



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PEA3504 – Lab. Qualidade de Energia**

# **Aplicações de Inversores**

**Lourenço Matakas Junior  
Wilson Komatsu**

**Versão setembro/2018**

**PEA – Depto. Eng. Energia e Automação Elétricas**

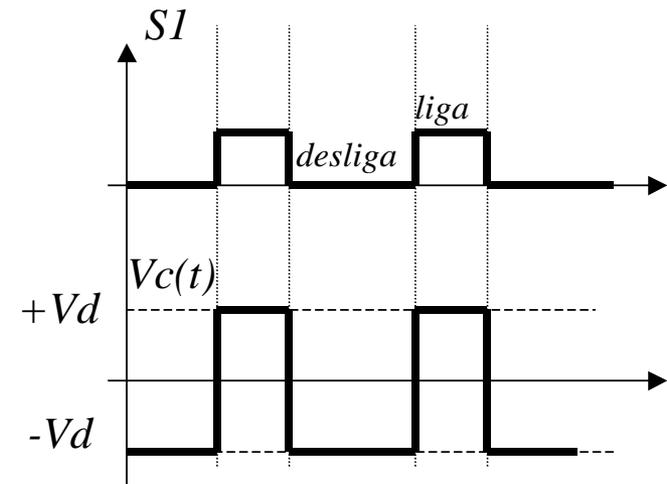
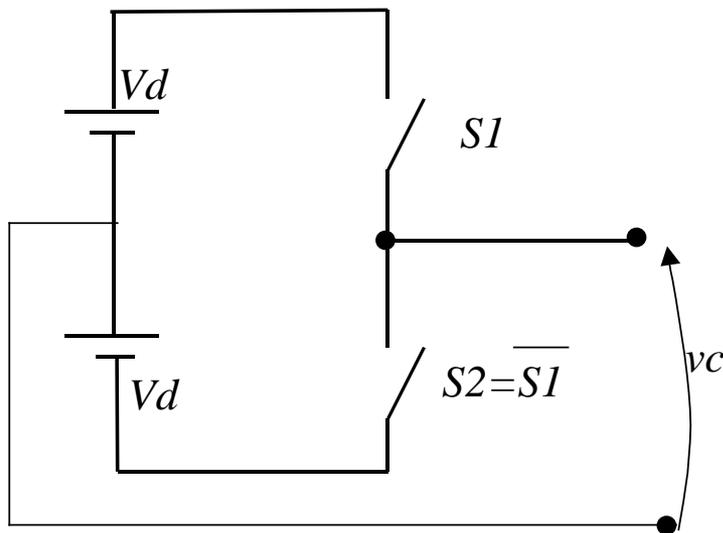


# Aplicações de Inversores

- Conversores Fonte de Tensão (VSC)
  - Conversores (inversores) VSC auto-comutados
  - Implementação das chaves eletrônicas
  - Modo de operação chaveado (ON/OFF)
  - Operação em PWM
  - Fonte de tensão ou fonte de corrente
  - Associação de conversores
- Aplicações
  - STATCOM
  - Retificador com alto fator de potência
  - Filtros ativos de harmônicas



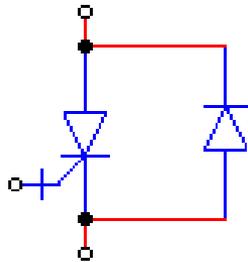
# Inversor tipo fonte de tensão monofásico (meia ponte ou *half bridge*)



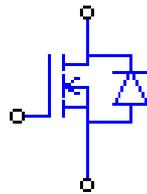
Dois níveis de tensão



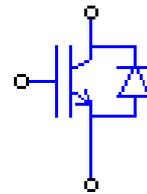
# Fonte de tensão: Implementação das chaves



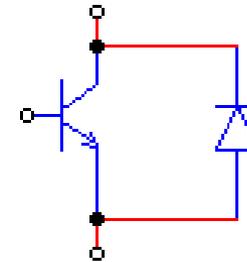
GTO



MOSFET



IGBT

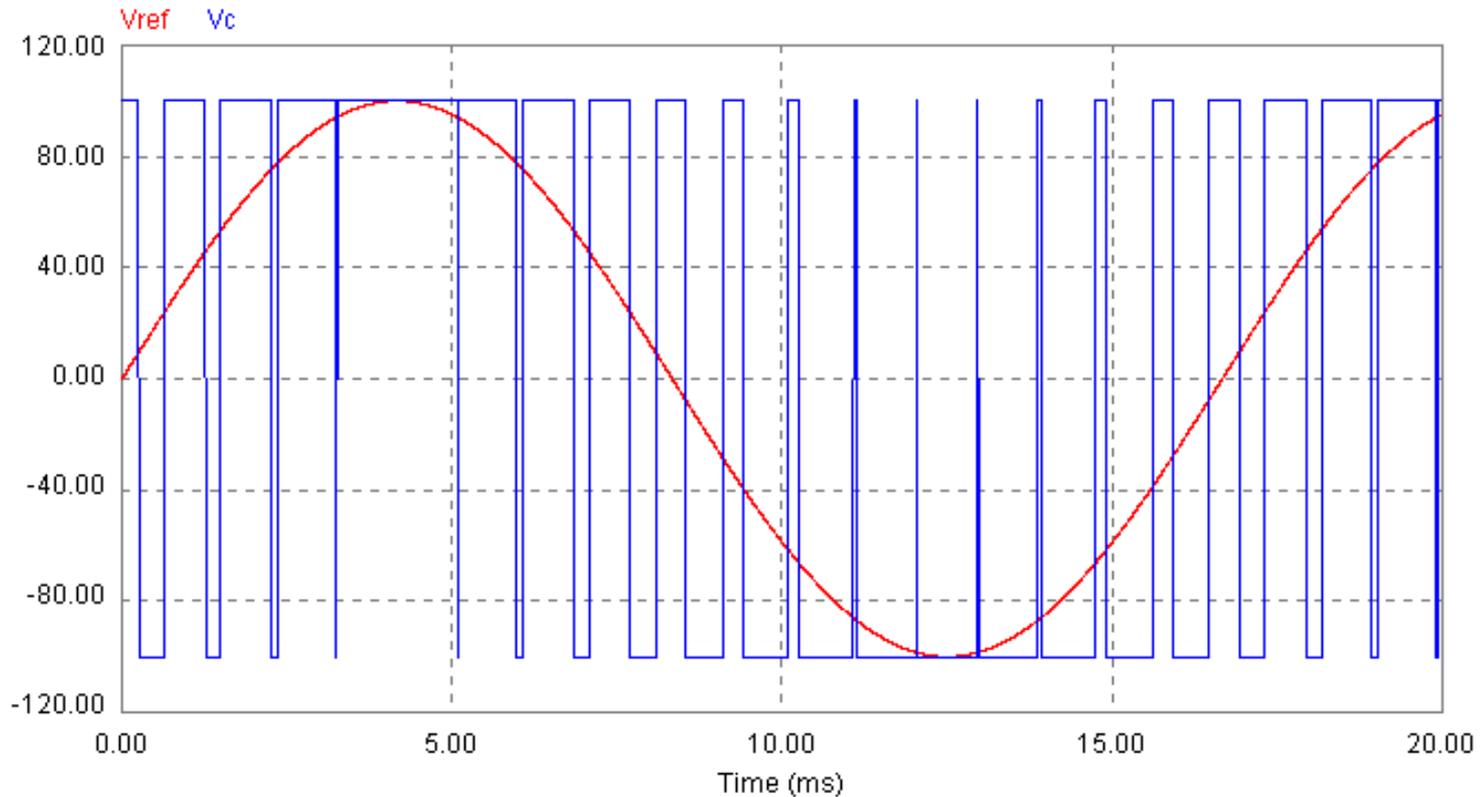


transistor bipolar

Chaves na implementação como fonte de tensão:  
Bidirecional em corrente e unidirecional em tensão



