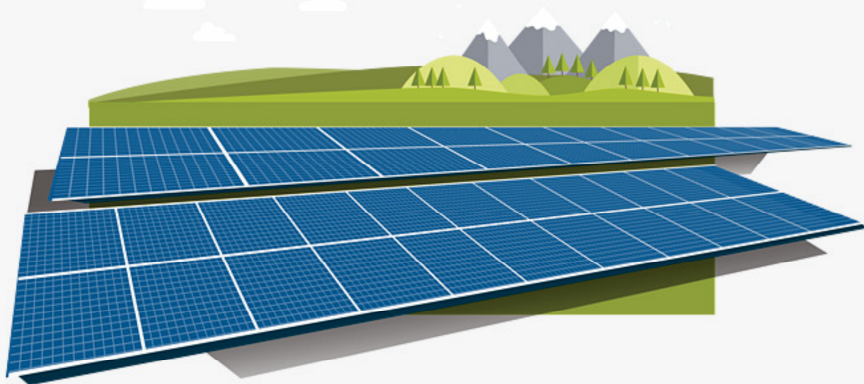




Modelagem e Controle de Sistemas Fotovoltaicos

Aula 05 – P1: Conversor cc/ca Inversor Fotovoltaico – Conceitos Iniciais

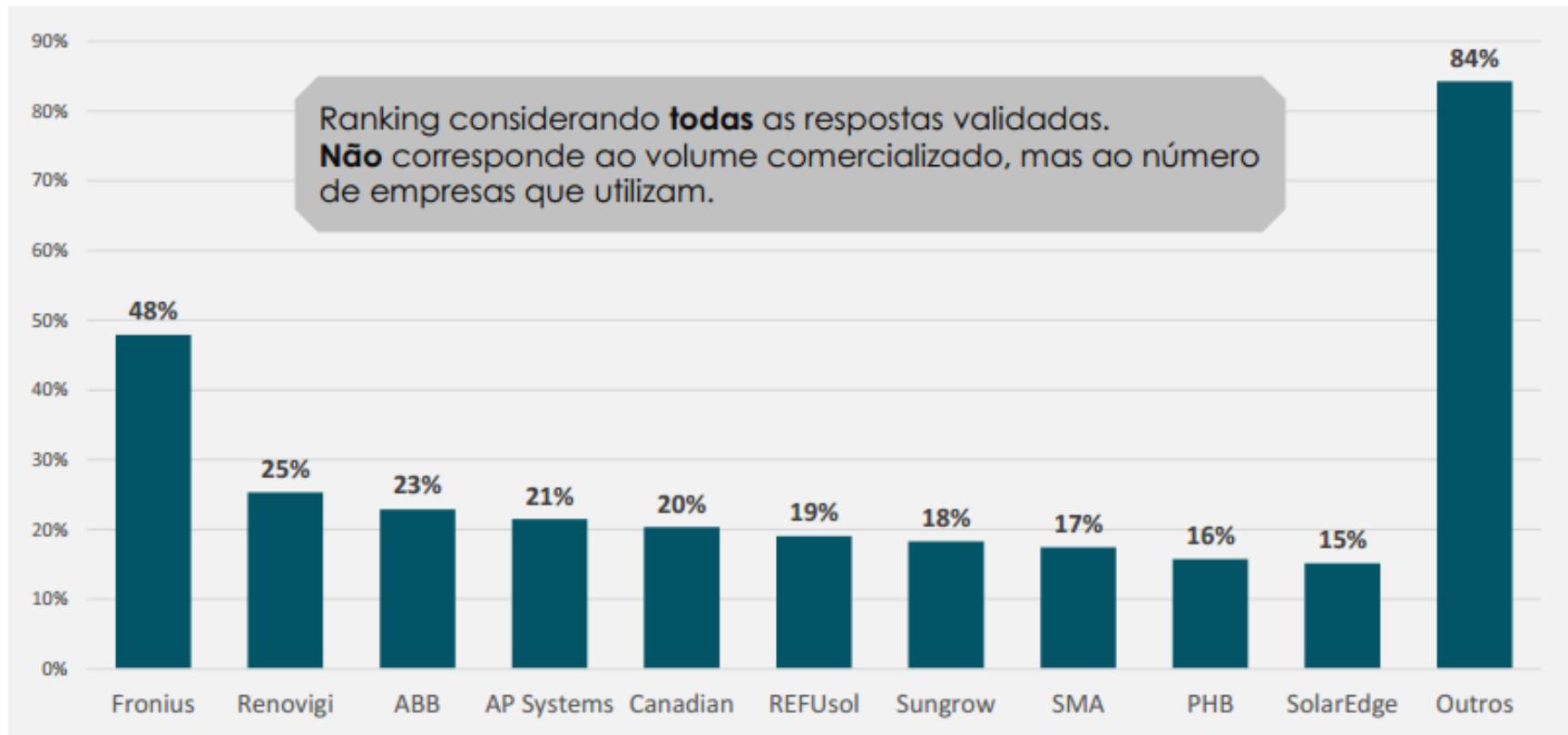
Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br



Inversor Fotovoltaico

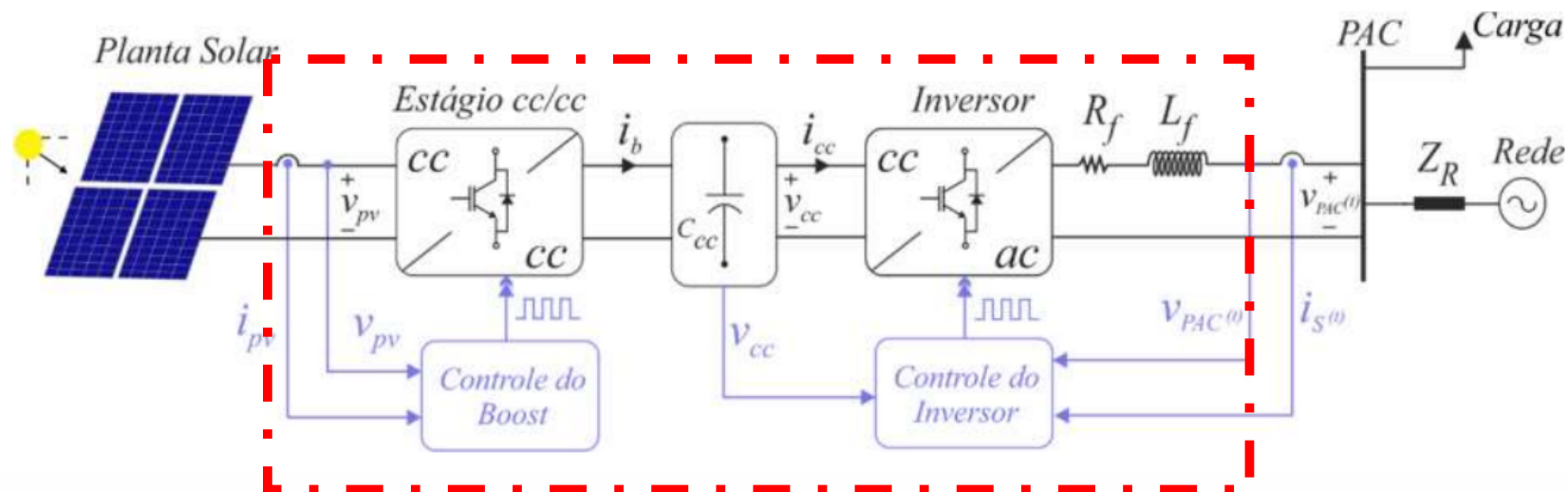


Considerações iniciais – 4º trimestre 2019



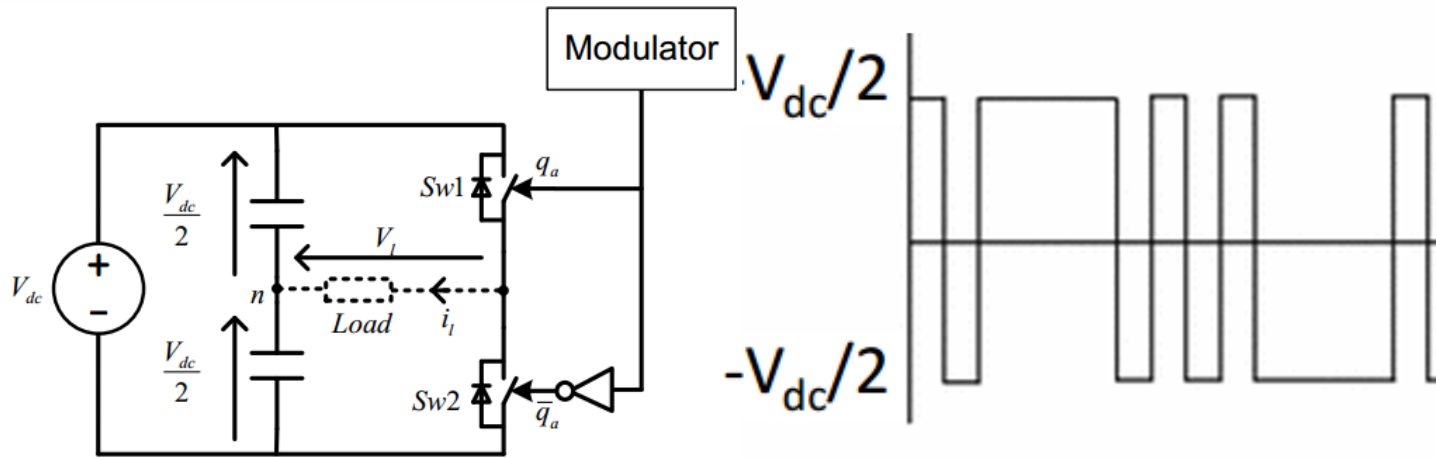
Fonte: Greener

Inversor Fotovoltaico

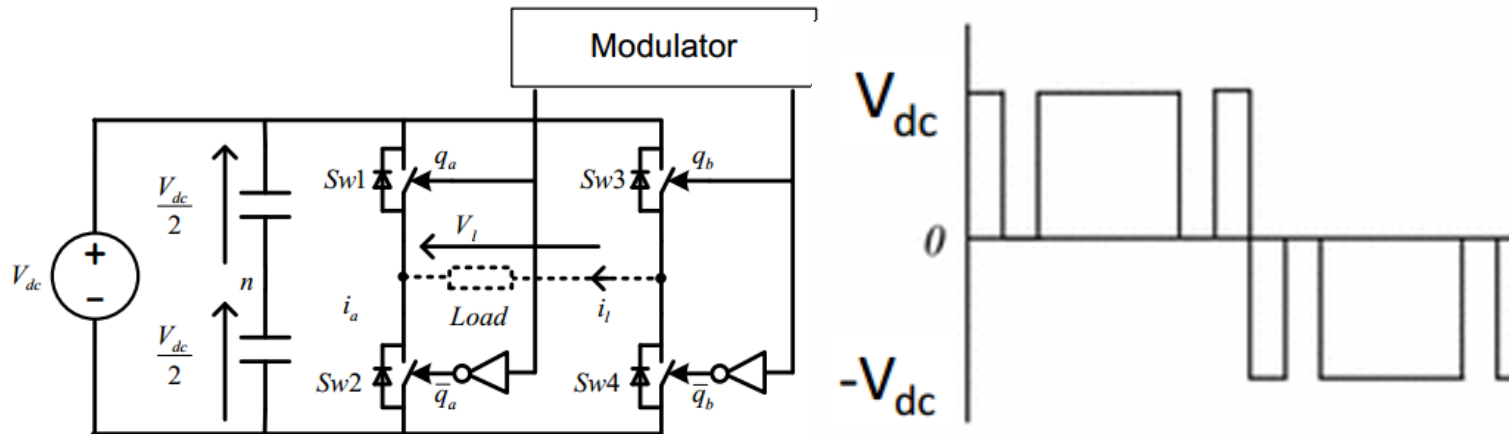


- ✓ Sincronismo com a rede
- ✓ Controlar a injeção de potência ativa e reativa na rede elétrica;
- ✓ Realiza a proteção do sistema fotovoltaico quando existem problemas na rede elétrica;
- ✓ Podem ser monofásicos ou trifásicos;
- ✓ Geralmente acima de 8,5 kW são trifásicos;

