



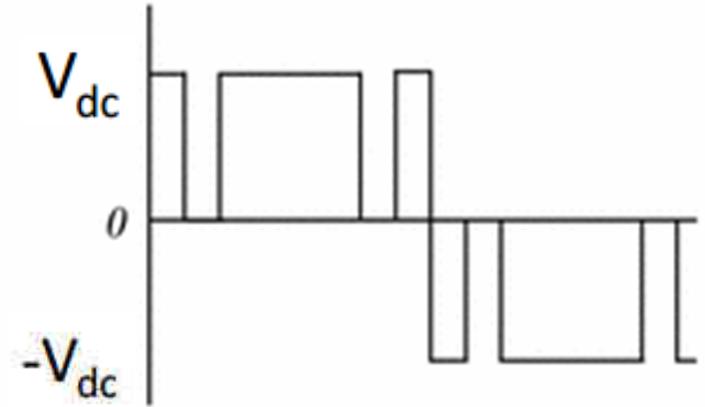
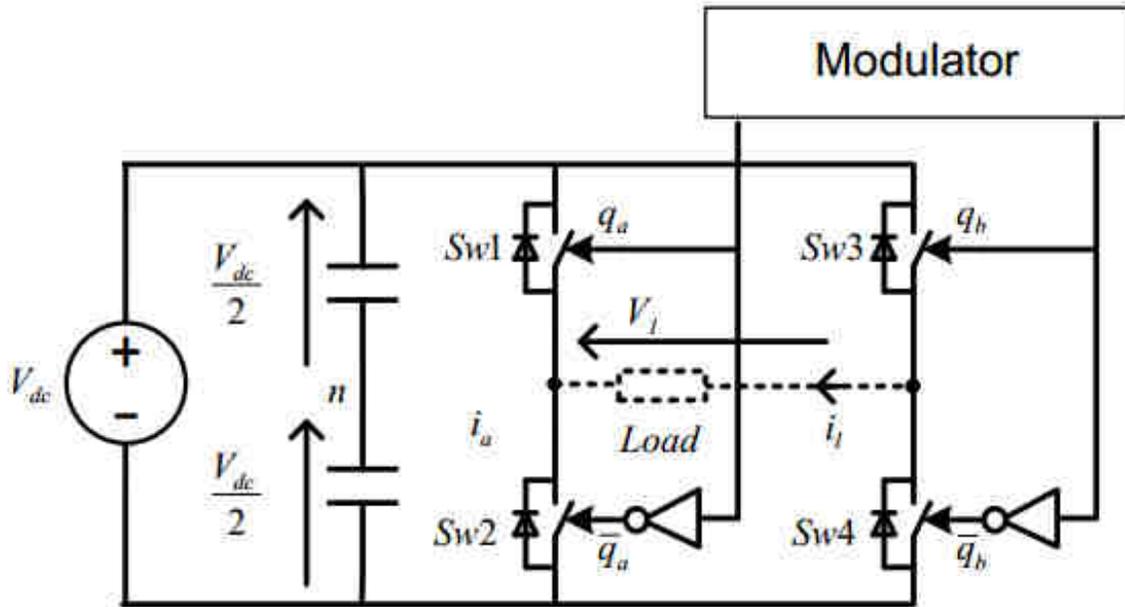
Modelagem e Controle de Sistemas Fotovoltaicos

Aula 05 – P2: Conversor CC/CA Inversor Fotovoltaico – Modulação

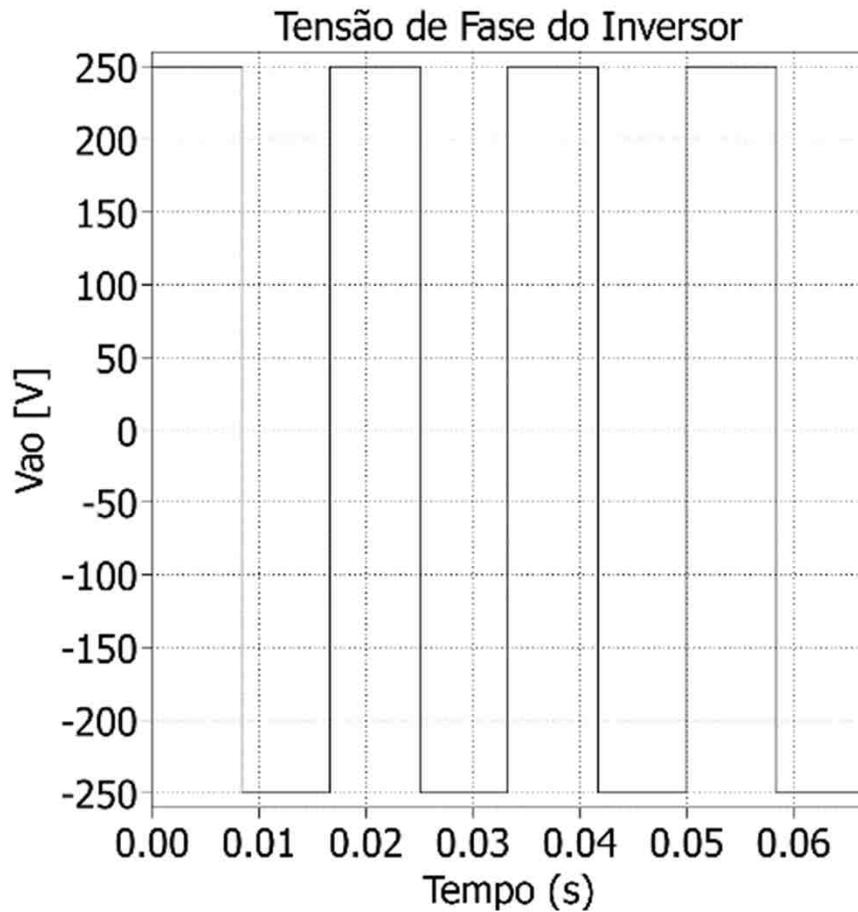
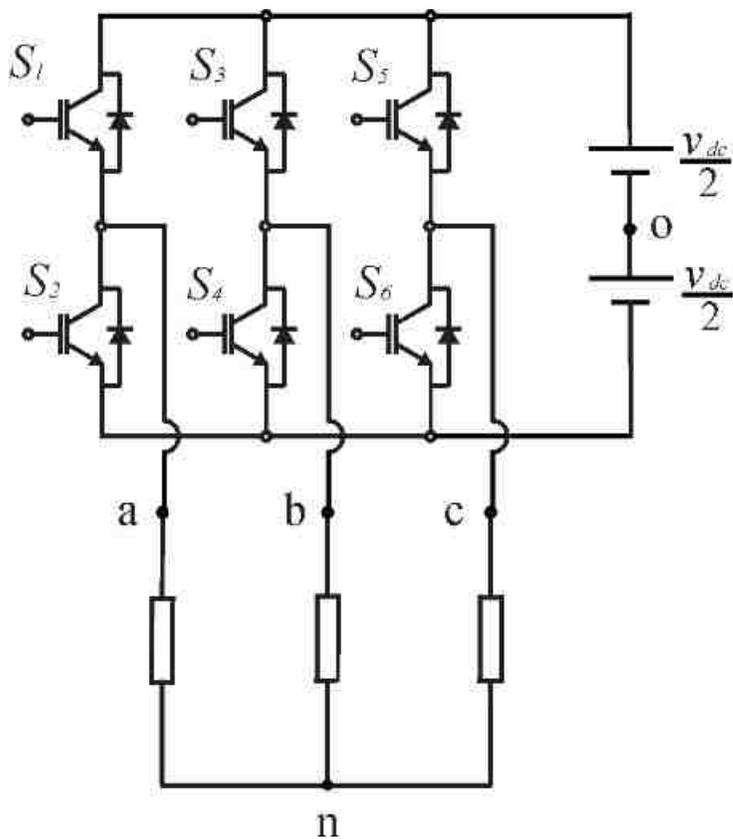
Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br