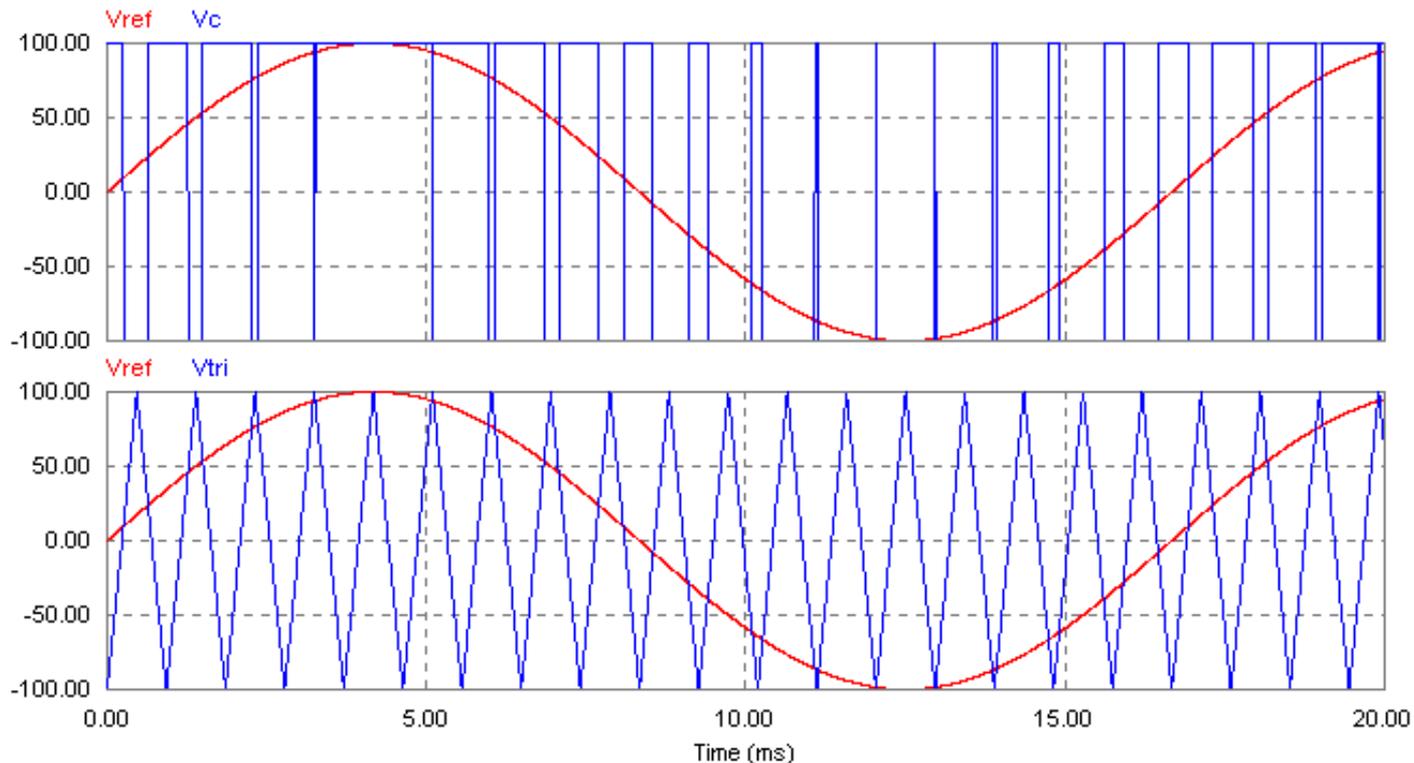
# Operação com Modulação PWM



- $V_{ref}$ : tensão desejada na saída do conversor
- $V_c$ : Tensão na saída do conversor



# Geração do Sinal PWM



- Estratégia baseada na comparação de  $V_{ref}$  com portadora triangular (*natural sampling*)

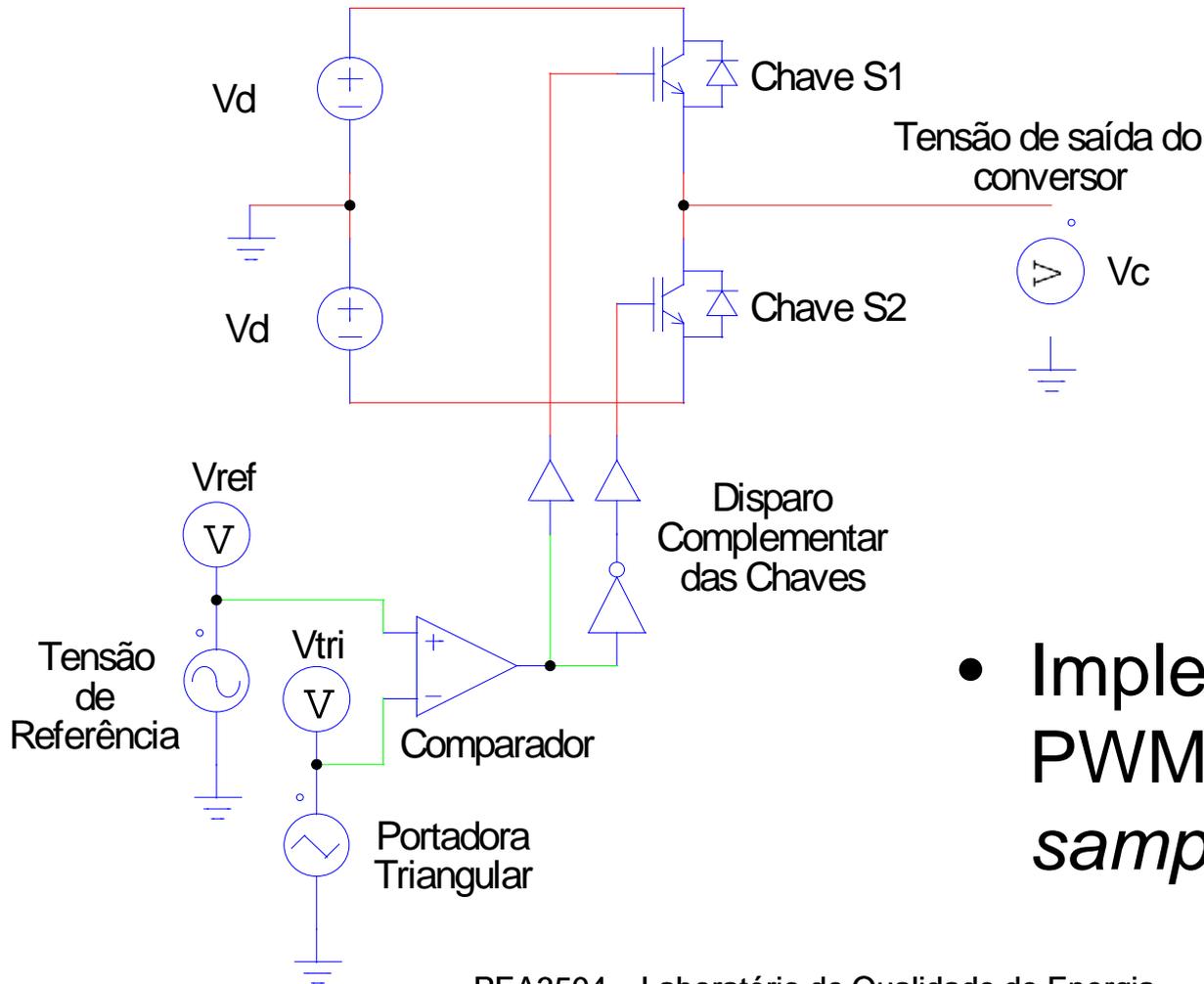


# PWM com Portadora Triangular

- Frequência de chaveamento ( $f_m$ ) fixa
- Implementação simples (*natural sampling*)



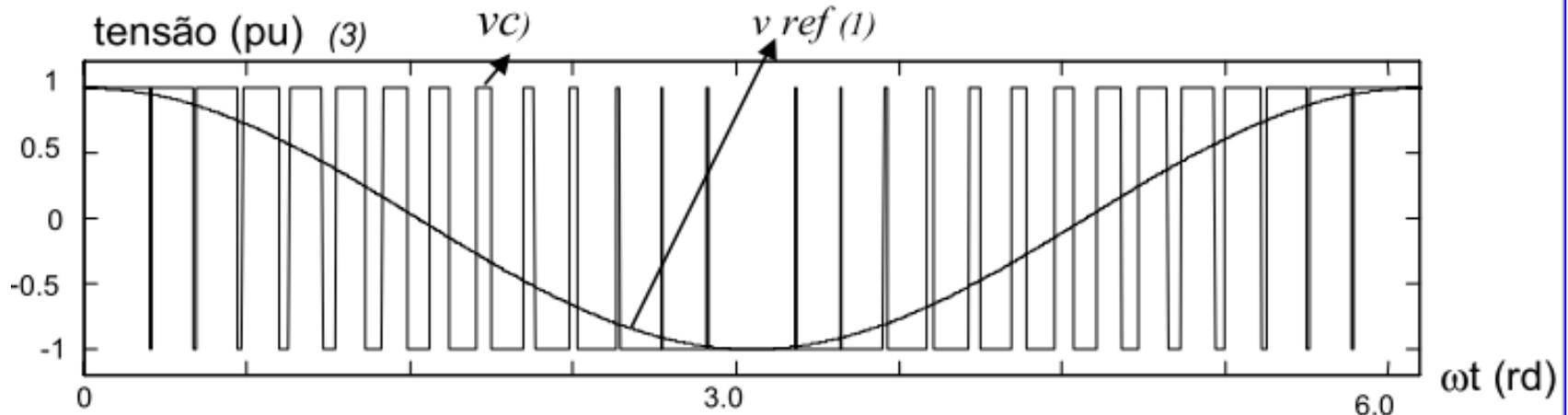
# Inversor *Half-Bridge* + Modulador PWM