Inversor Fotovoltaico

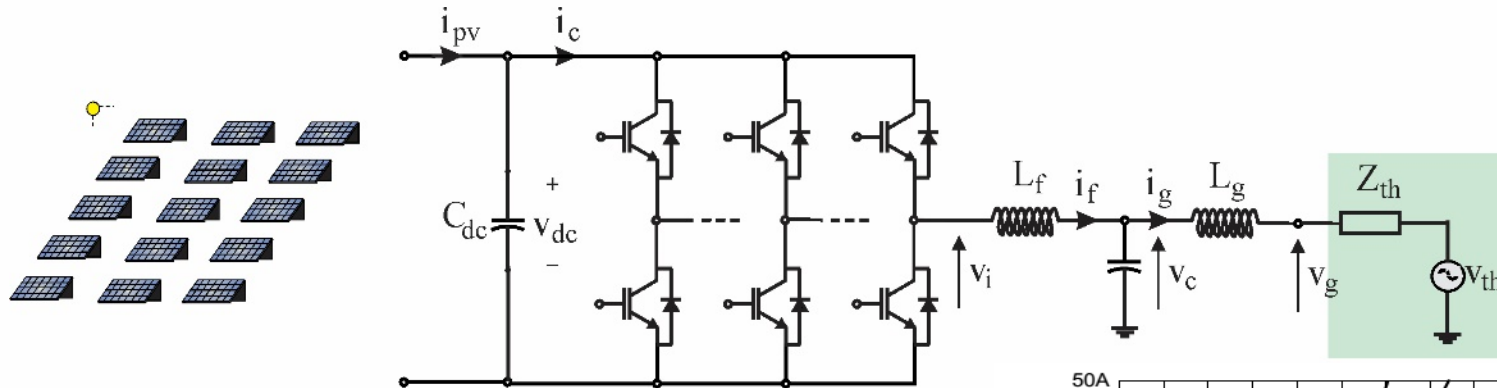


q_a	V_l
0	$-V_{dc}/2$
1	$V_{dc}/2$

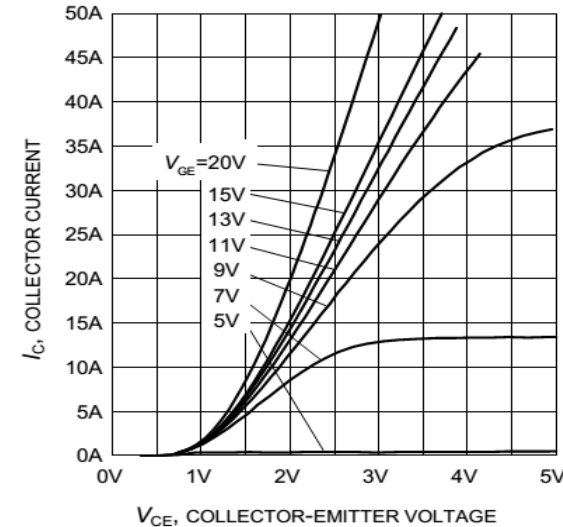
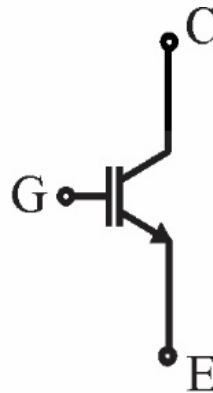


q_a	q_b	V_l
0	0	0
0	1	V_{dc}
1	0	$-V_{dc}$
1	1	0

Inversor Fotovoltaico Trifásico



✓ As chaves semicondutoras mais utilizadas é o IGBT



Chave semicondutoras: IGBT

- ✓ A corrente máxima é função da temperatura de junção do dispositivo;
- ✓ Necessário 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;

Exemplo: Inversor PHB



Dados da Saída CA		
Potência CA Nominal [W]	35000	60000
Max. Corrente CA [A]	96	
Saída Nominal CA	220/127Vca; 60Hz	380/220Vca; 60Hz
Faixa de Operação CA	101,6~139,7Vca; 57,5~62Hz	176~242Vca; 57,5~62Hz
THD	<3%	
Fator de Potência	Unitário (0.8 Capacitivo. / 0.8 Indutivo)	
Conexão CA	Trifásico (3F+N+T) ou (3F+T)	
Eficiência		
Max. Eficiência	98,8%	
Eficiência SPMP	>99,9%	



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

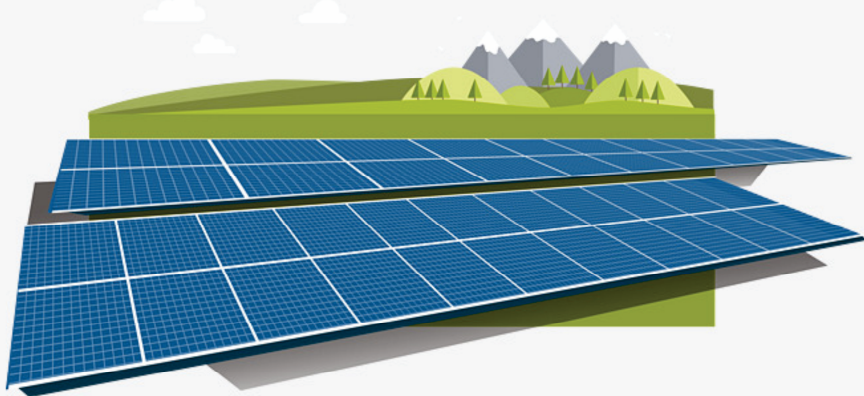
E-mail: heverton.pereira@ufv.br



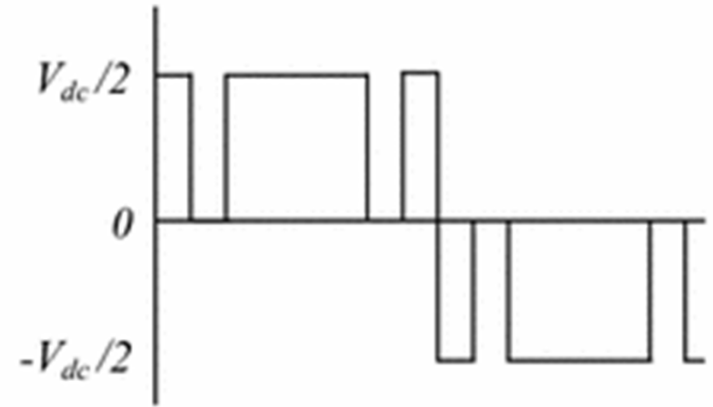
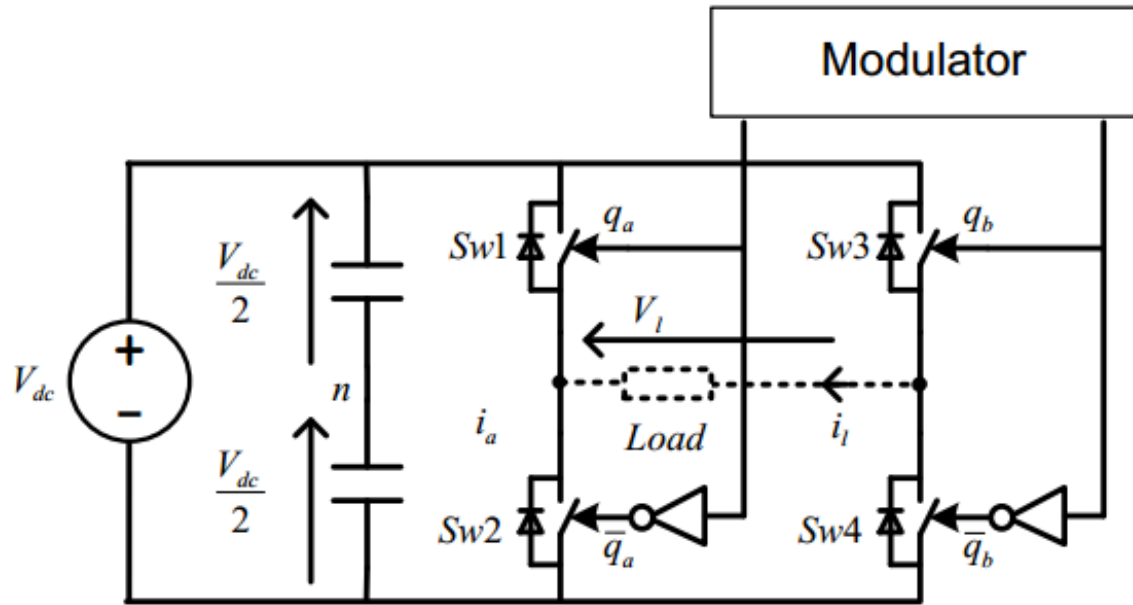
Modelagem e Controle de Sistemas Fotovoltaicos