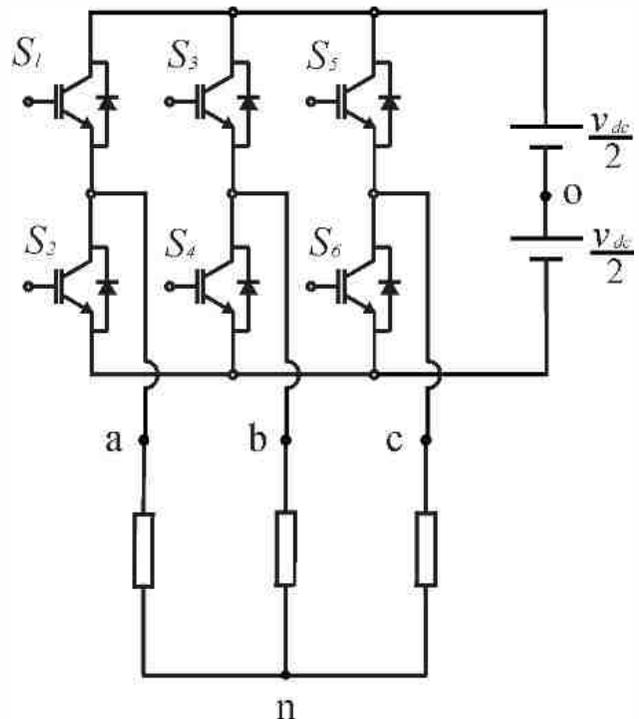
Inversor Fotovoltaico



Estratégias de modulação

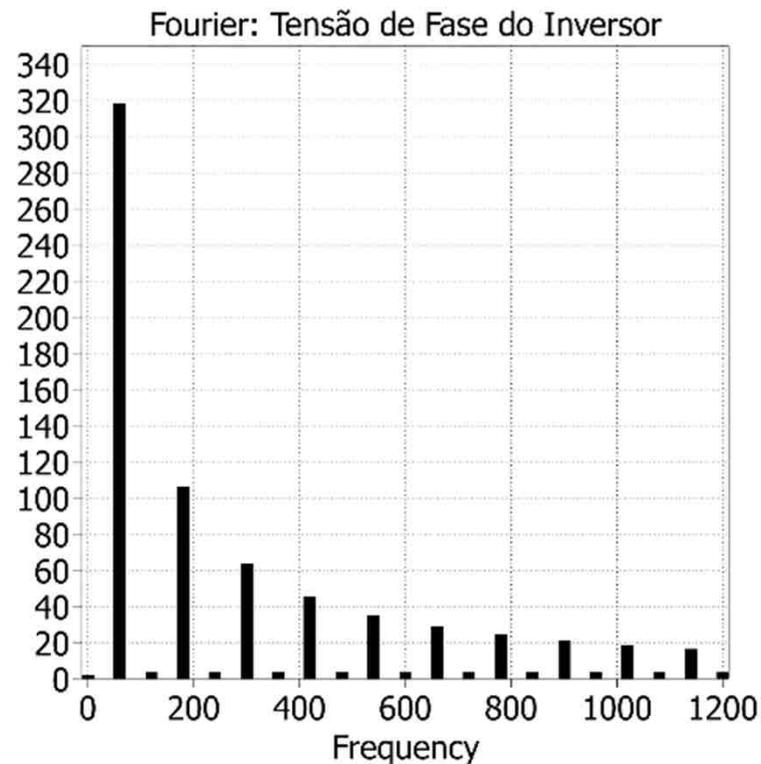
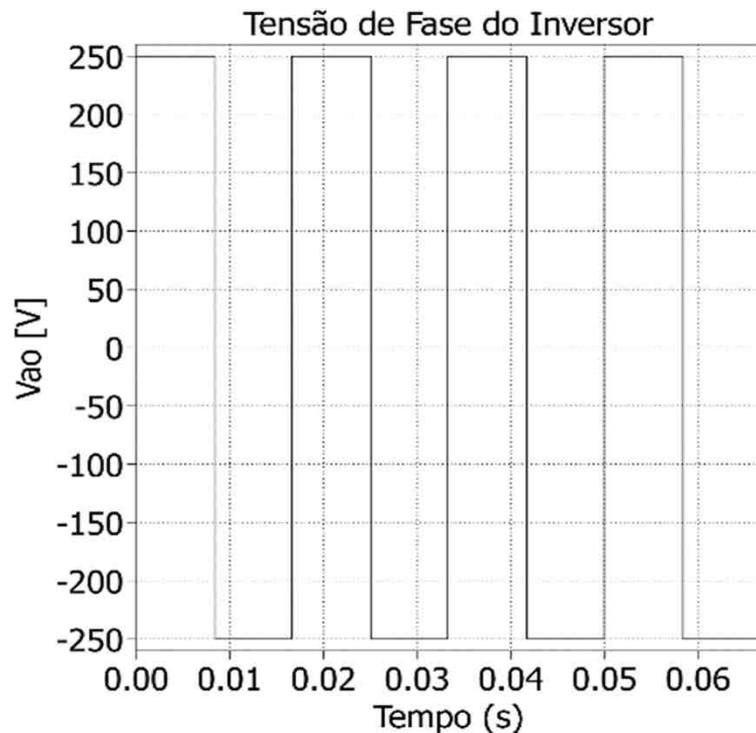