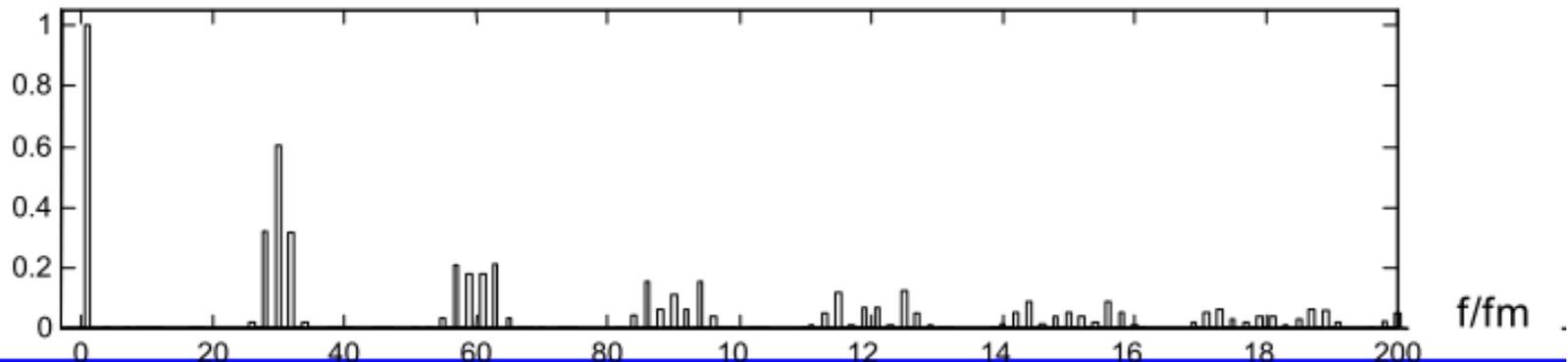
- Implementação do PWM com *natural sampling*



# Espectro do sinal PWM



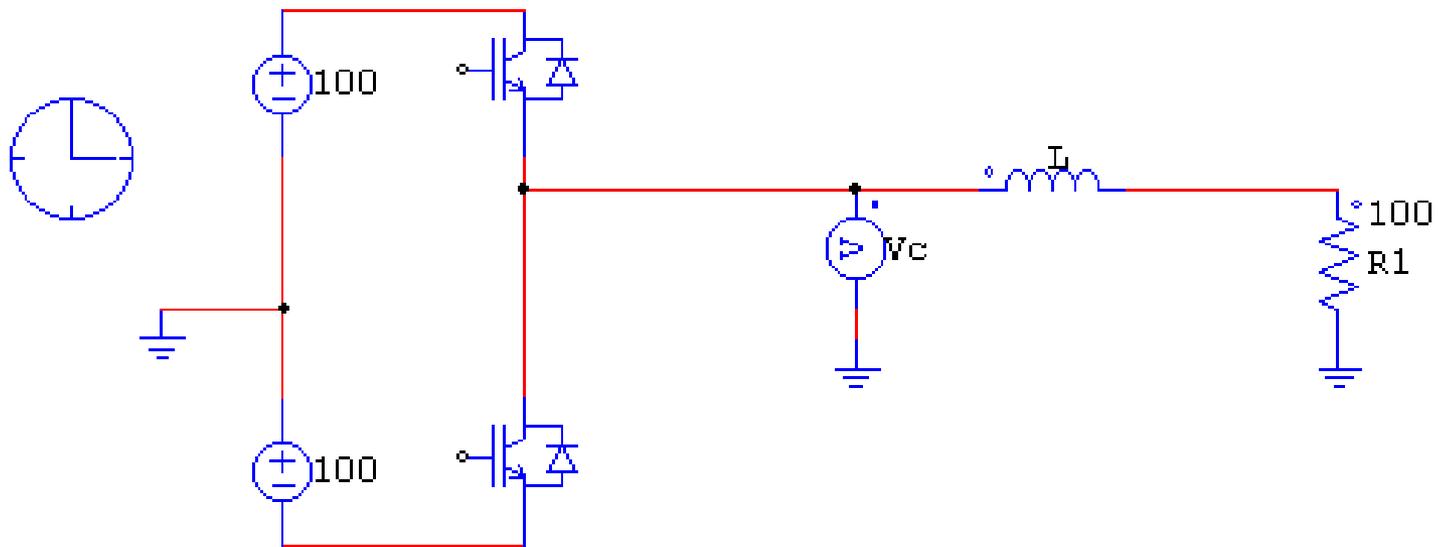
amplitude dos componentes do espectro (pu) (3)



- Referência senoidal a  $f(V_{ref})=60\text{Hz}$
- Frequência da portadora  $f_m=30*f(V_{ref})=1800\text{Hz}$



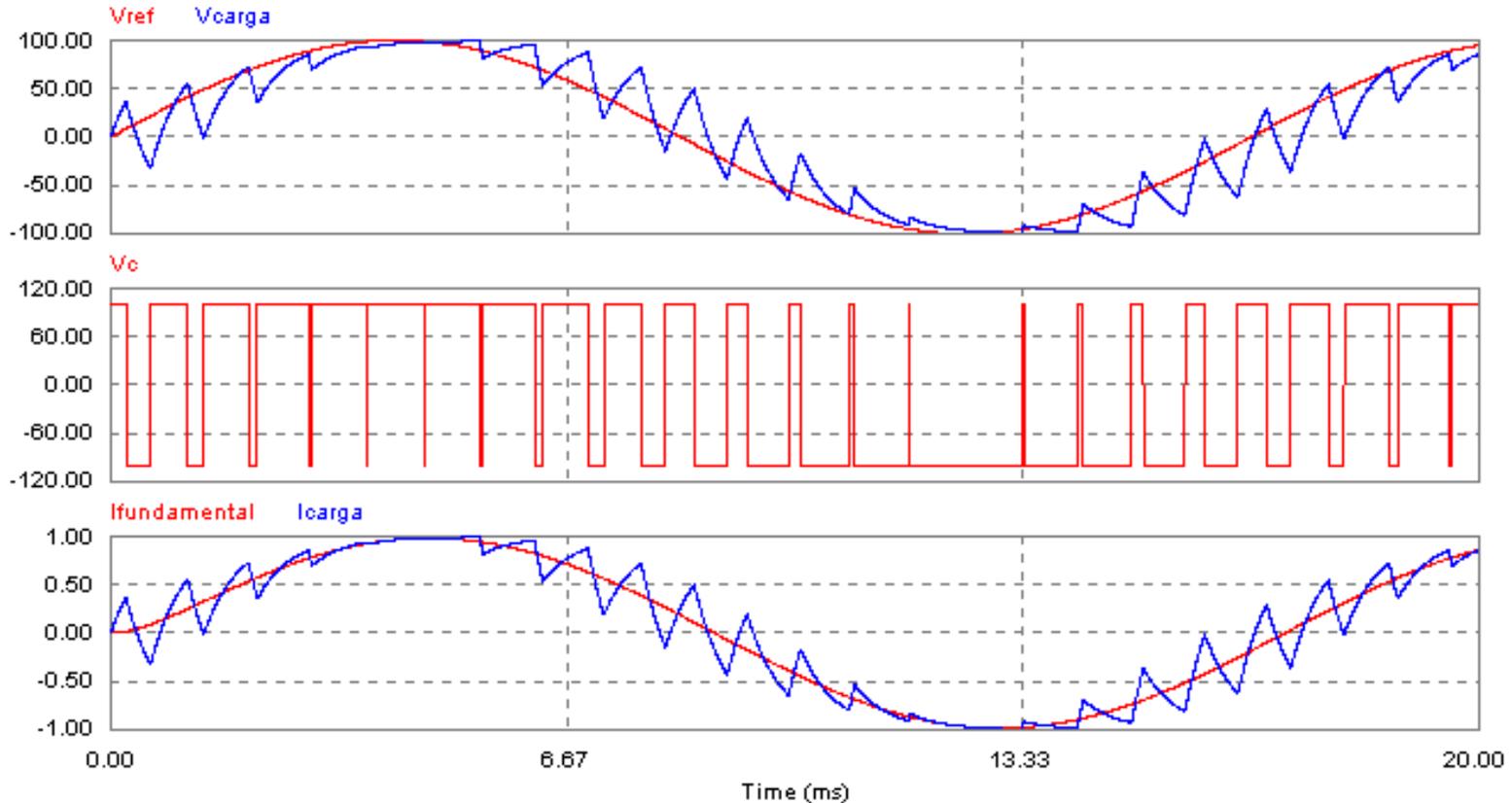
# Filtrando a corrente de saída



- Utilização de filtro L
- aplicações: acionamentos CA, filtros ativos, STATCOM, retificadores, etc.