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

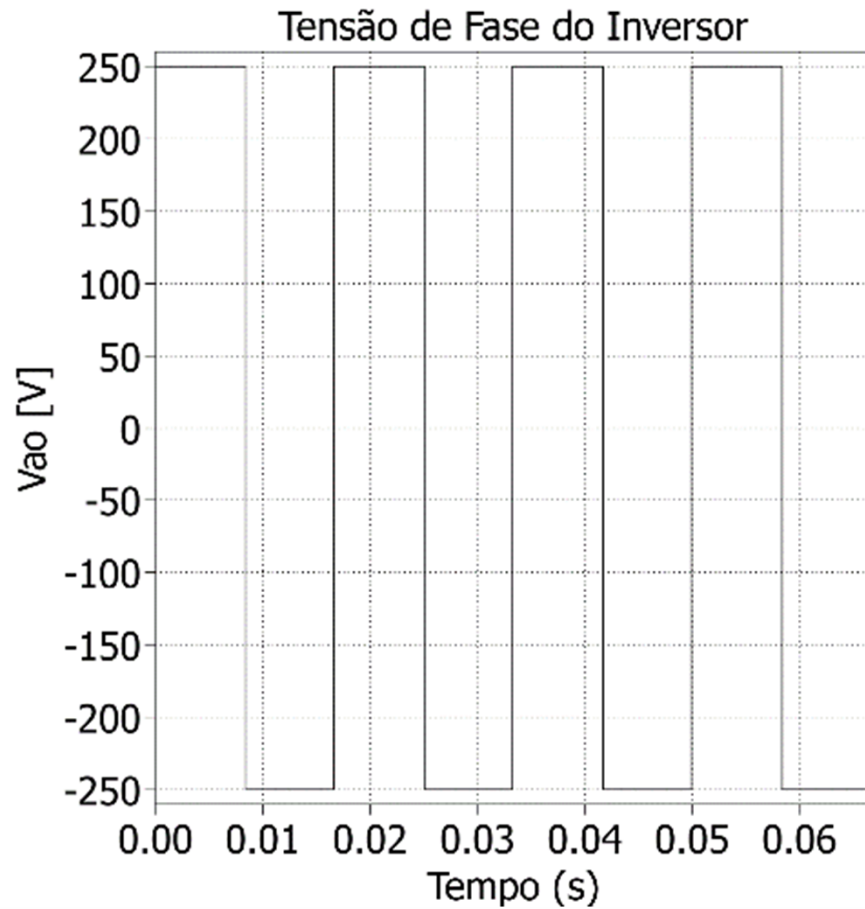
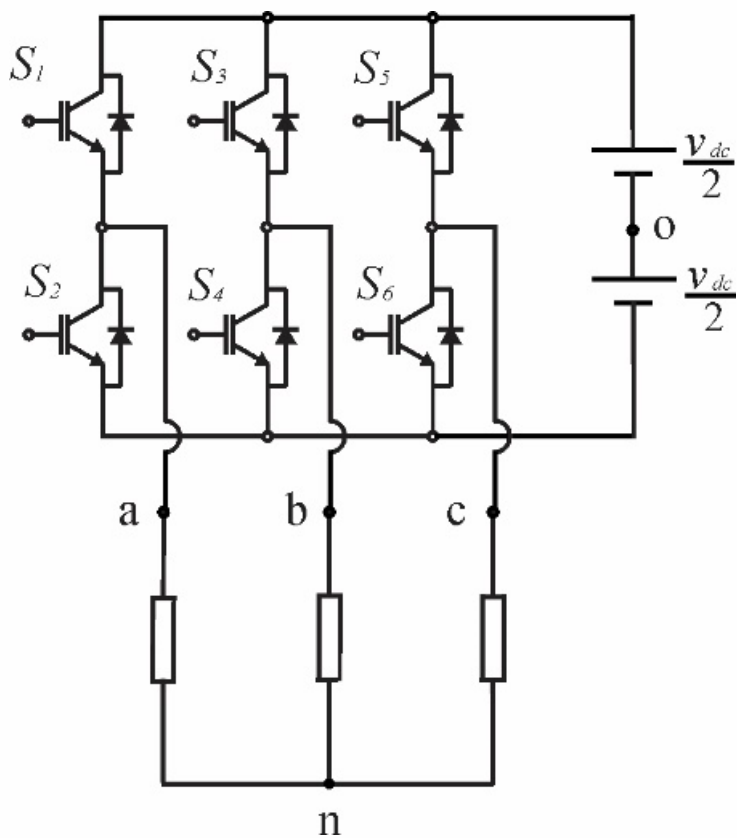
Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br



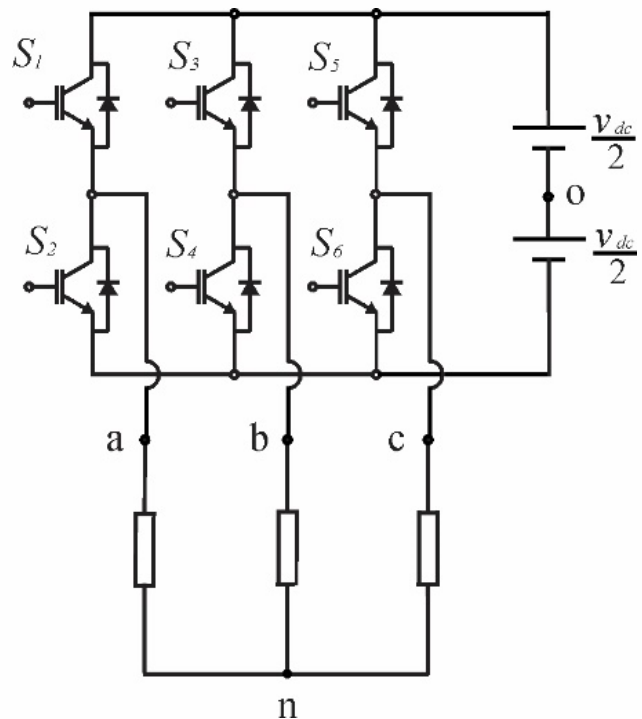
Inversor Fotovoltaico



Estratégias de modulação

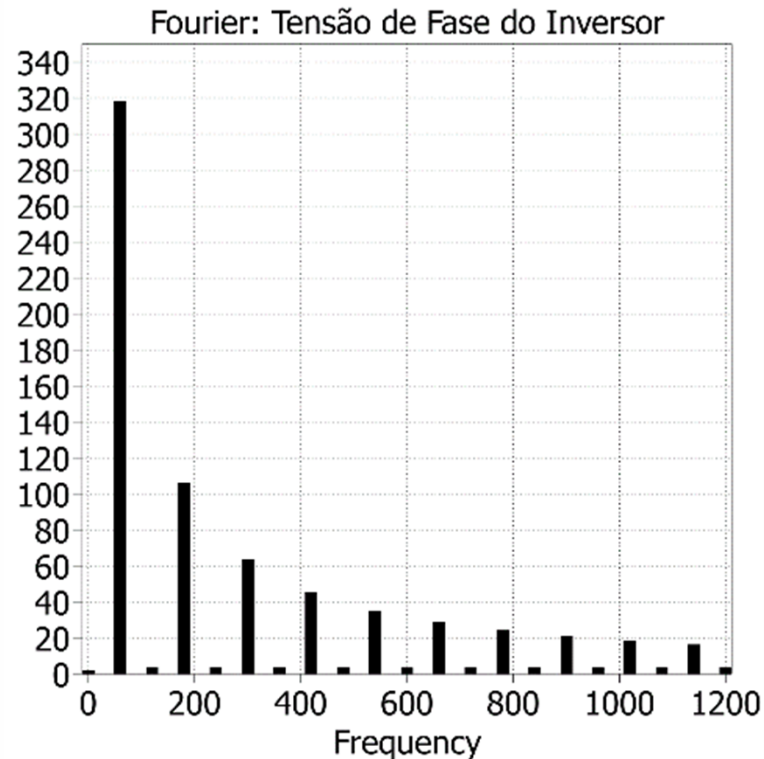
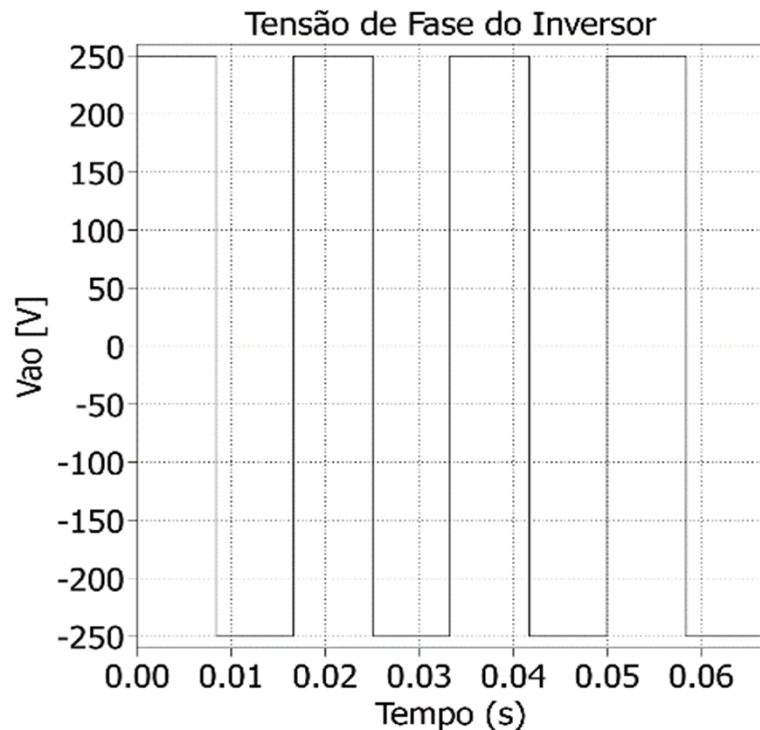


Estratégias de modulação



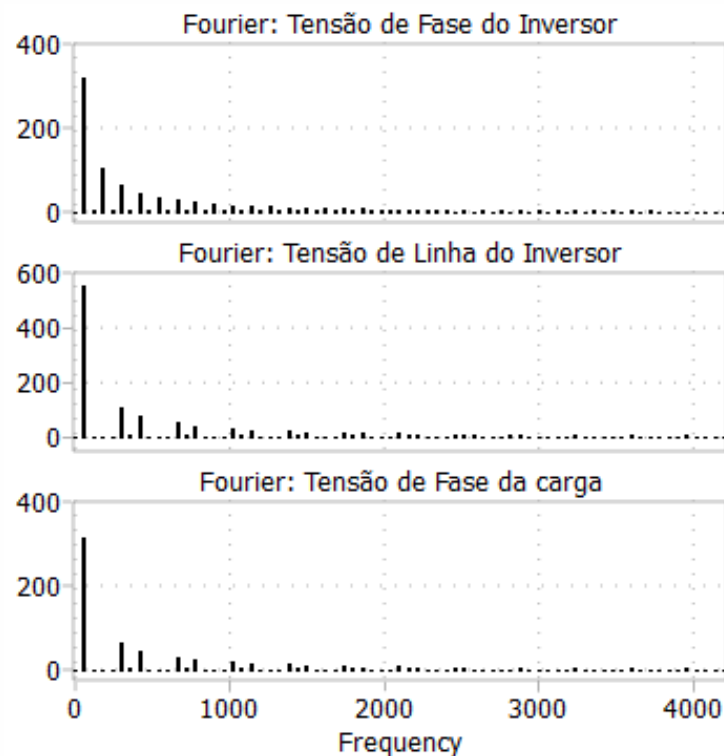
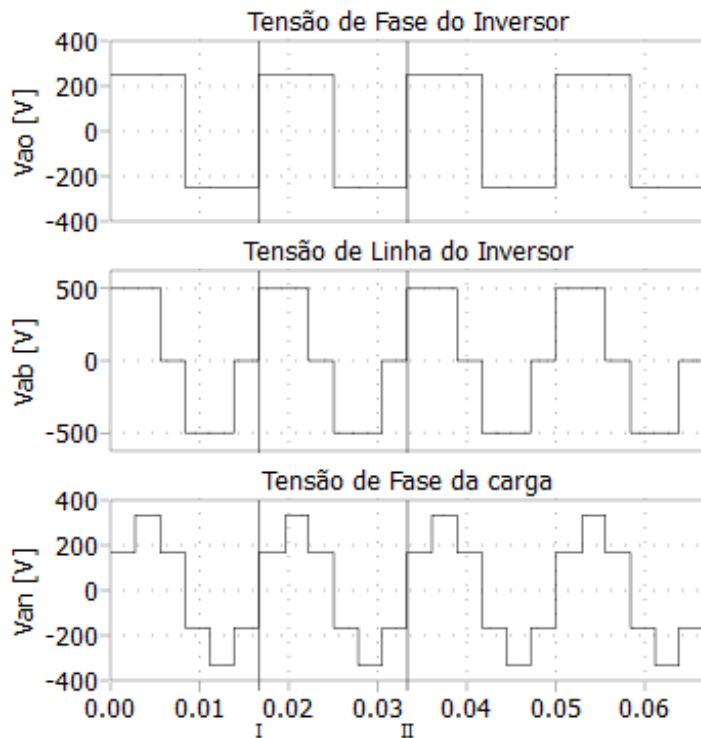
- ✓ Os pares de chaves (S₁,S₂), (S₃, S₄) e (S₅, S₆) devem ser complementares a fim de evitar um curto-circuito no barramento;
- ✓ Se as chaves forem comutadas com a frequência da rede elétrica, a forma de onda da tensão é quadrada;