Estratégias de modulação



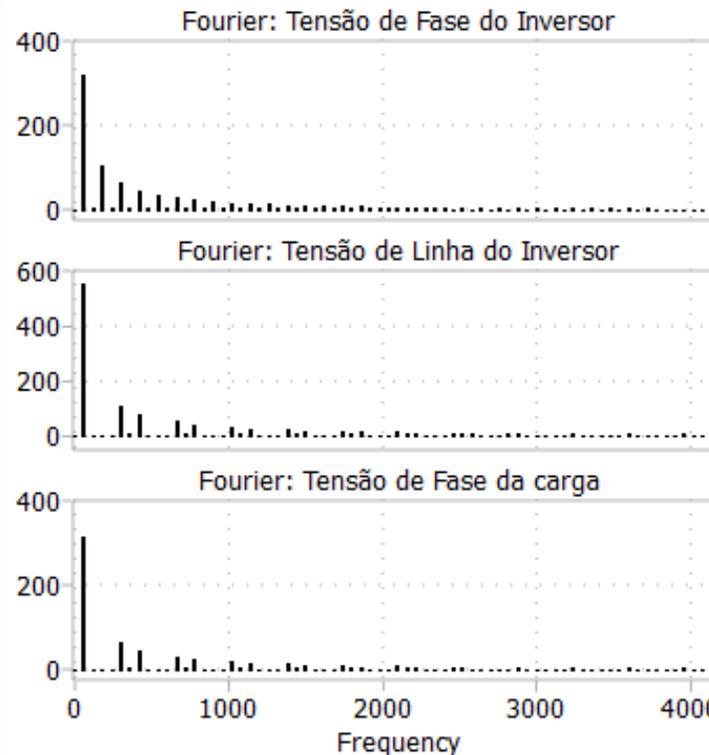
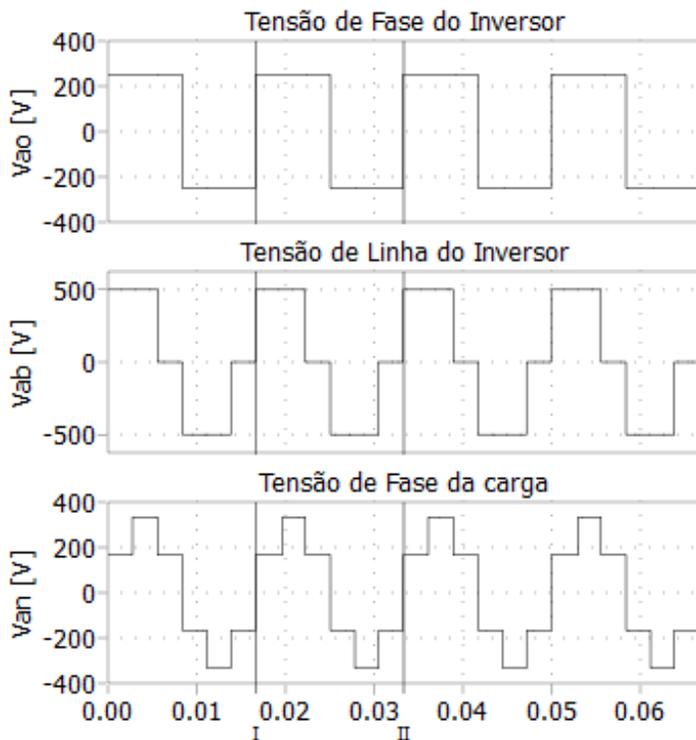
- ✓ Os pares de chaves (S₁,S₂), (S₃, S₄) e (S₅, S₆) devem ser complementares a fim de evitar um curto-circuito no barramento;
- ✓ Se as chaves forem comutadas com a frequência da rede elétrica, a forma de onda da tensão é quadrada;

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.

Tensão de linha



✓ A componente fundamental da tensão sintetizada por fase pelo inversor $v_{ao,f}$ vale:

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

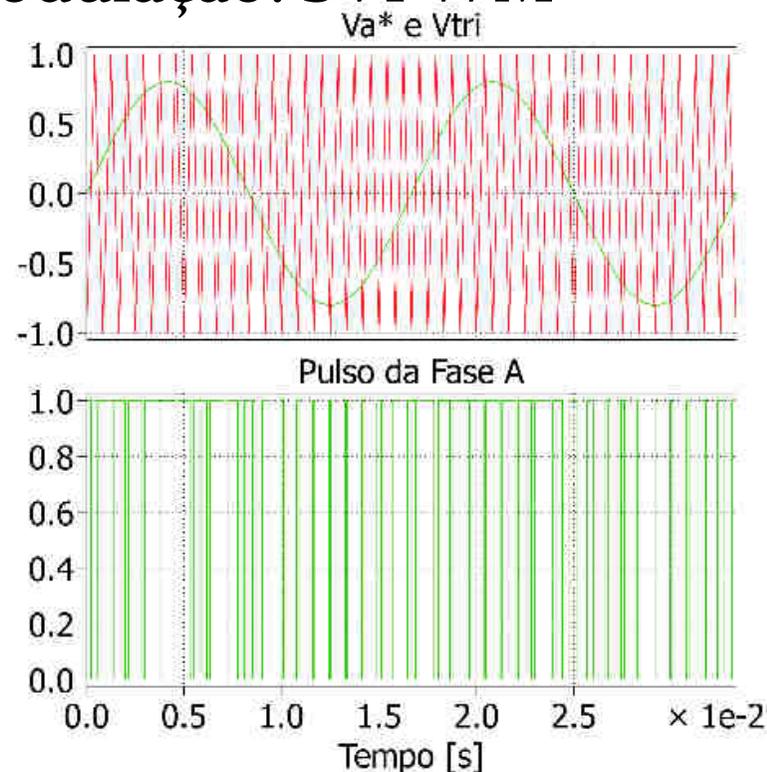
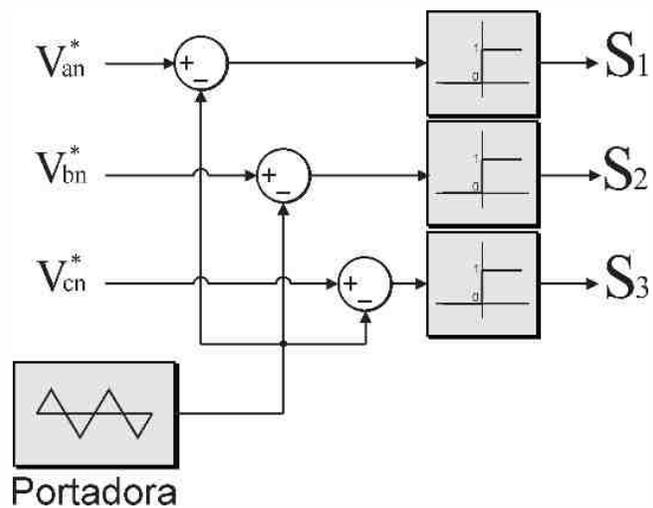
$$v_{dc} = 500 \text{ V}$$

