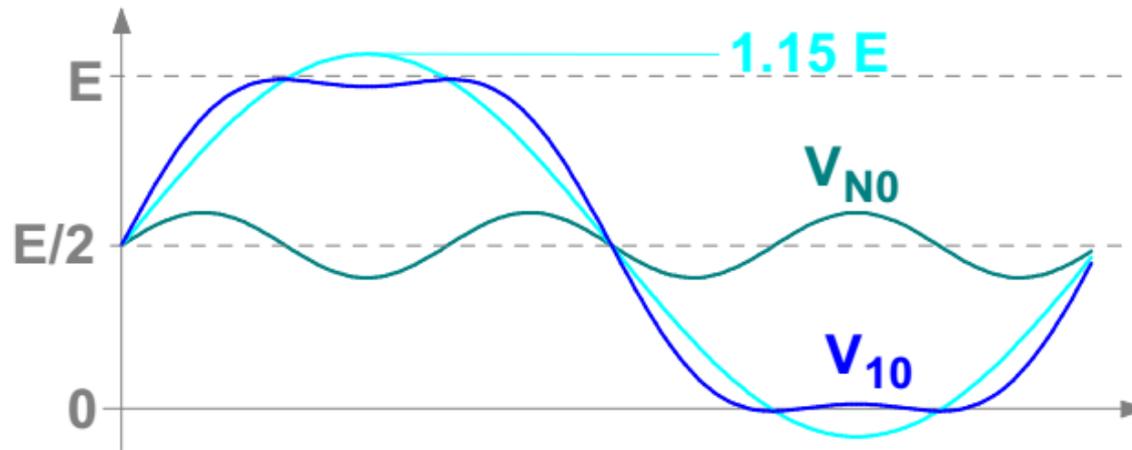
No entanto, apesar da simetria dos pulsos, o uso de modulação vetorial leva à produção inerente de uma terceira harmônica nas tensões de fase.

A existência de um nível comum às 3 fases (no exemplo, um nível CC), não afeta a tensão de linha, que se mantém simétrica e equilibrada. O efeito da terceira harmônica é semelhante, como se vê na mesma figura. Ou seja, as tensões de fase possuem a terceira harmônica, mas ela não se apresenta na tensão de linha, por ser de “modo comum”. [3]



## Modulação Vetorial – 3ra harmônica

No entanto, esta terceira harmônica, ao reduzir o pico da tensão, permite que a componente fundamental associada a esta onda tenha um valor de pico de  $1,15E$ , ou seja, maior do que existiria sem a terceira harmônica!

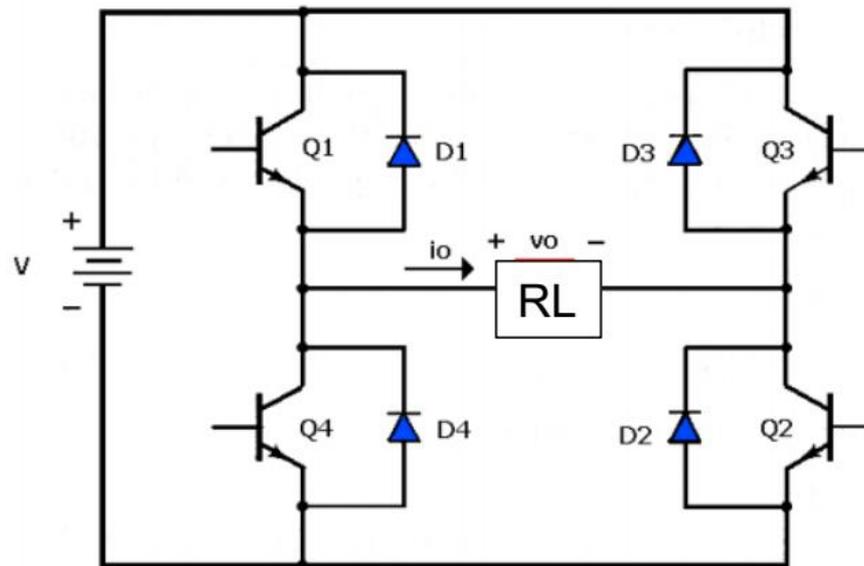


Pode-se concluir que, em cada período de comutação, adicionando-se uma mesma componente, constante ou variável, a todas as três referências, tem-se

- O valor instantâneo da tensão de fase se altera;
- O valor médio da tensão de fase também se altera proporcionalmente;
- O valor médio da tensão entre fases não se altera;
- Se não existe conexão do neutro (carga em Y), as tensões na carga não se alteram. [3]

## Atividade 3

Simular o inversor monofásico ponte completa com modulação unipolar e bipolar com os seguintes dados:  $V=400$  V;  $L=15$ mH e  $R=2$  ohm, frequência de chaveamento no máximo 20 kHz, simular para uma frequência fundamental de 60Hz. Mostrar para ambos os casos o espectro de frequências para a tensão na carga RL (FFT), validar com a teoria.



Enviar relatório (máximo 6 páginas) em formato pdf e o modelo de Simulink (Matlab r2015b) para o e-mail: [jose.azcue@ufabc.edu.br](mailto:jose.azcue@ufabc.edu.br), assunto: “Atividade 03 – ACEP 2Q2019” (sem as aspas). **Data: 01/08/2019 até às 13h.**

# Próxima Aula

1. Acionamento do Motor de Indução
  - a. Controle por Orientação de Campo (FOC)
  - b. Controle Direto de Torque (DTC)

# Referências Bibliográficas

1. MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. Power Electronics: Converters Applications and Design 2. Ed. New York: Editora John Wiley & Sons, 1995.
2. RASHID, M.H. Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações. Ed. São Paulo: Makron Books, 1999.
3. Pomilio, J.A.; Apostilas da disciplina de Eletrônica de Potência, <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>
4. H. W. van der Broeck, H. C. Skudelny and G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, no. 1, pp. 142-150, Jan/Feb 1988.
5. G. Abad, J. López , M.A. Rodríguez, L. Marroyo, G. Iwanski, "Doubly Fed Induction Machine: Modeling And Control for Wind Energy Generation", Ed. Wiley, 2011.
6. Pacheco, Juliano & Petry, Clovis. (2016). DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DIDÁTICO PARA ENSINO DE CONVERSORES CC-CA COM MONITORAMENTO POR MICROCONTROLADORES. 10.13140/RG.2.1.2870.2323.