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



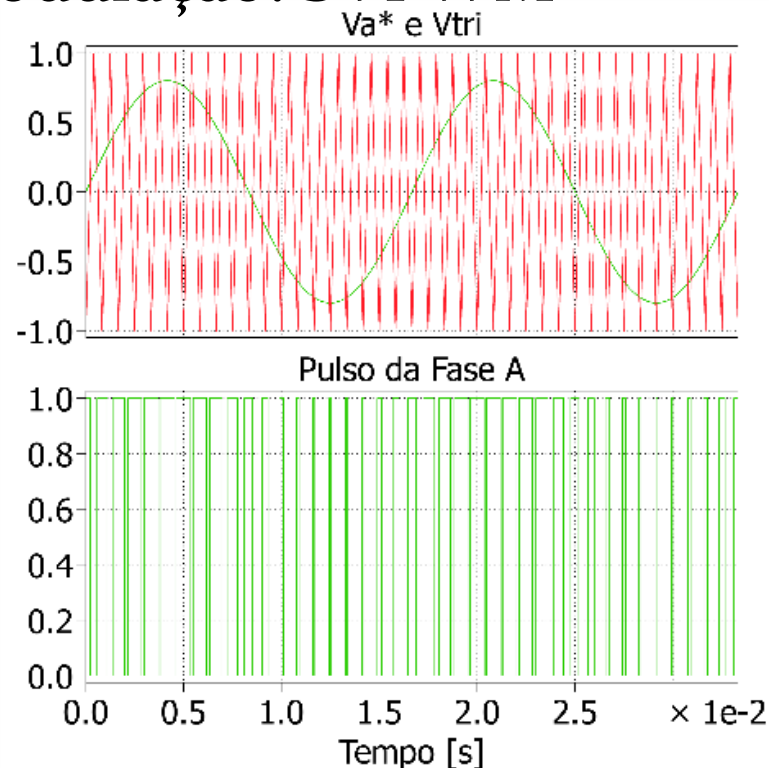
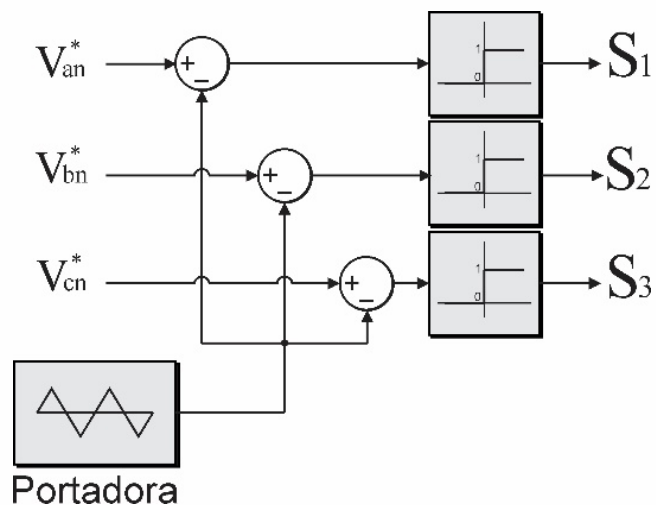
✓ A componente fundamental da tensão sintetizada por fase pelo inversor $v_{ao,f}$ vale:

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

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.

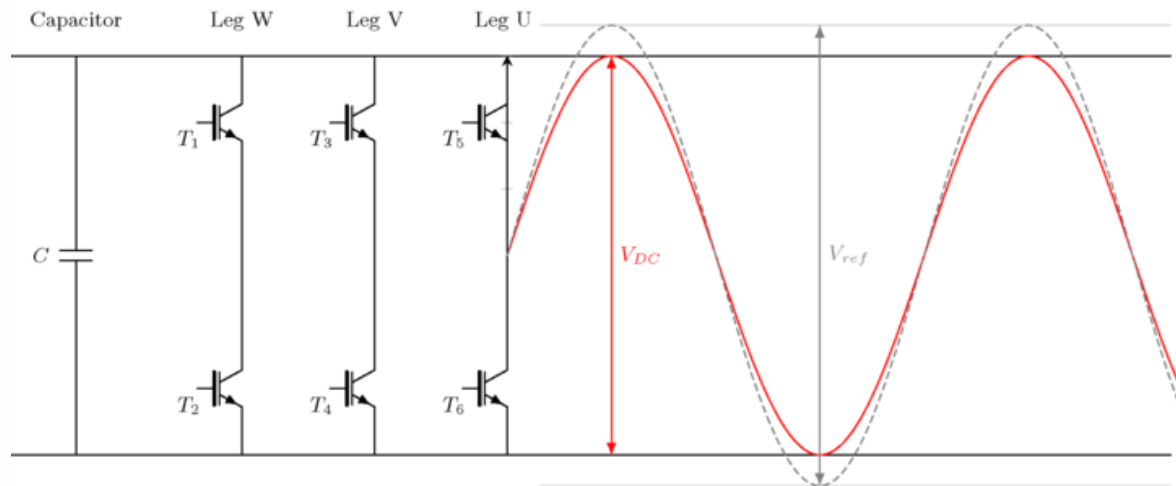
Estratégias de modulação: SVPWM



- ✓ 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.

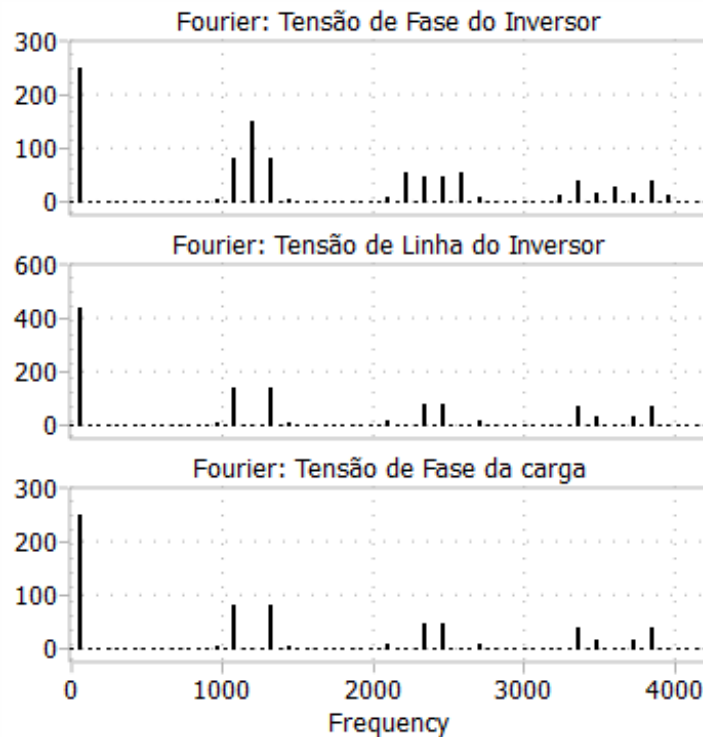
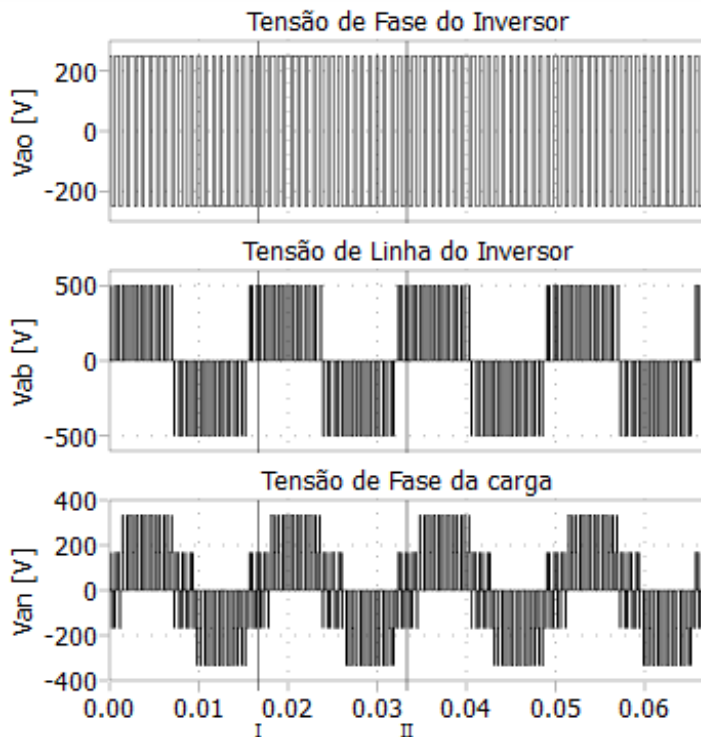
Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ 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:

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

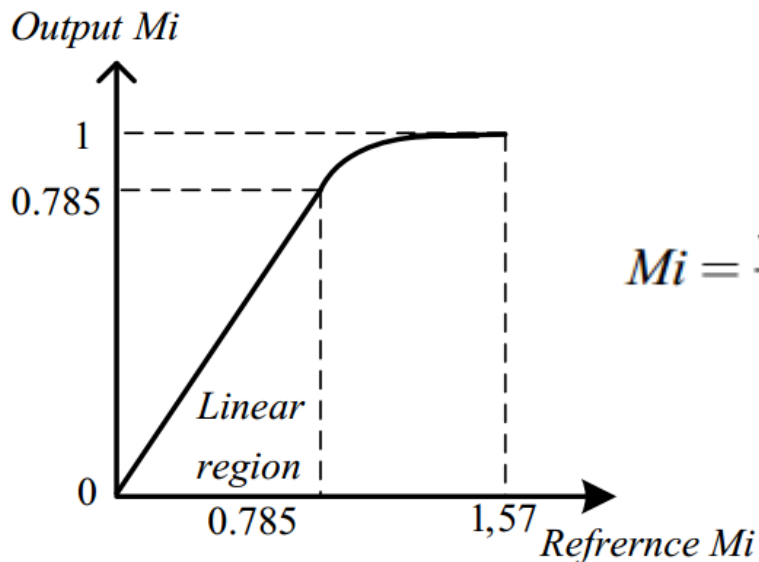
- ✓ Define-se o índice de modulação como sendo

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

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

O que acontece na região não linear?