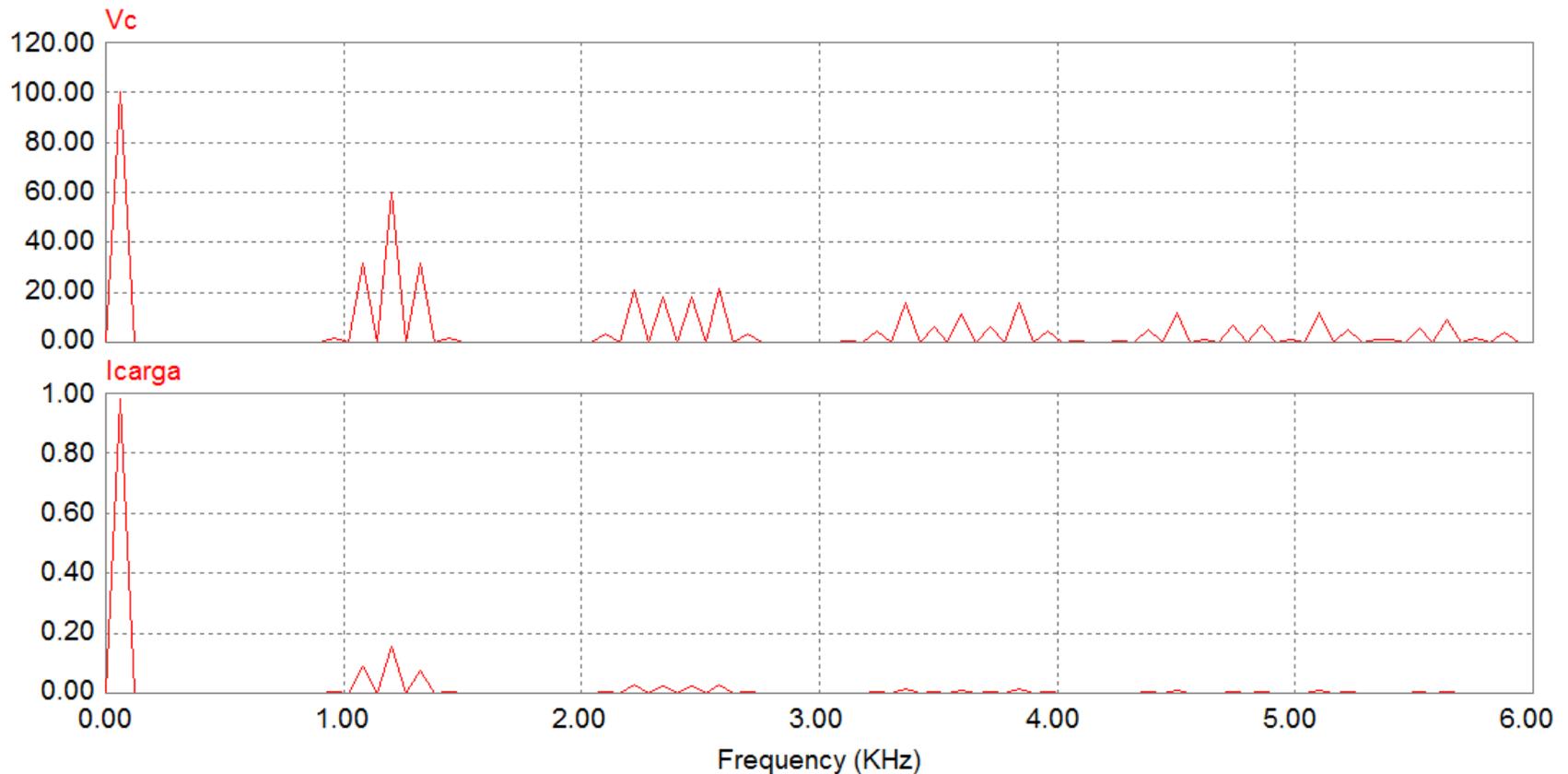
# Comportamento do Filtro L



- $L=0.05H$  ;  $f_m=1200Hz$  maior *ripple!!!*



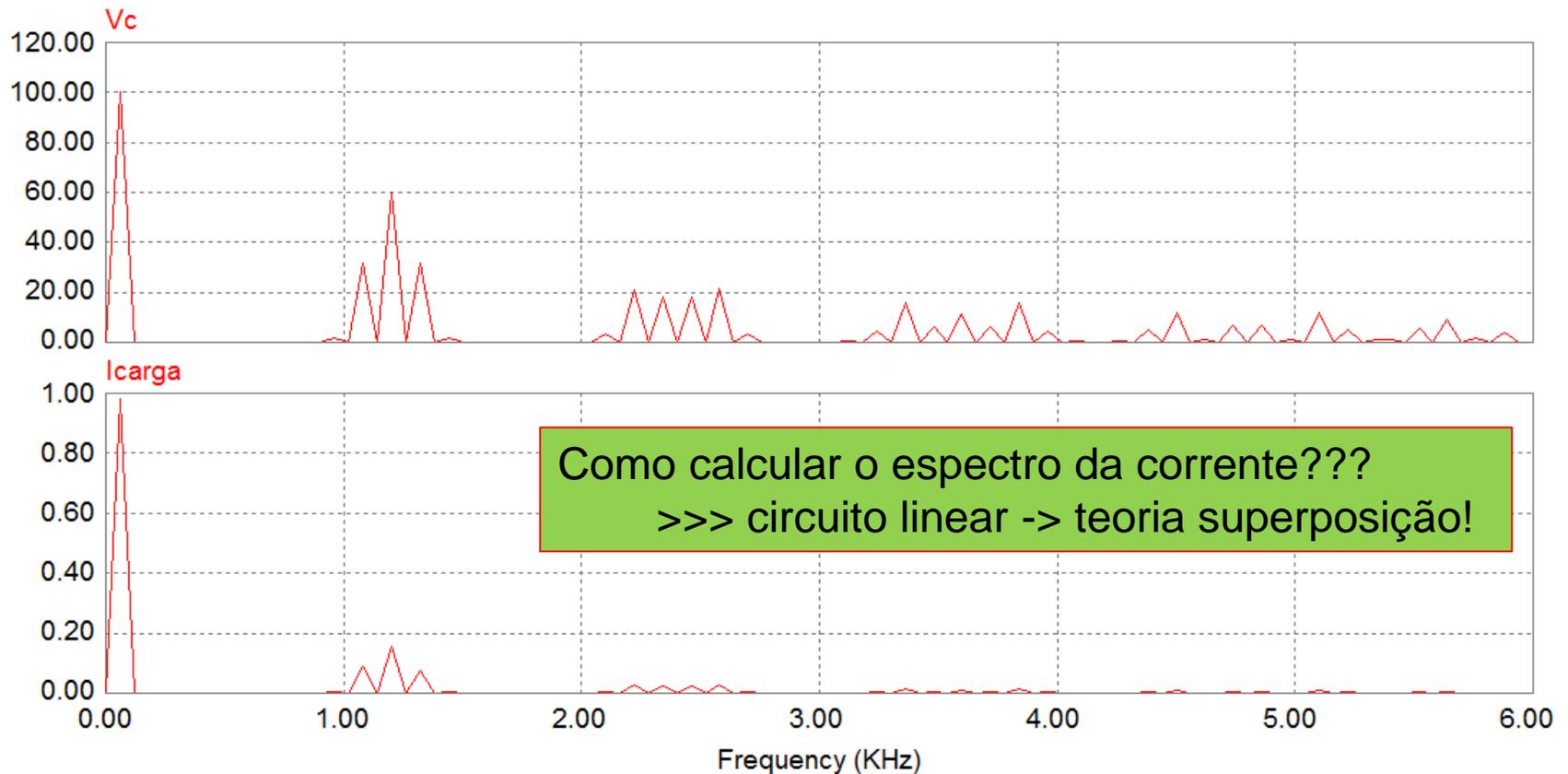
# Comportamento do Filtro L



- $L=0.05H$  ;  $f_m=1200Hz$