$$v_{ao,f} = \frac{2}{\pi} 500 = 318,47 \text{ V}$$

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 são interessantes.
- ✓ Neste contexto a modulação por largura de pulso (PWM – *pulse width modulation*) é uma técnica largamente utilizada.
- ✓ Estratégia PWM permite o controle da tensão e da frequência aplicada na carga.

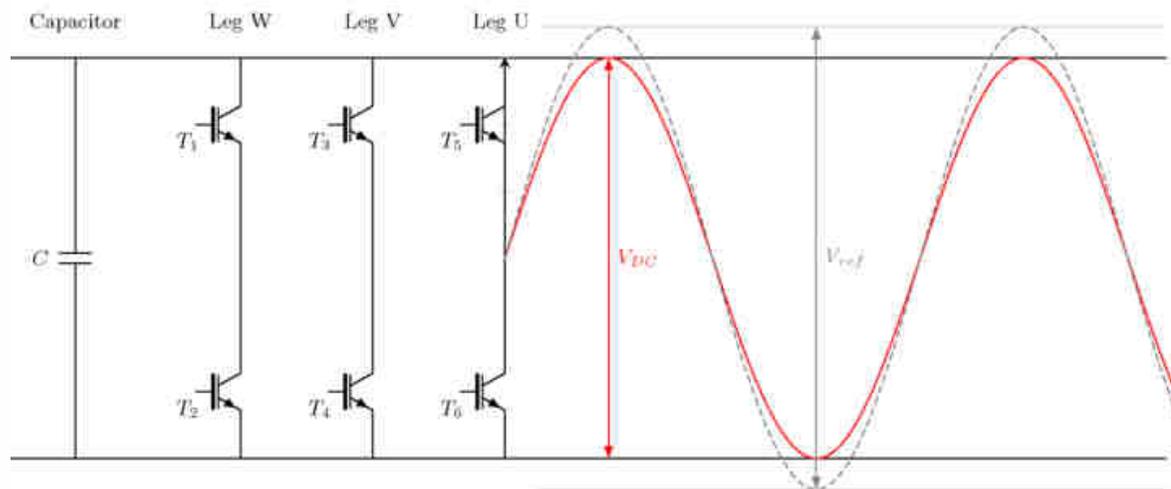
Estratégias de modulação: SVPWM



- ✓ 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.

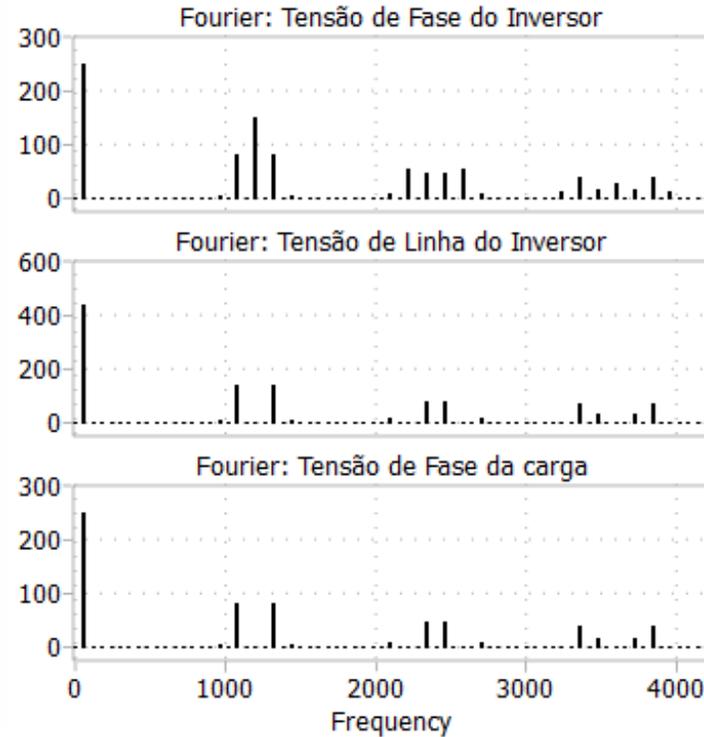
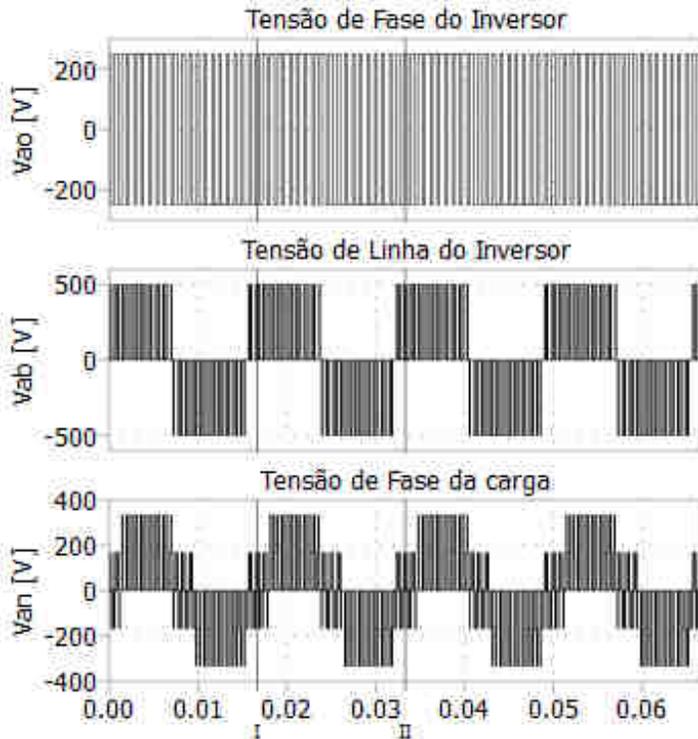
Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ 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:

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

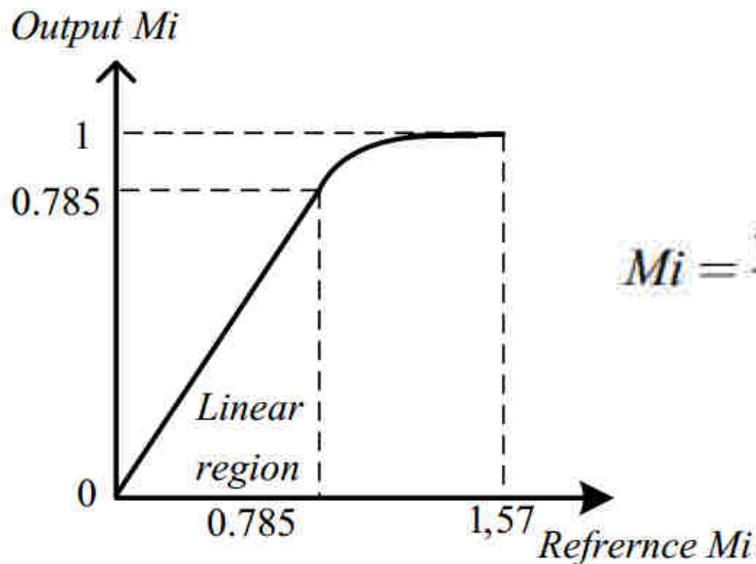
- ✓ Define-se o índice de modulação como sendo

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

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

O que acontece na região não linear?

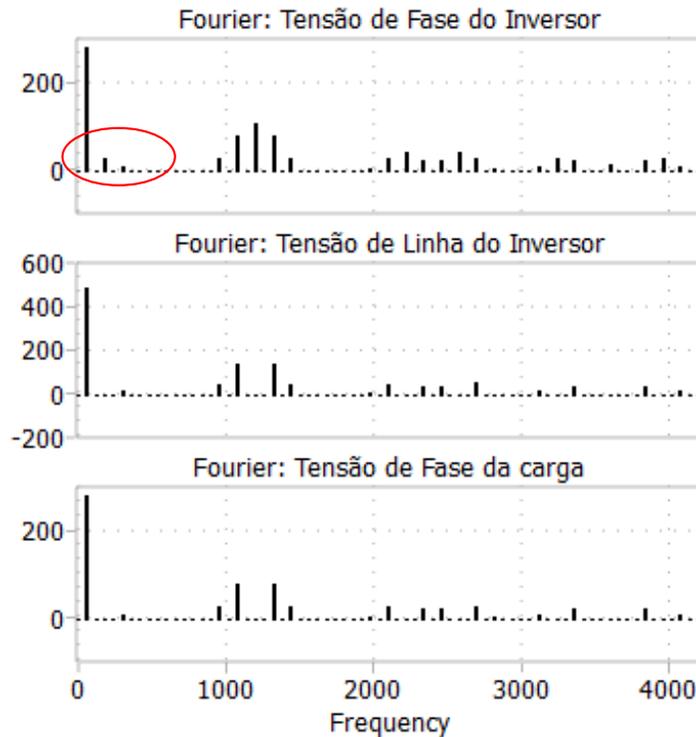
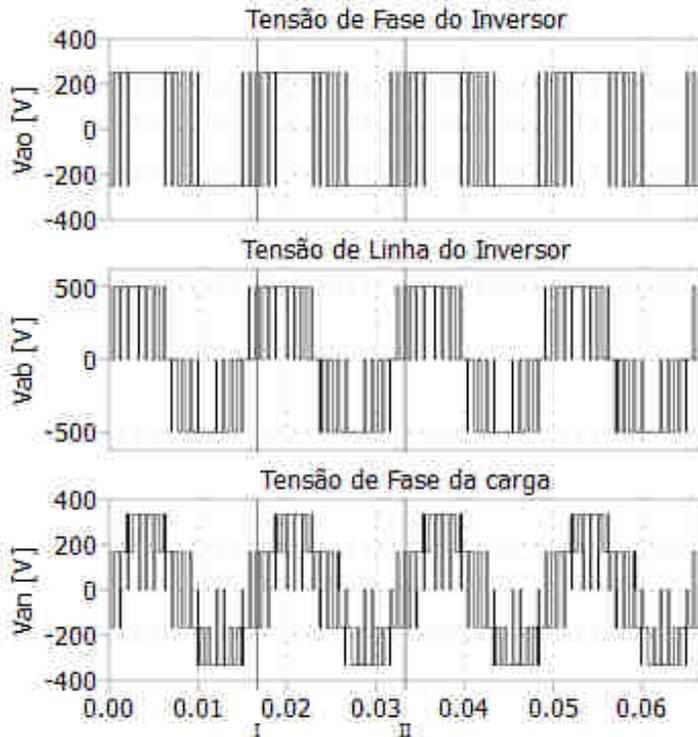
- ✓ Quando a amplitude da referência se torna maior que a amplitude da portadora, ocorre um fenômeno conhecido como sobremodulação.
- ✓ Nesta região, a relação entre a tensão sintetizada e a amplitude da referência não é mais linear.
- ✓ Além disso, harmônicos de baixa frequência aparecem no sinal sintetizado.



$$M_i = \frac{\sqrt{2}V_0}{V_{dc}}, \text{ where } V_0 \text{ is the RMS reference voltage}$$