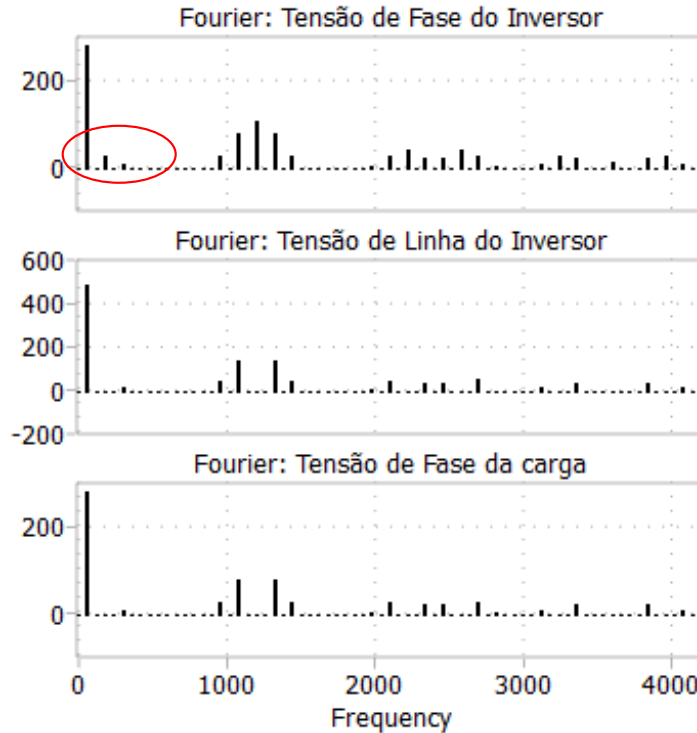
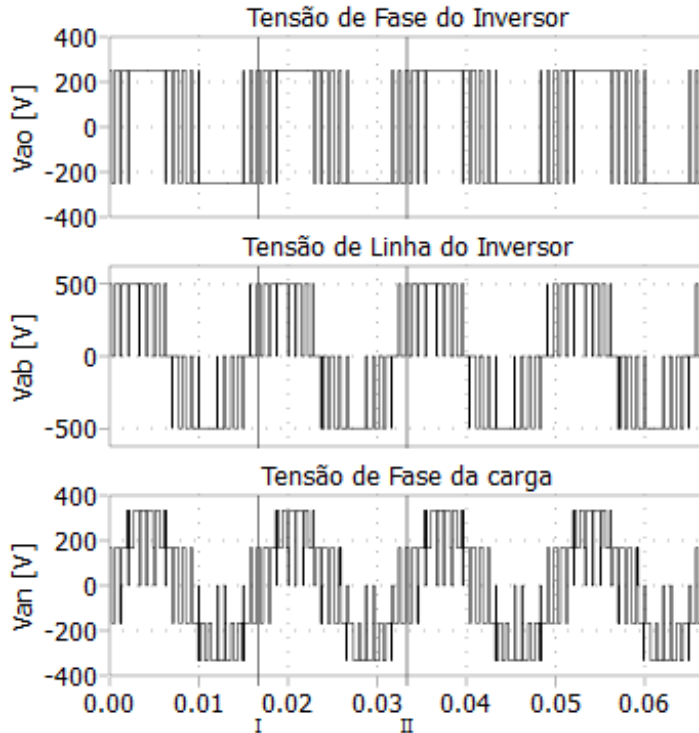
- ✓ Quando a amplitude da referência se torna maior que a amplitude da portadora, ocorre um fenômeno conhecido como sobremodulação.
- ✓ Nesta região, a relação entre a tensão sintetizada e a amplitude da referência não é mais linear.
- ✓ Além disso, harmônicos de baixa frequência aparecem no sinal sintetizado.



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

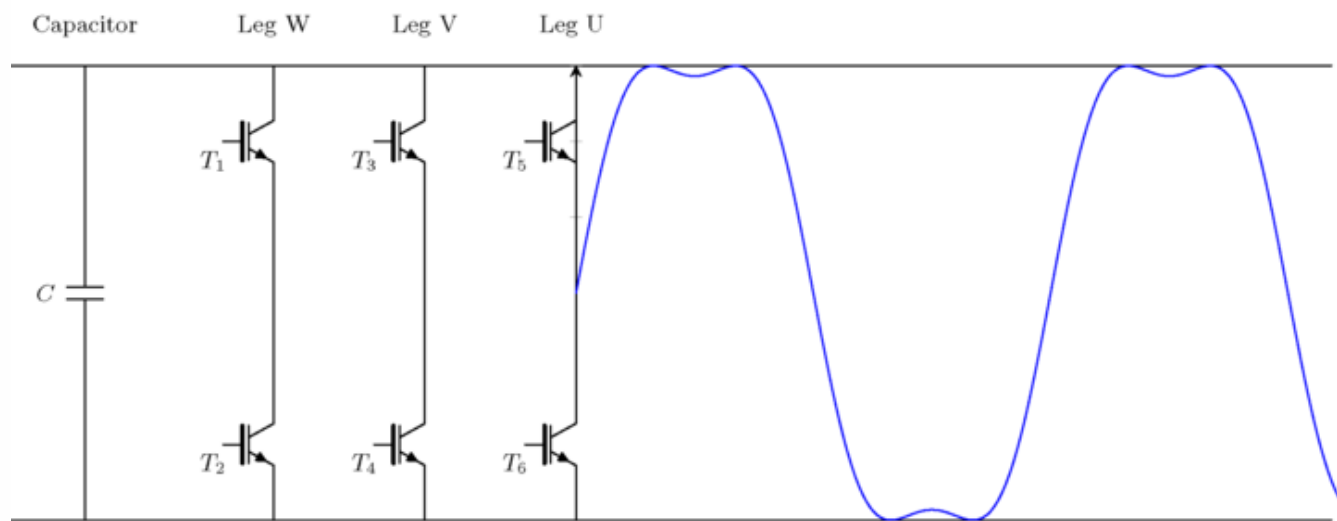
Exemplo:

- ✓ 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;



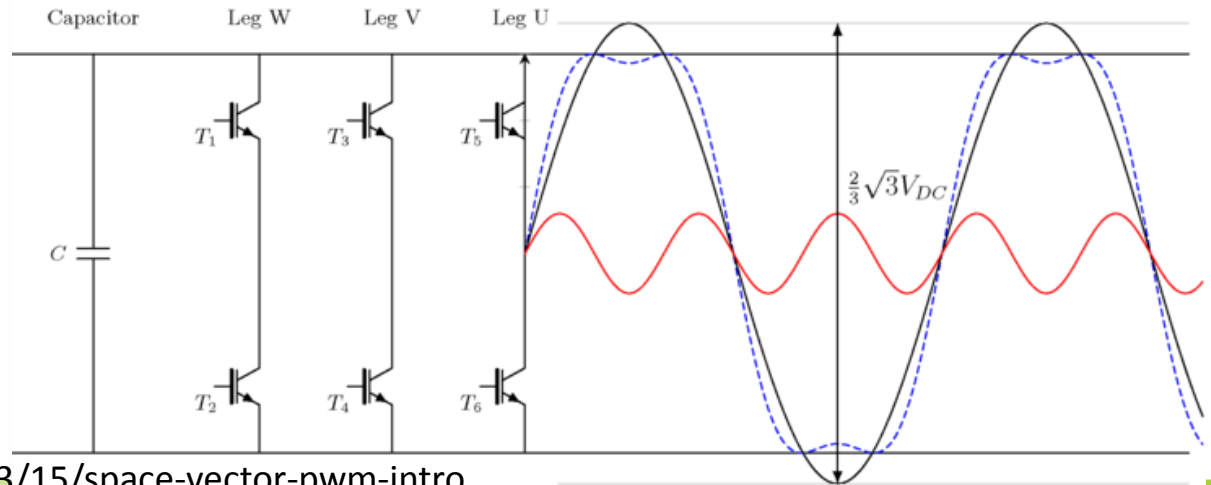
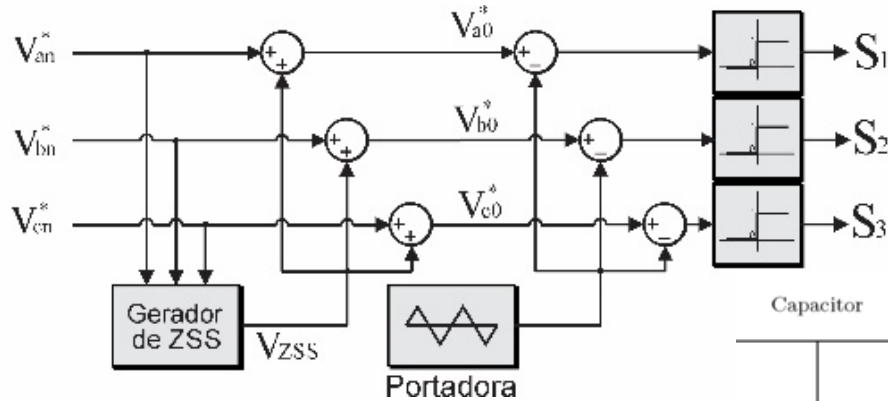
Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

- ✓ 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.



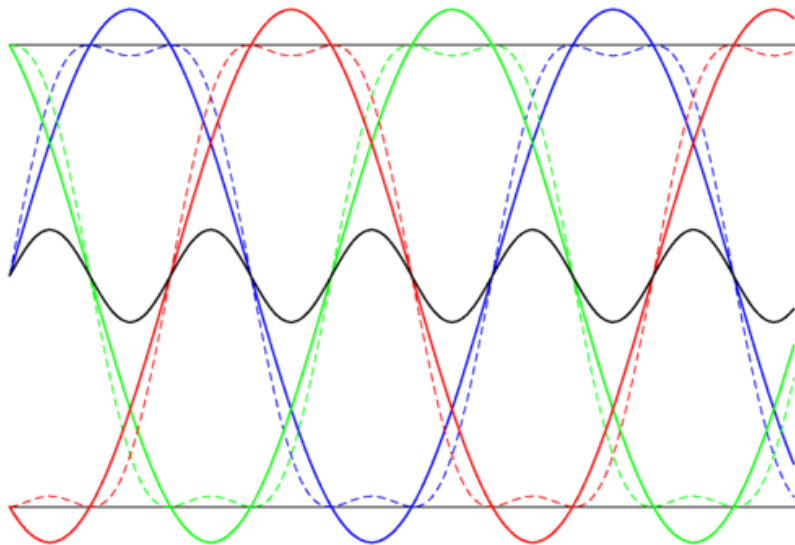
Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