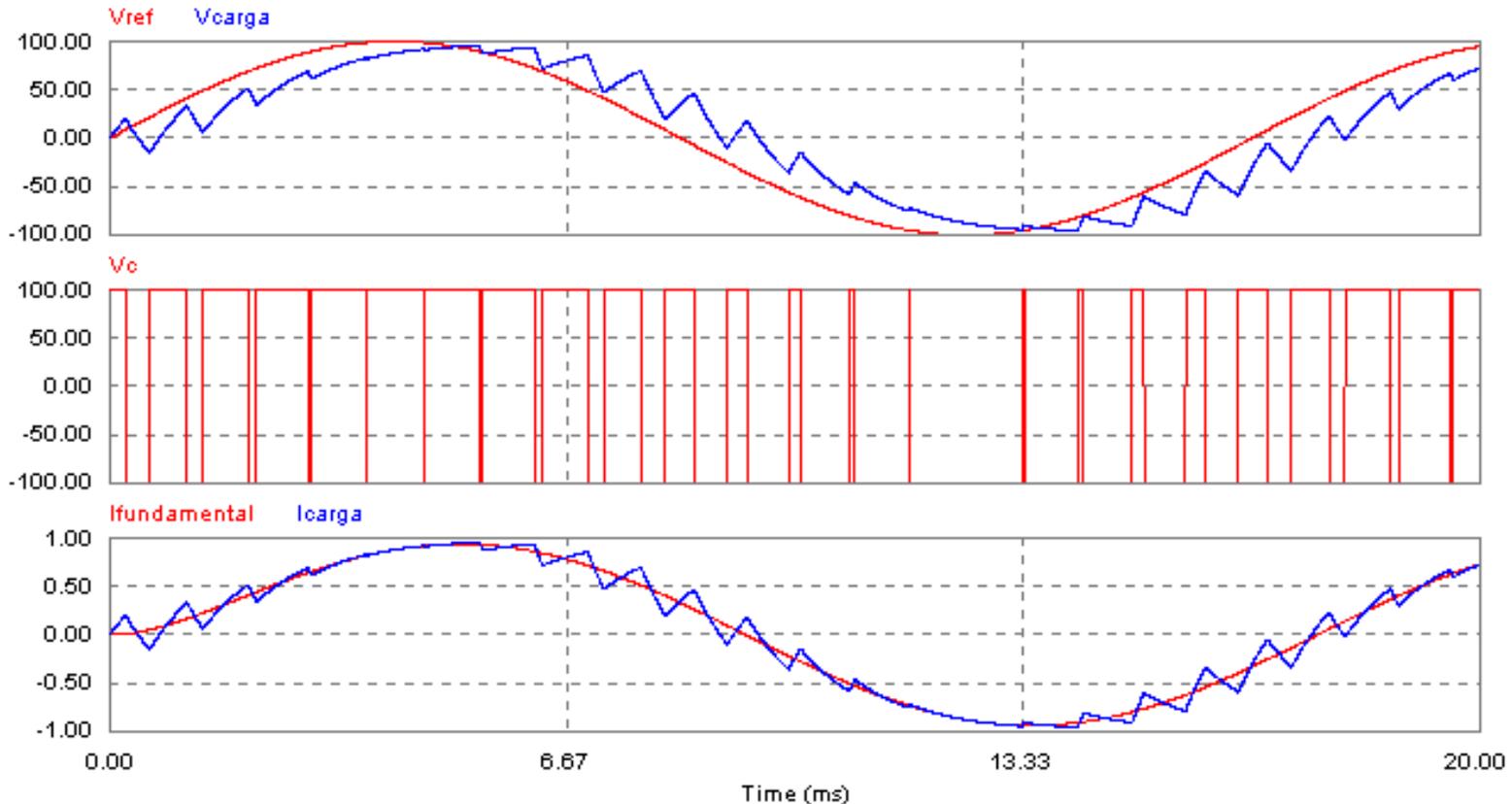
# Comportamento do Filtro L



- $L=0.05H$  ;  $f_m=1200Hz$



# Comportamento do Filtro L

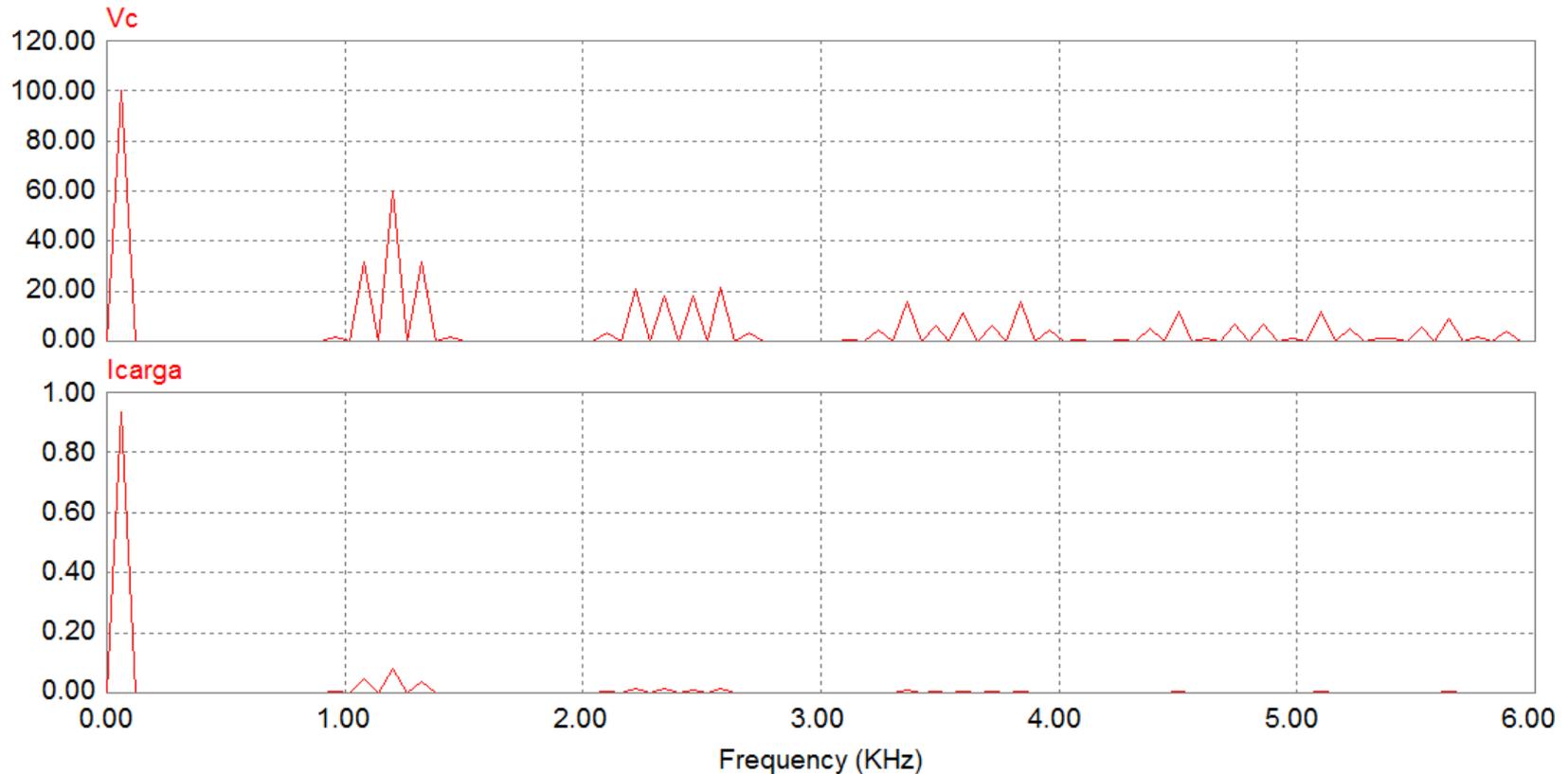


- $L=0.1\text{H}$  ;  $f_m=1200\text{Hz}$

$L \uparrow \rightarrow$  menor *ripple*!!!