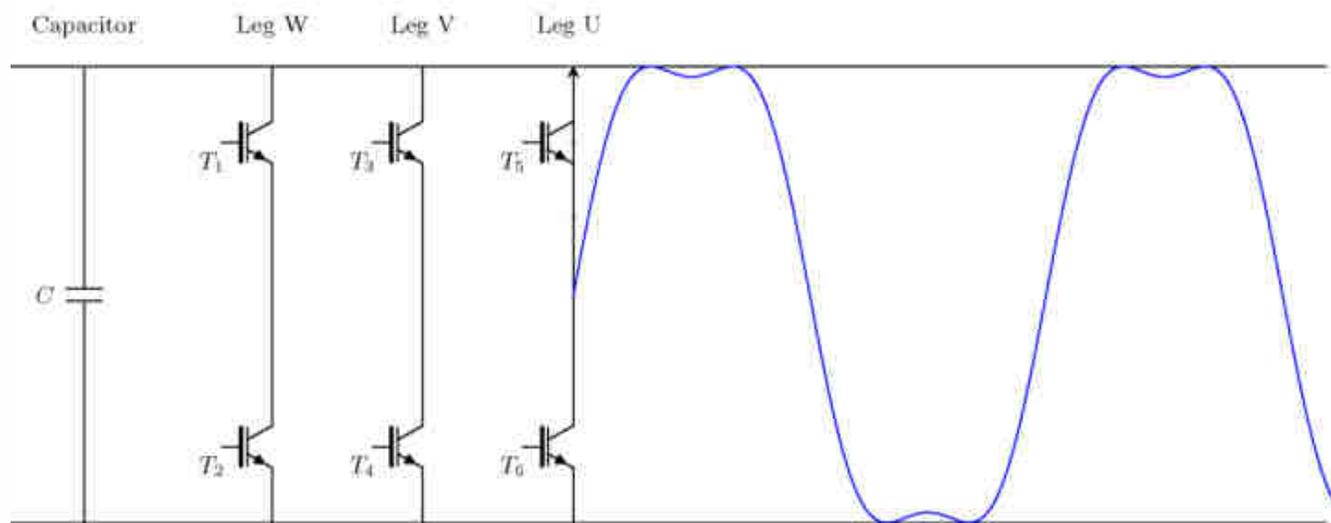
Exemplo:

- ✓ 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;



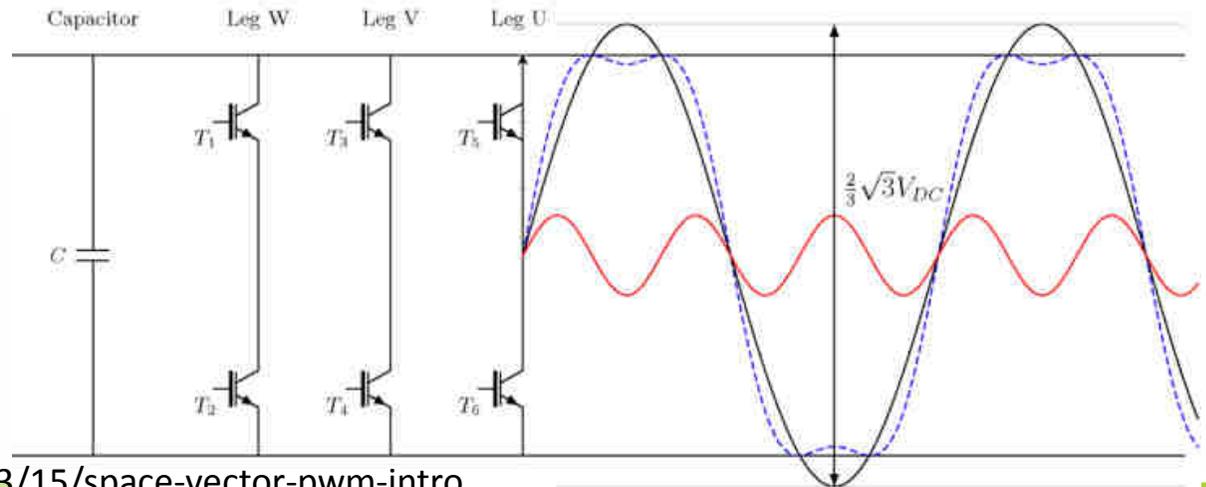
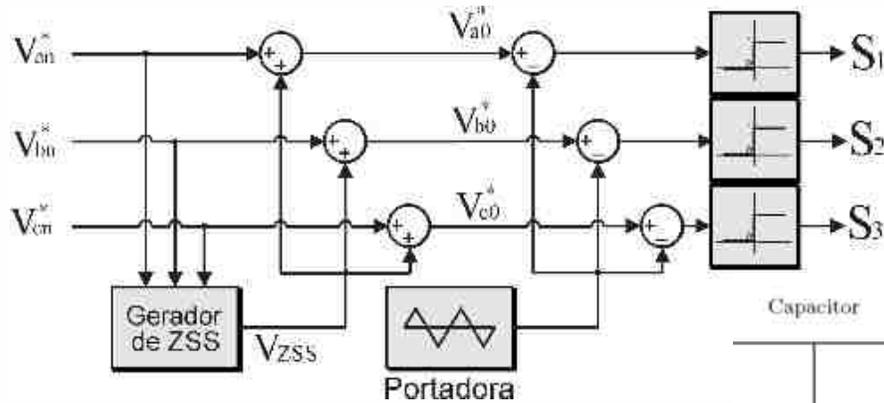
Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

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



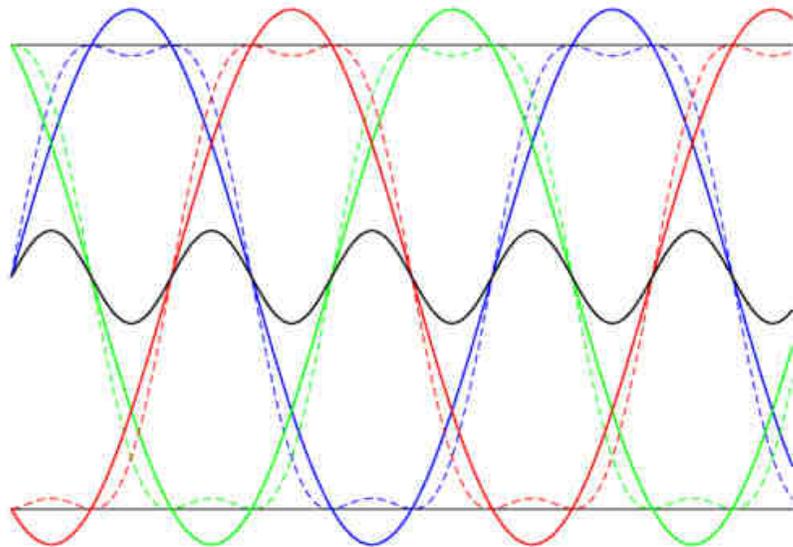
Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