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



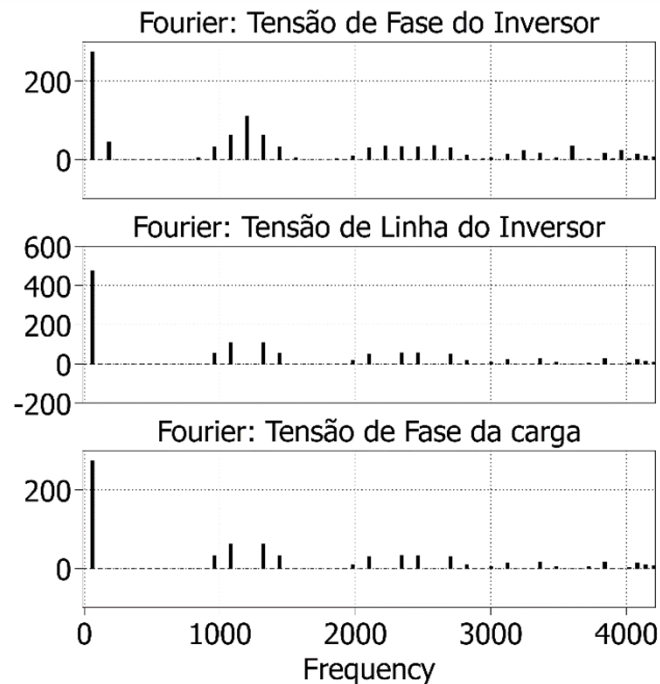
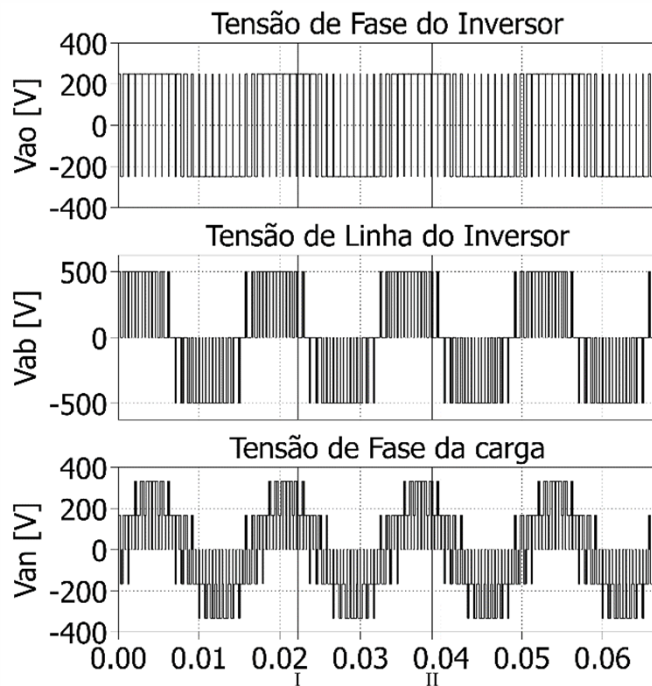
Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

- ✓ 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.

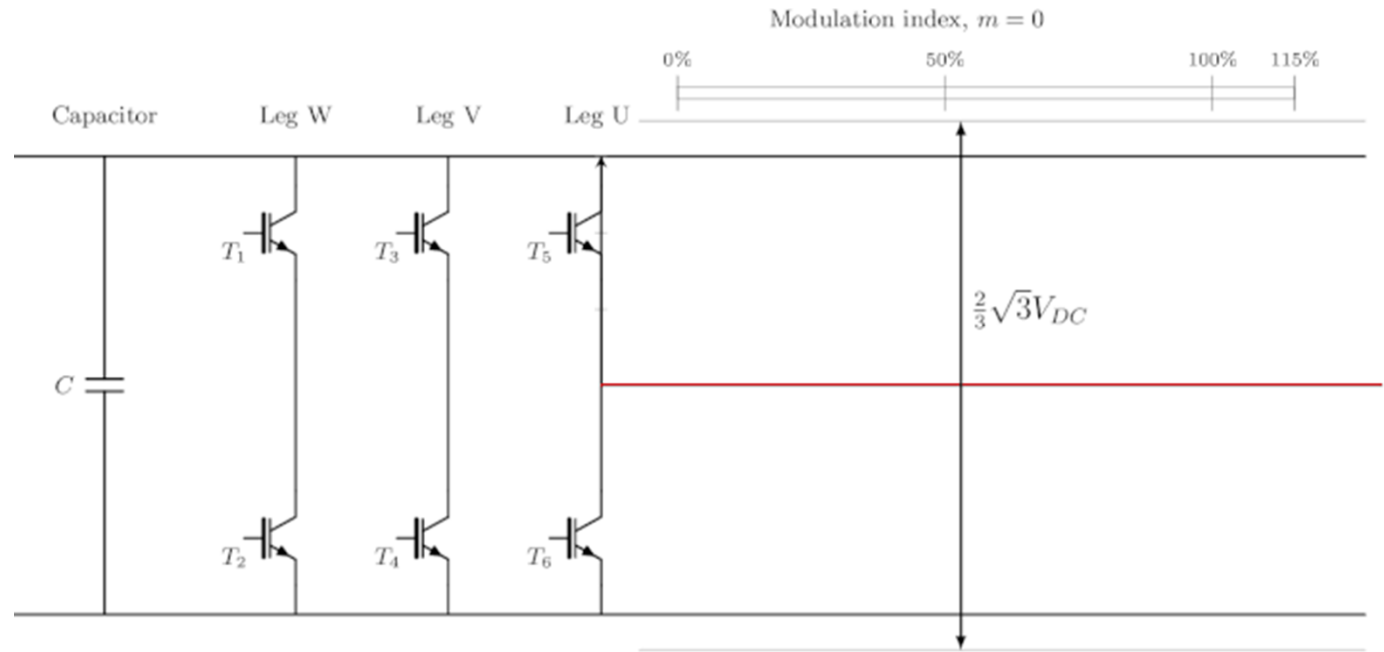


Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

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

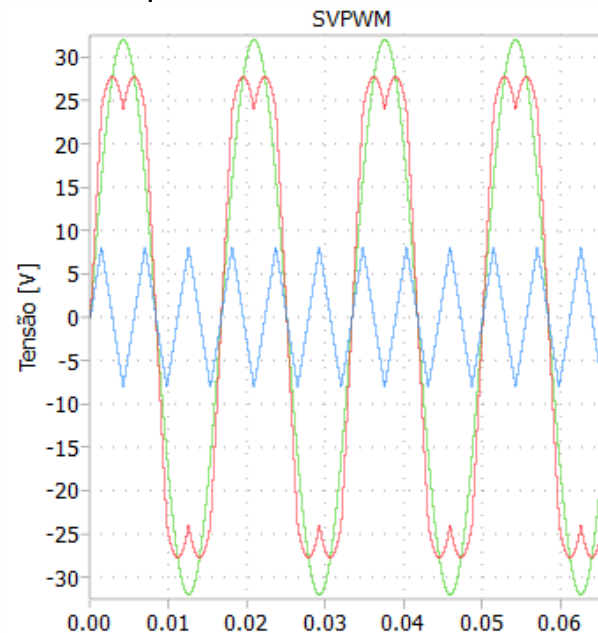
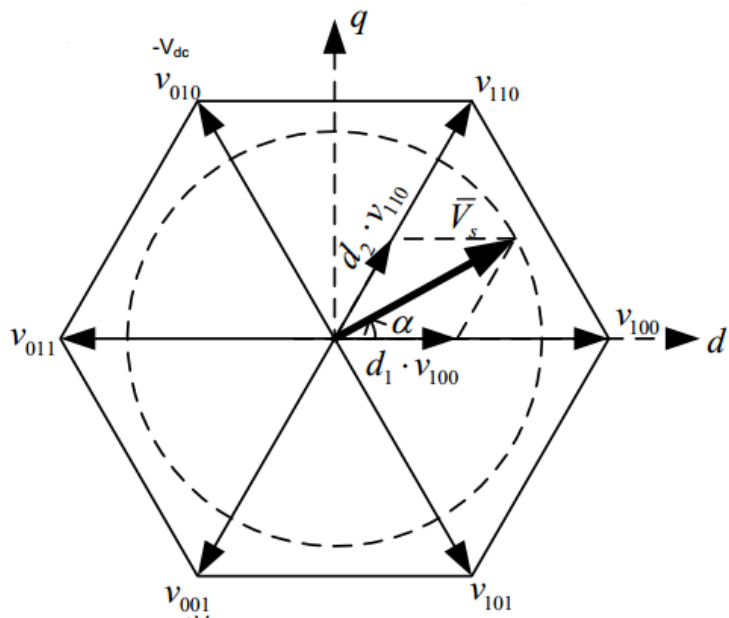