# Comportamento do Filtro L

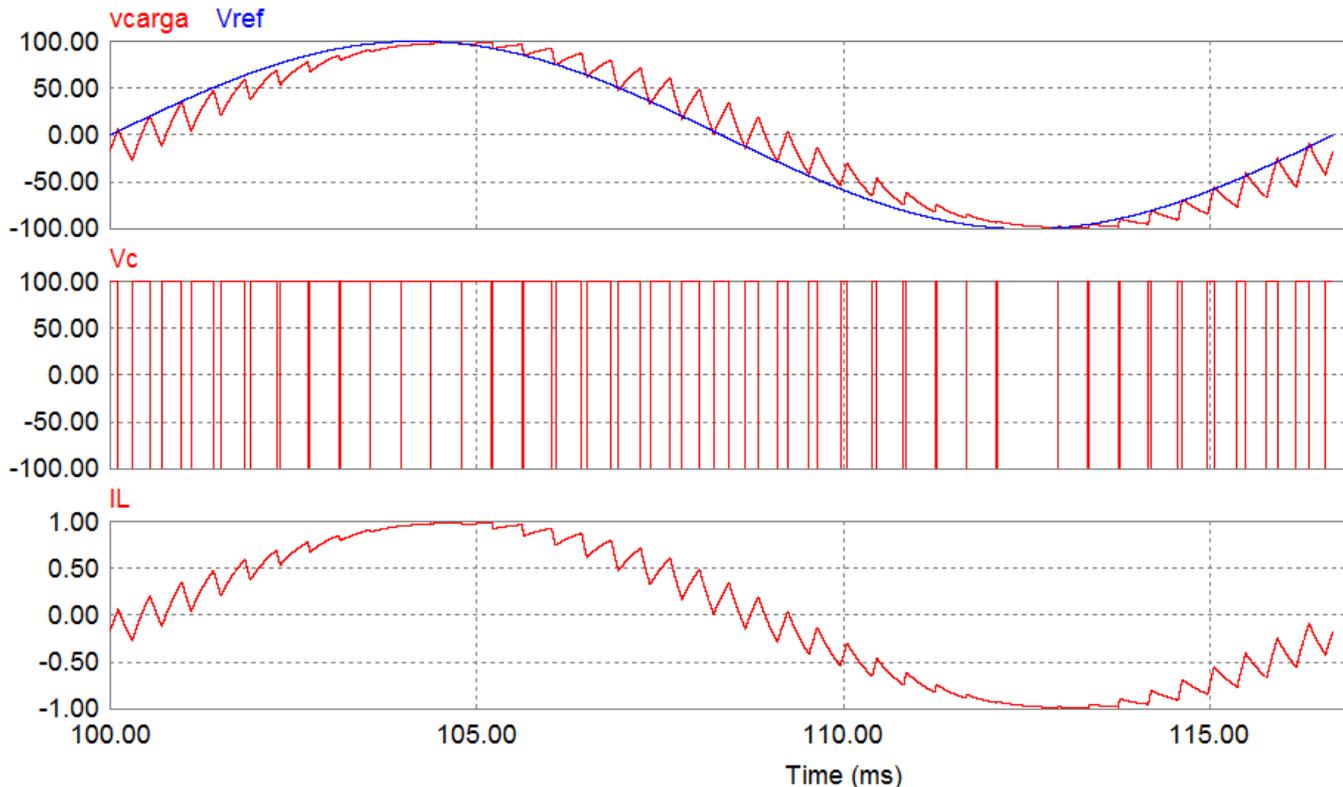


- $L=0.1H$  ;  $f_m=1200Hz$

$L \uparrow \rightarrow$  menor *ripple*!!!



# Aumento da frequência de chaveamento

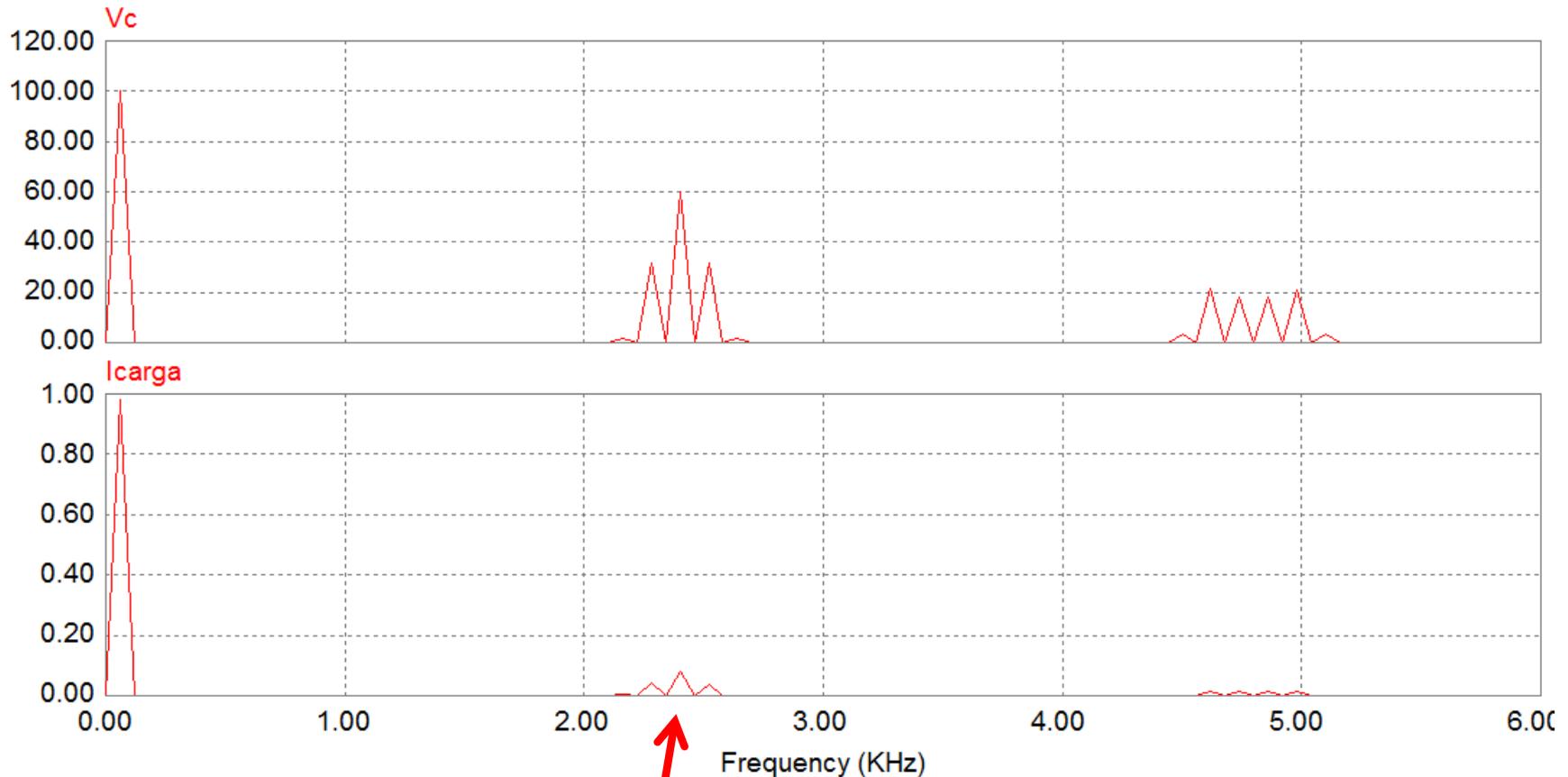


- $L=0.05H$  ;  $f_m=2400Hz$

$f_s \uparrow \rightarrow$  menor *ripple*!!!