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



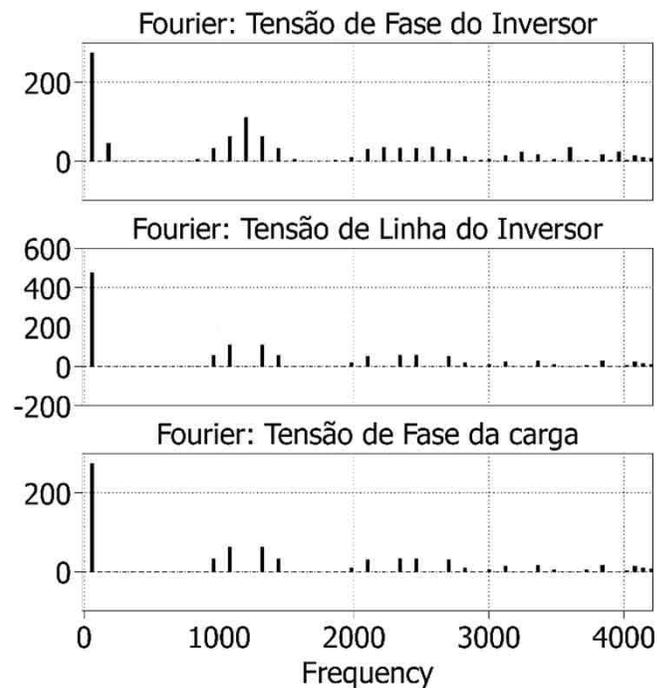
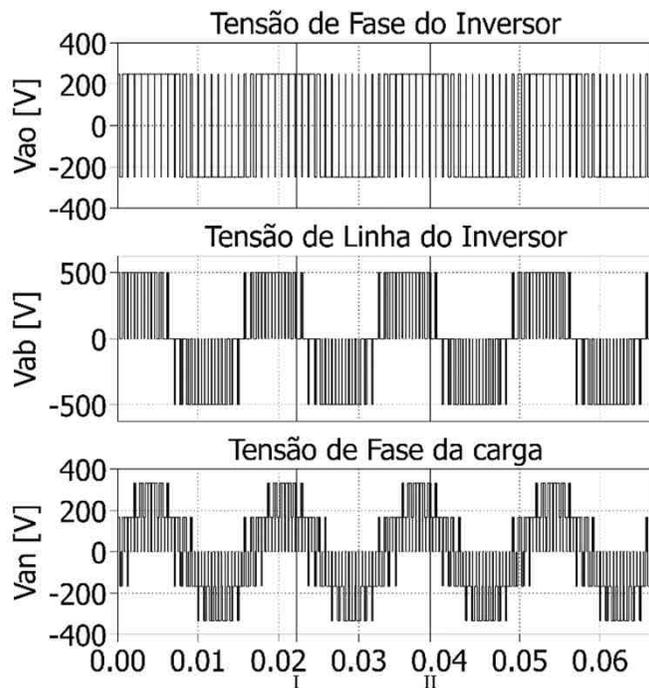
Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

- ✓ 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.

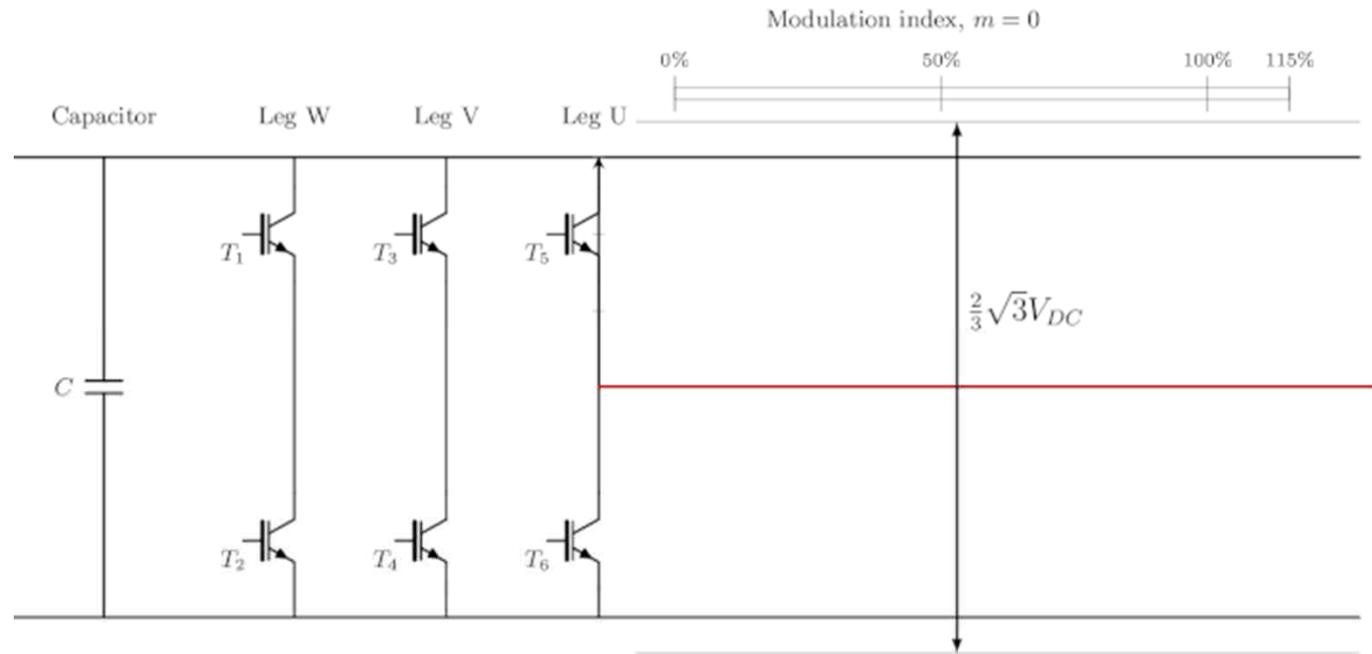


Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

- ✓ A componente de terceiro harmônico não aparece na tensão de linha do inversor;
- ✓ Não acrescenta harmônicos de baixa frequência na tensão da carga.