Estratégias de modulação: Inserção de seq. zero

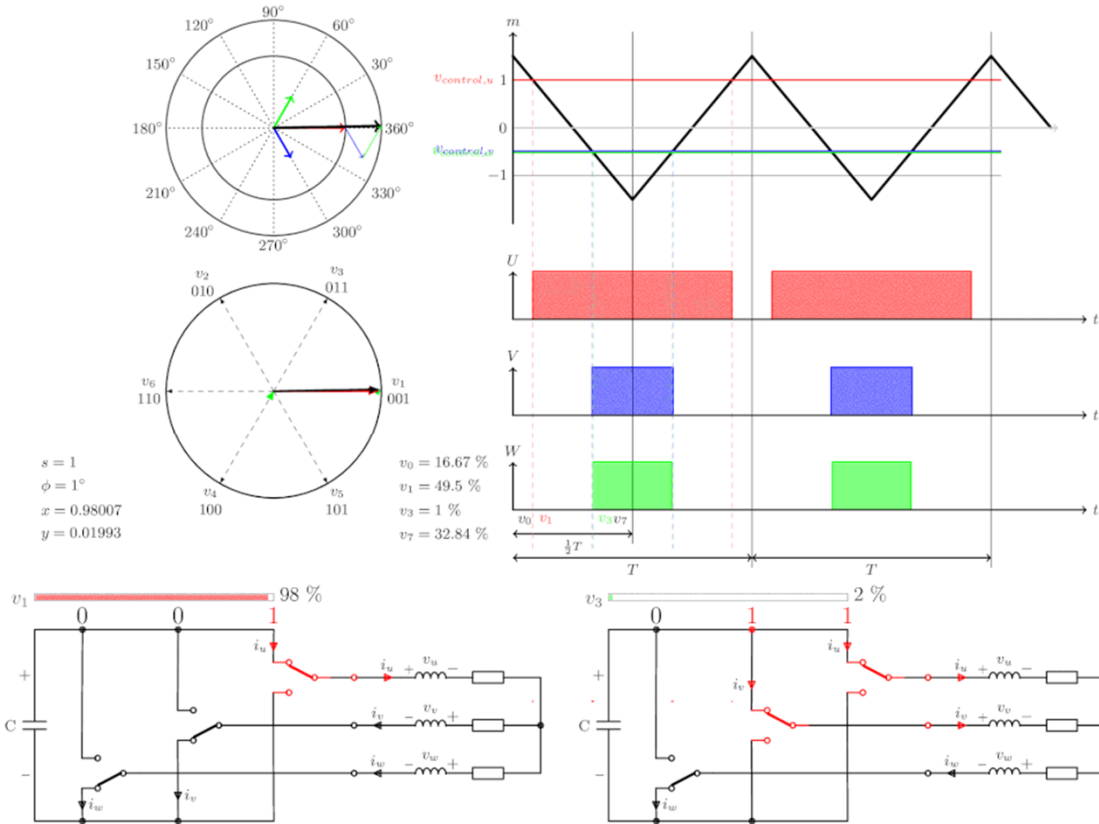


Estratégias de modulação: SVPWM

- ✓ 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

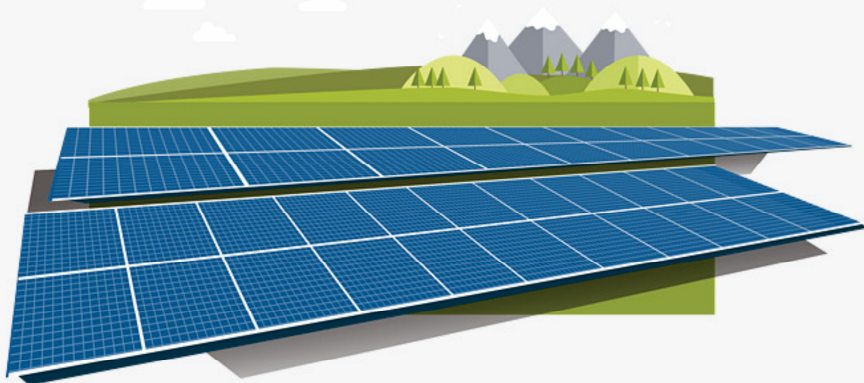
E-mail: heverton.pereira@ufv.br



Modelagem e Controle de Sistemas Fotovoltaicos

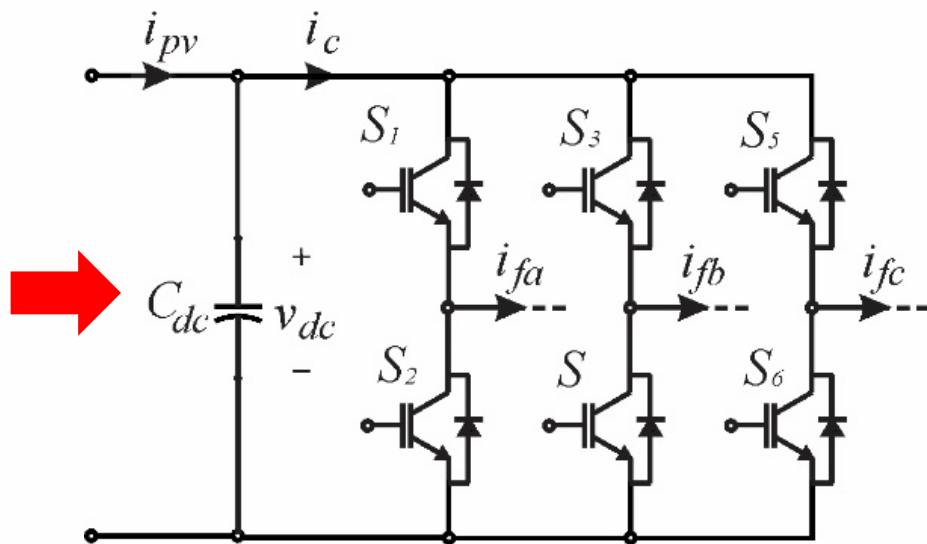
Aula 05 – P3: Conversor CC/CA Inversor Fotovoltaico – Projeto Barramento CC

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



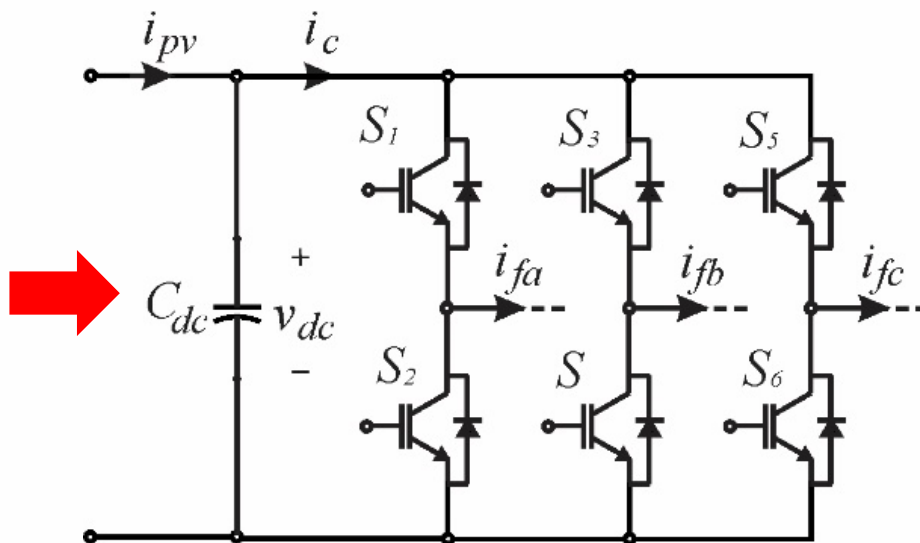
Barramento cc do inversor

- ✓ 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



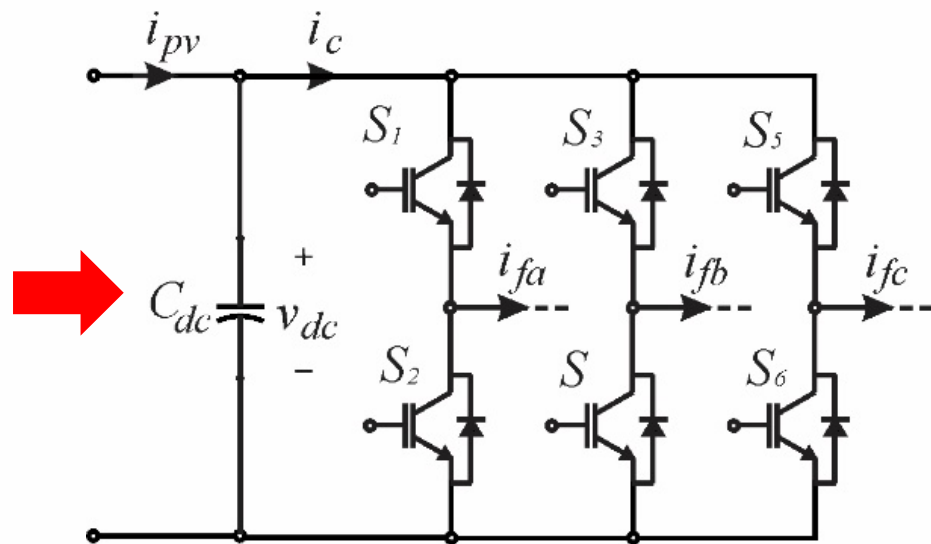
Barramento cc do inversor

- ✓ 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:

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

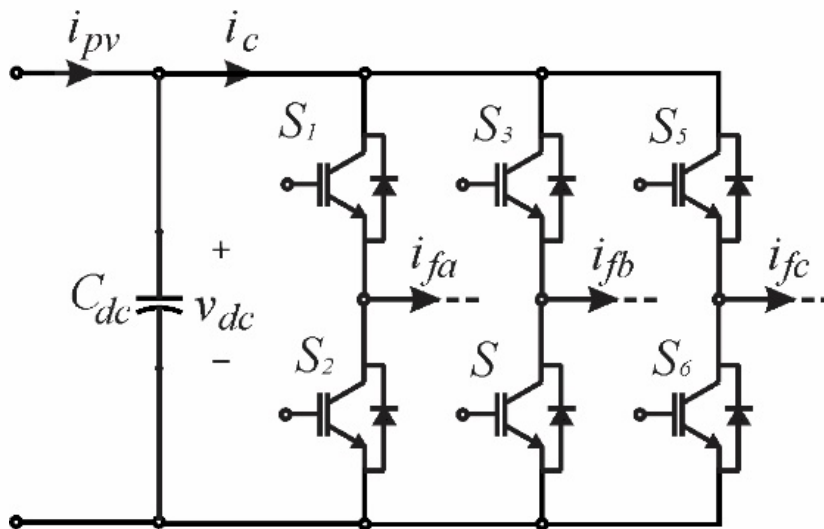
$$\frac{0,88 v_{dc}}{\sqrt{3}} = 1,139\hat{V}_g \Leftrightarrow \boxed{v_{dc} = 2,24 \hat{V}_g}.$$

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.

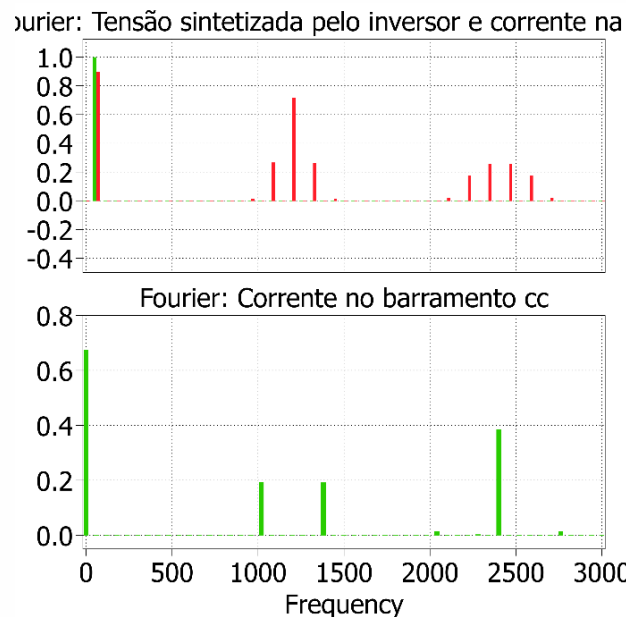
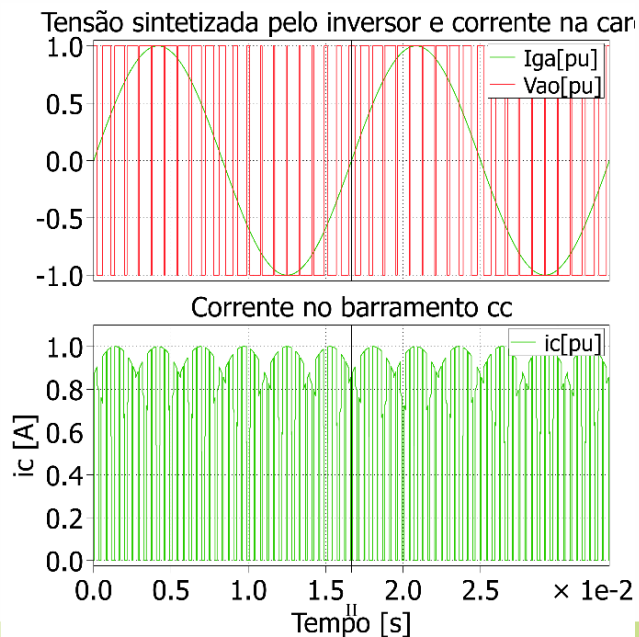
$$i_c = d_1 i_a + d_2 i_b + d_3 i_c.$$