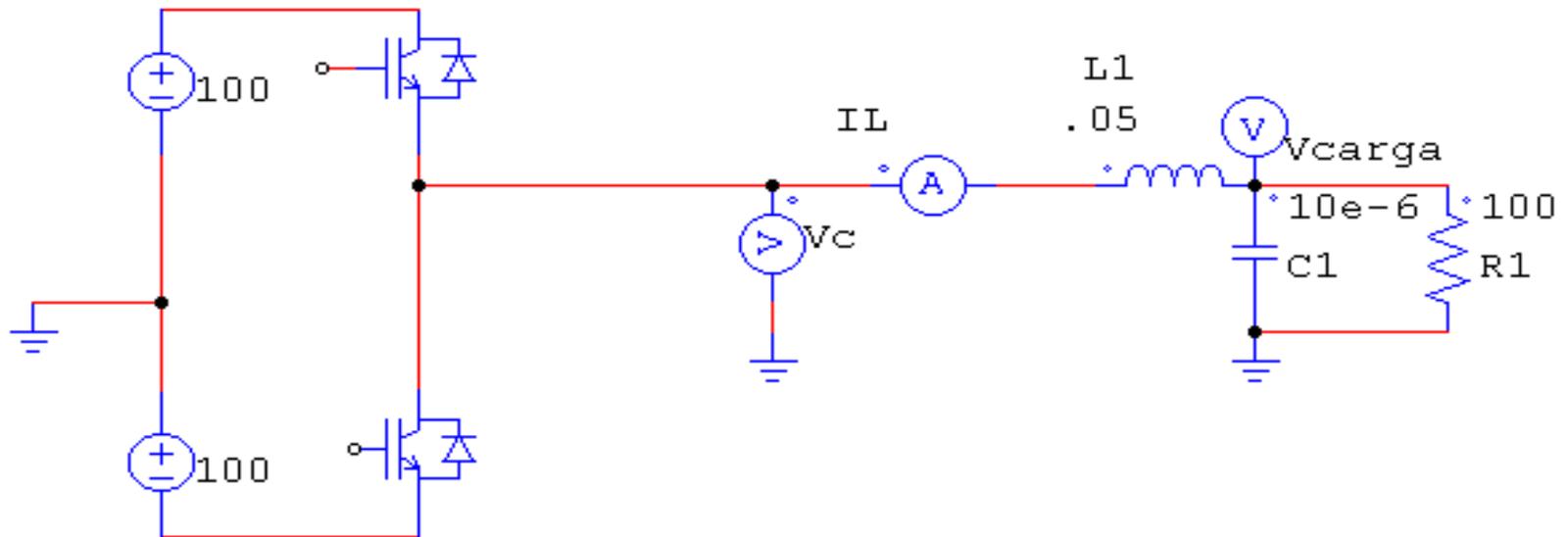
# Aumento da frequência de chaveamento



- $L=0.05H$  ;  $f_m=2400Hz$



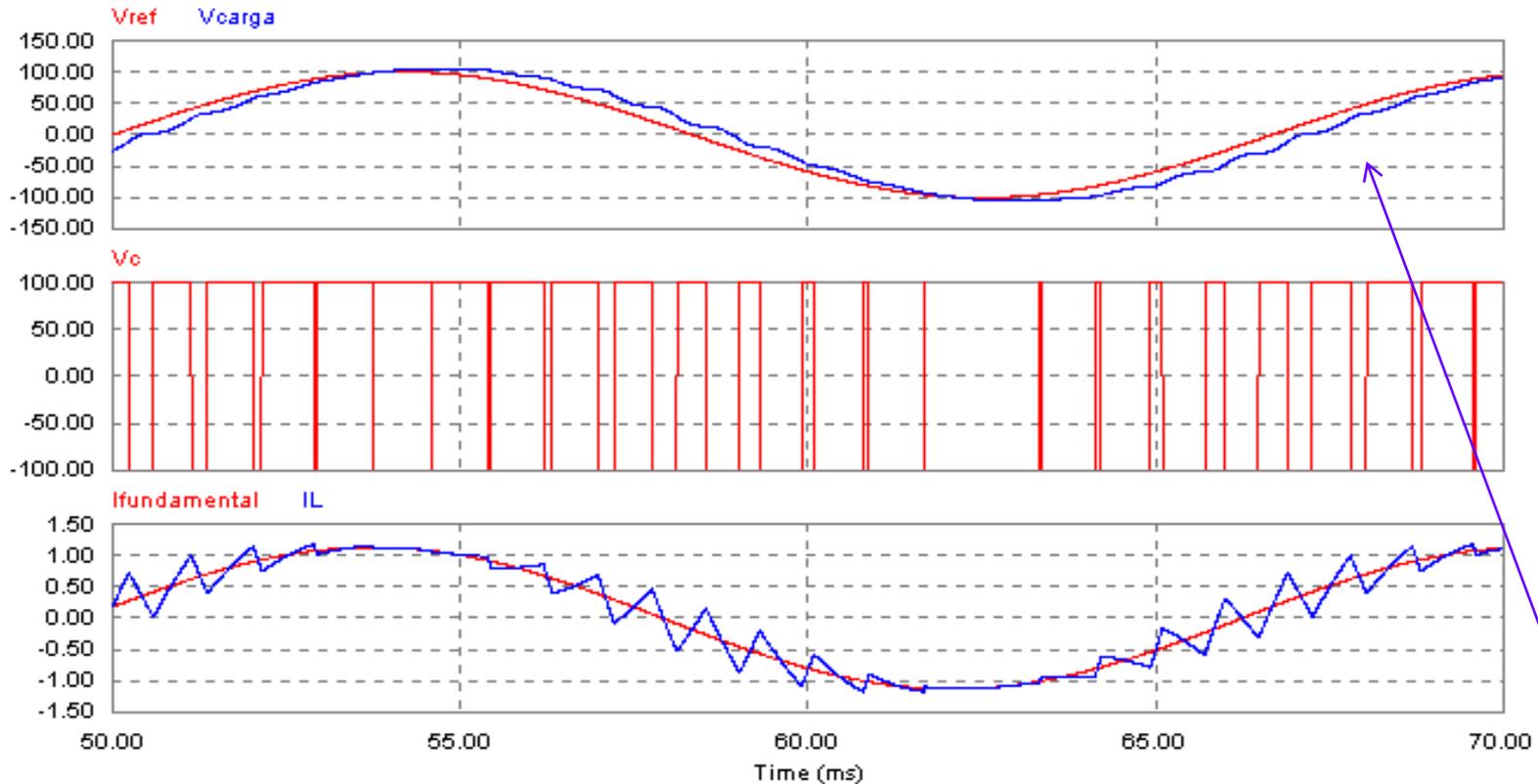
# Filtrando a tensão de saída



- Utilização de filtro LC
- Filtro LC precisa de controle de tensão de saída
- Aplicações: UPS, filtro ativo série, etc.