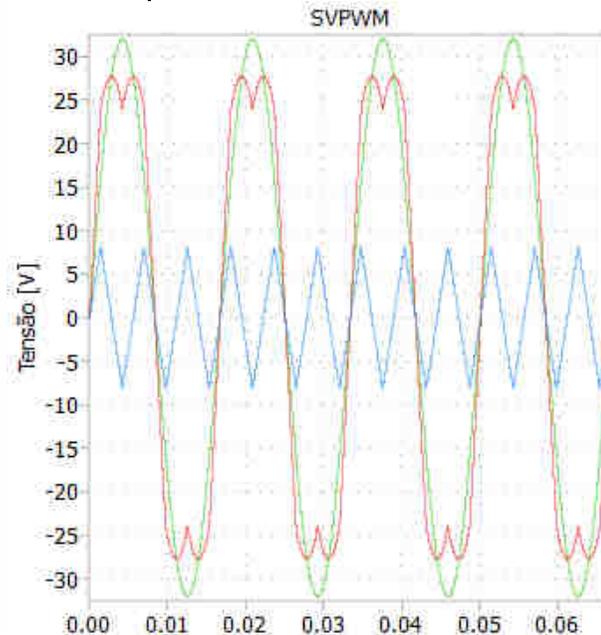
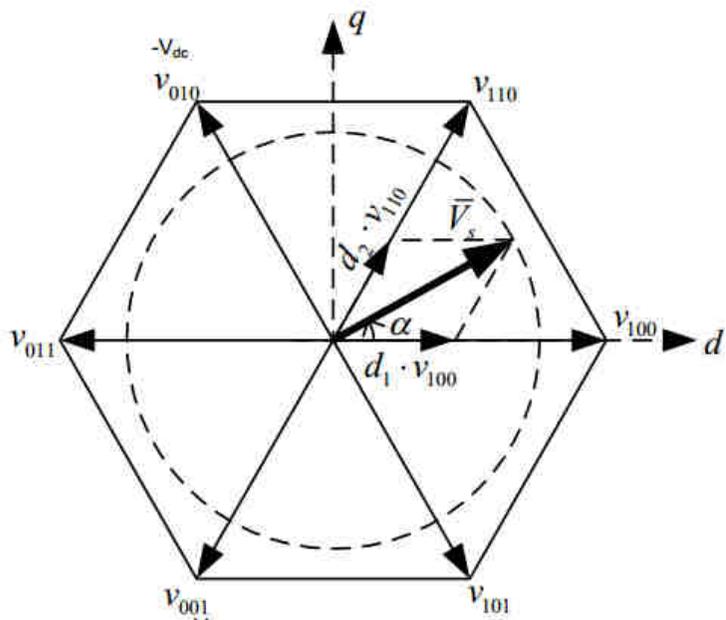


Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

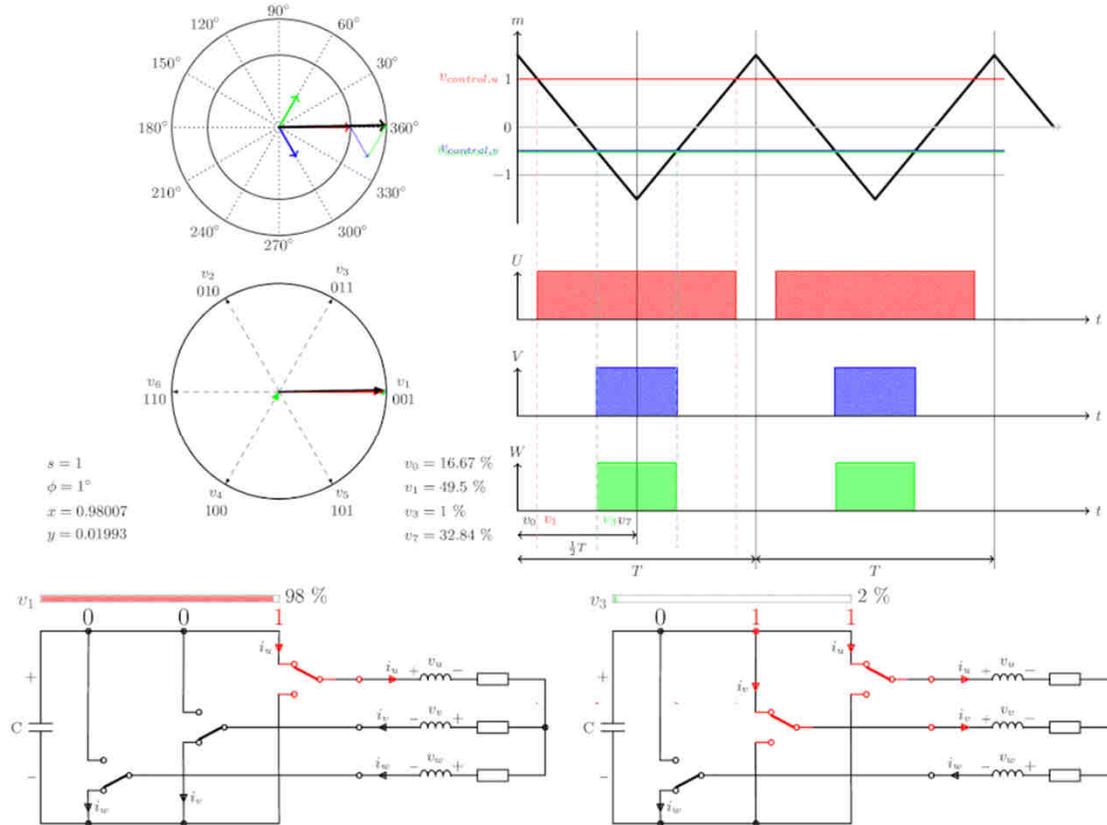


Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ 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



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.



www.gesep.ufv.br



Gesep



gesep_vicosa



Gesep UFV



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



Obrigado!

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