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



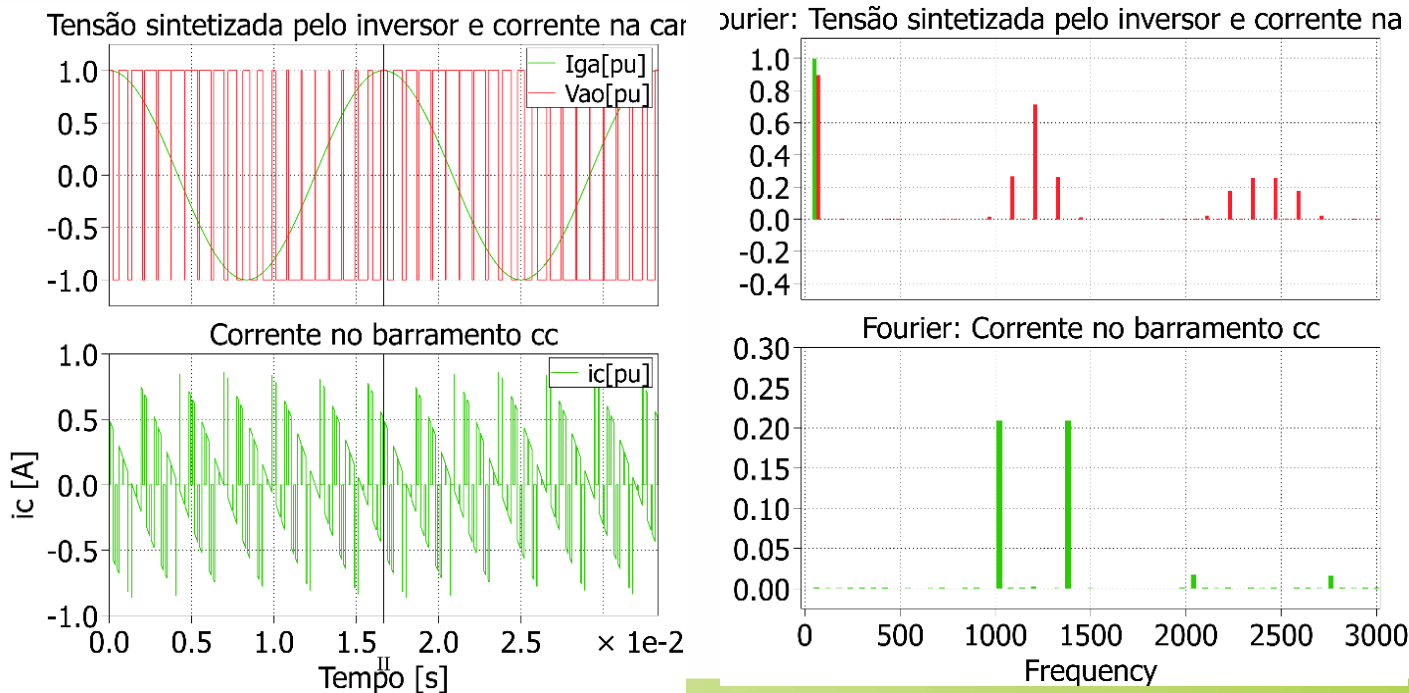
Barramento cc do inversor: Considerações de projeto

- ✓ 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 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.



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, ω é a frequência da rede elétrica e Δv_{dc} é a máxima variação de barramento permitida pelo projeto, denominada muitas vezes pelo termo ripple.



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

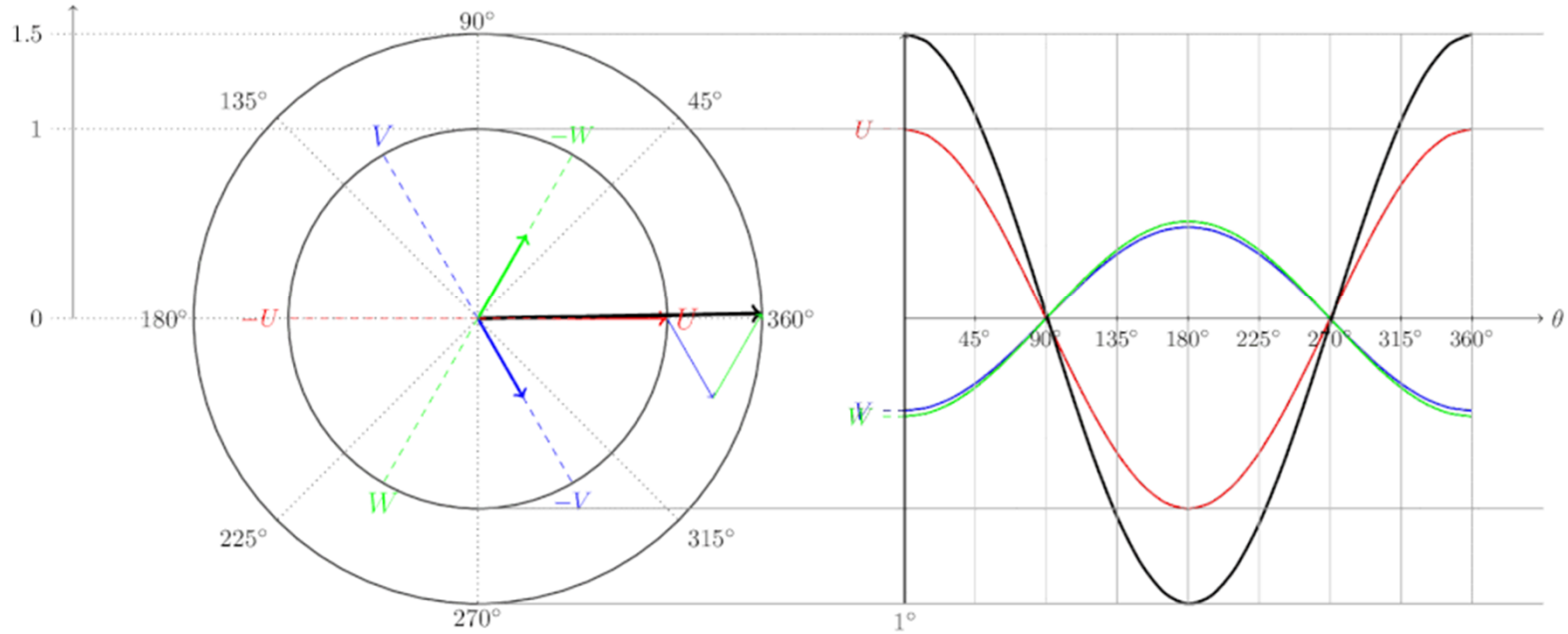
Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

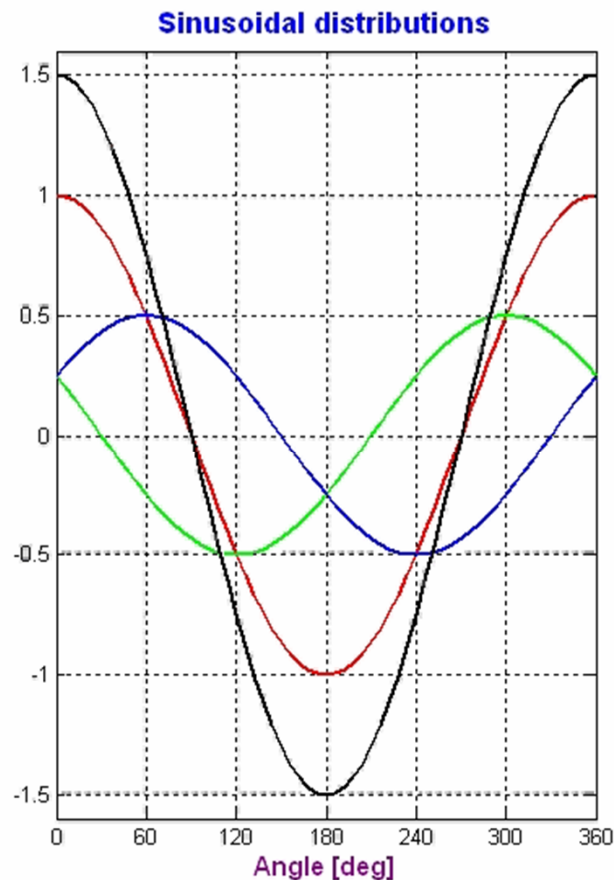
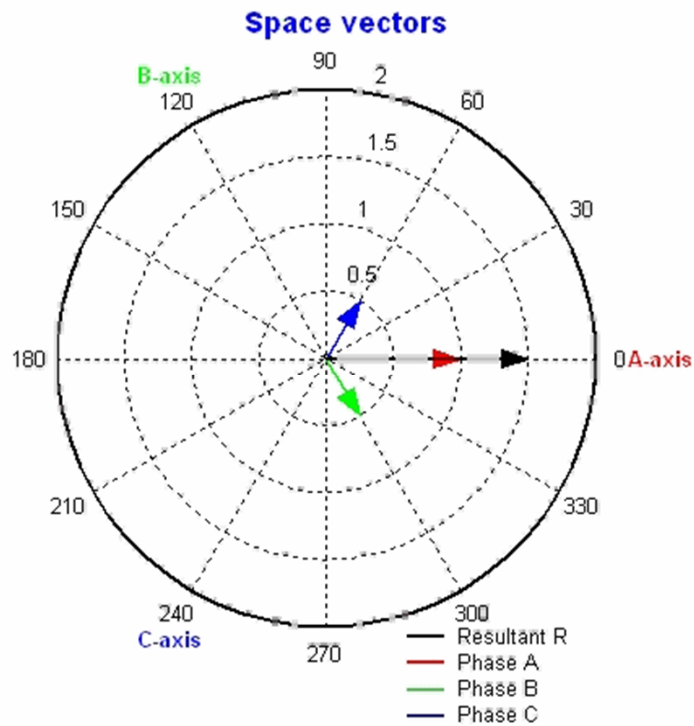
Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

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

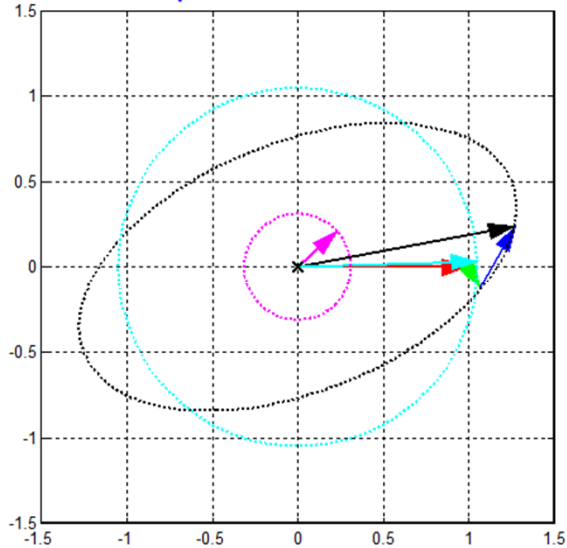
E-mail: heverton.pereira@ufv.br

Three-phased sinusoidal system and its rotating equivalent space vector

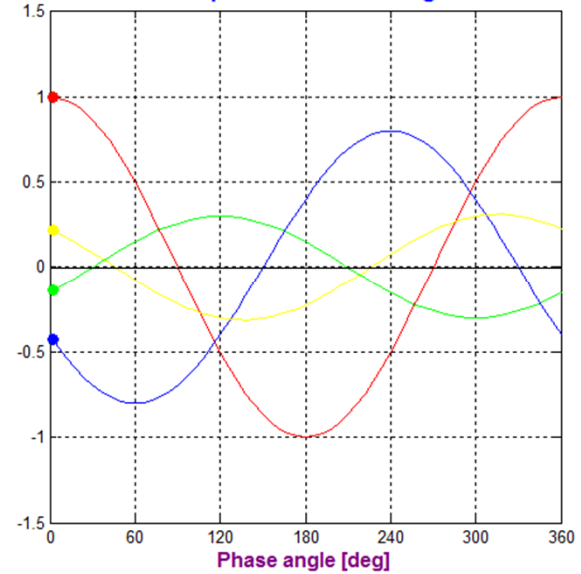




Space vectors in motion



Three-phase sinusoidal signal



Phase A Phase B Phase C Resultant
 Positive sequence Negative sequence Zero sequence

<http://people.ece.umn.edu/users/riaz/animations/spacevecunbalanced.html>