# Comportamento do Filtro LC

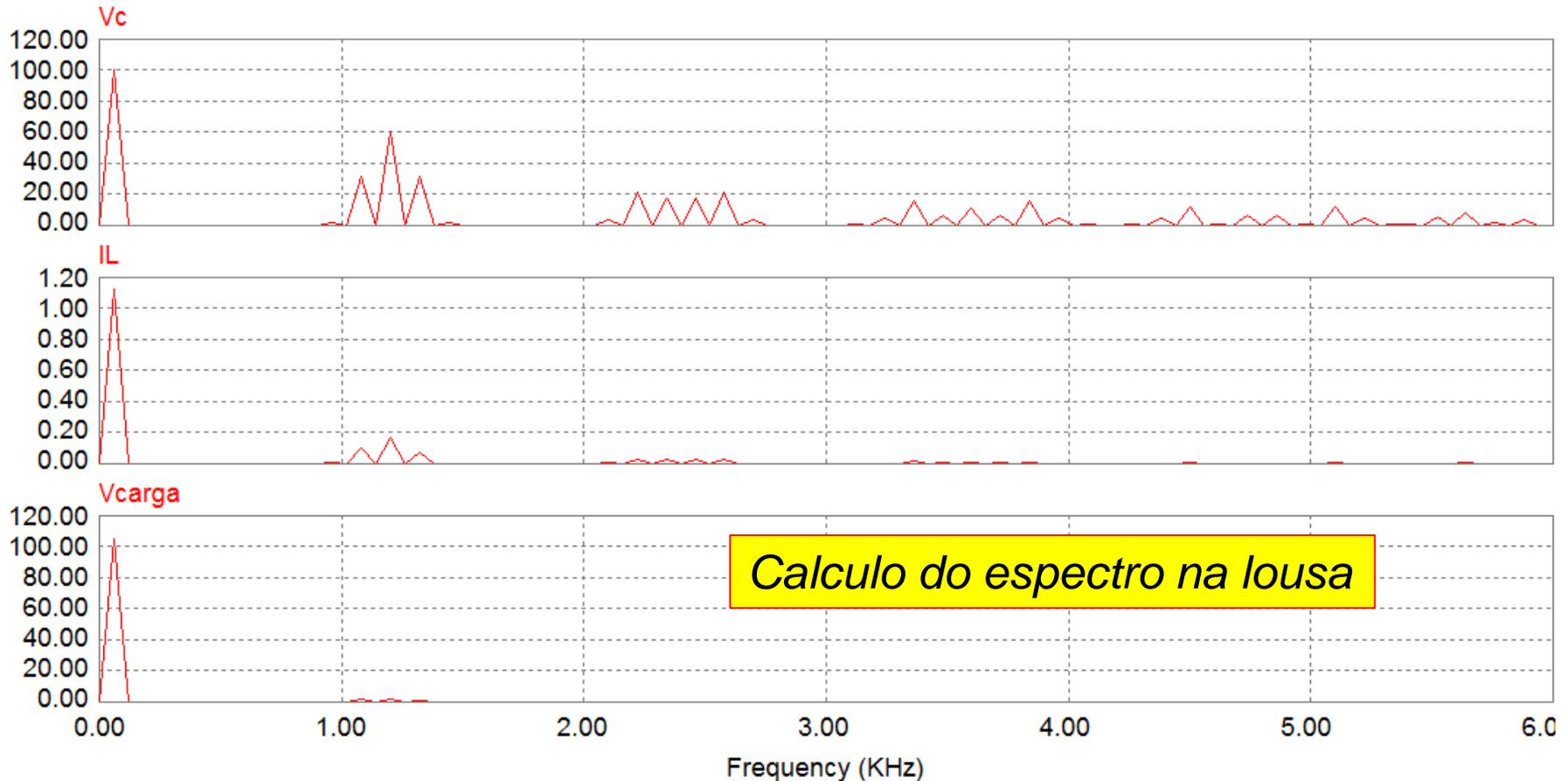


- $L=0.05\text{H}$  ;  $C=10\mu\text{F}$  ;  $f_m=1200\text{Hz}$

*Ripple muito pequeno em Vcarga!!!*



# Comportamento do Filtro LC

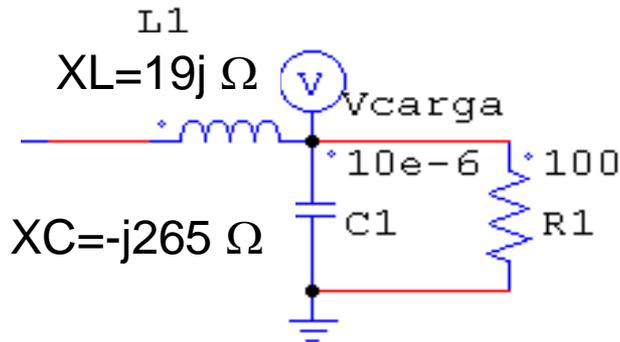


- $L=0.05H$  ;  $C=10\mu F$  ;  $f_m=1200Hz$



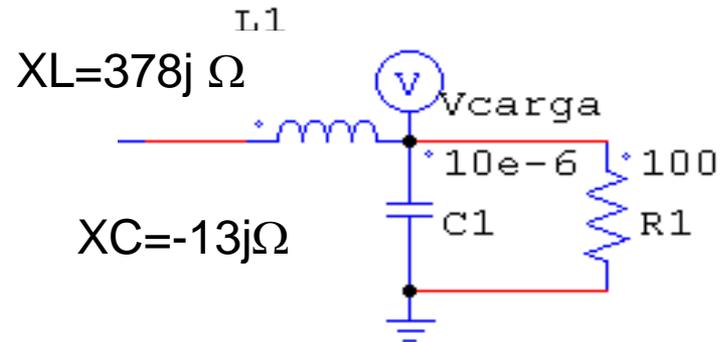
# Comportamento do Filtro LC

## Impedância do filtro



$$R//XC=93\angle-20 (\Omega)$$

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



$$R//XC=13\angle-82 (\Omega)$$

$$f=1200\text{Hz}$$

- $L=0.05\text{H}$  ;  $C=10\mu\text{F}$  ;  $f_m=1200\text{Hz}$



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

O resto do material será apresentado em outra aula separada

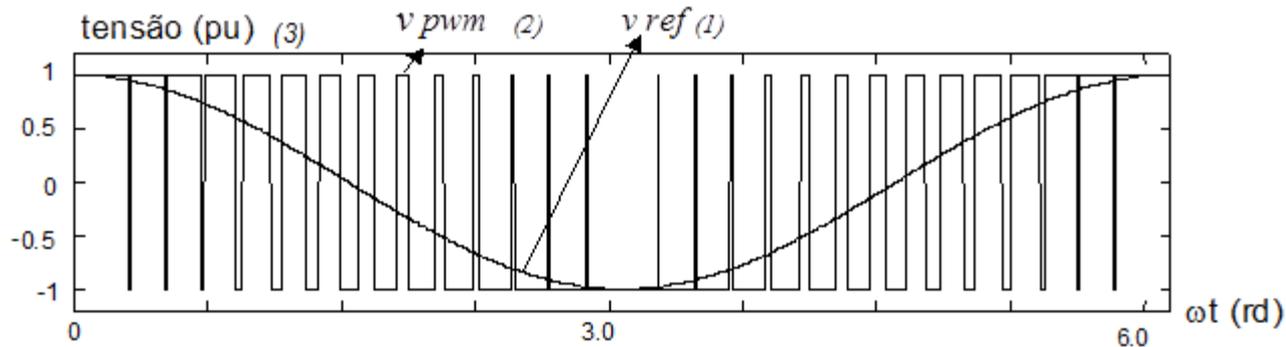


# Implementação de Conversores de Elevada Potência

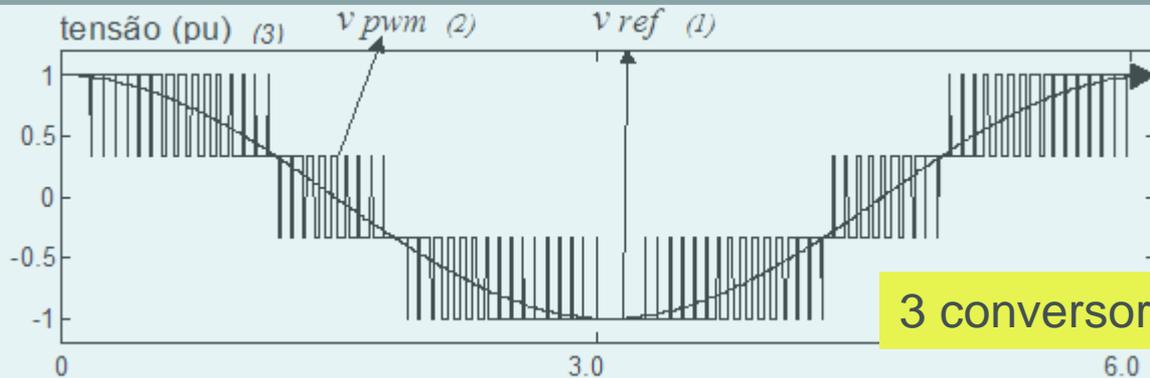
- Associação série / paralelo de chaves
- Associação série paralelo de conversores (Multiconversores)



# Formas de Onda



- Conversor único

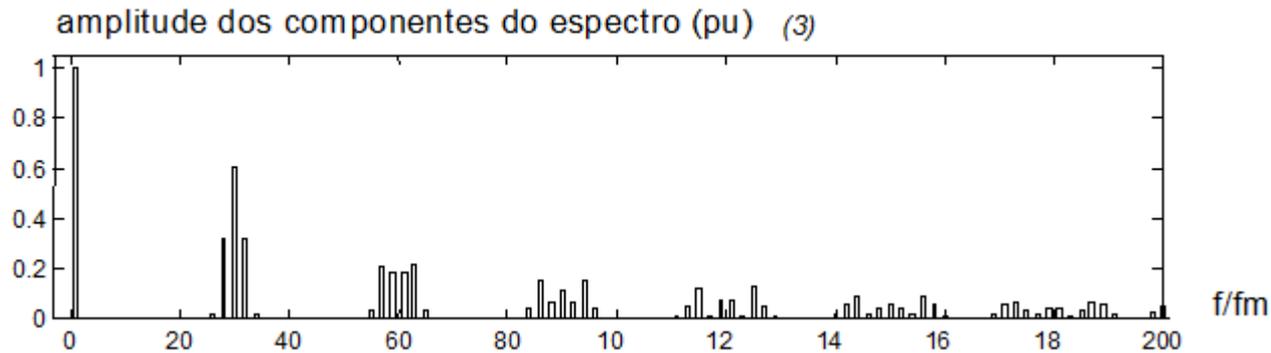


3 conversores → 4 níveis

- Multiconversor



# Espectro dos conversores



- Conversor único

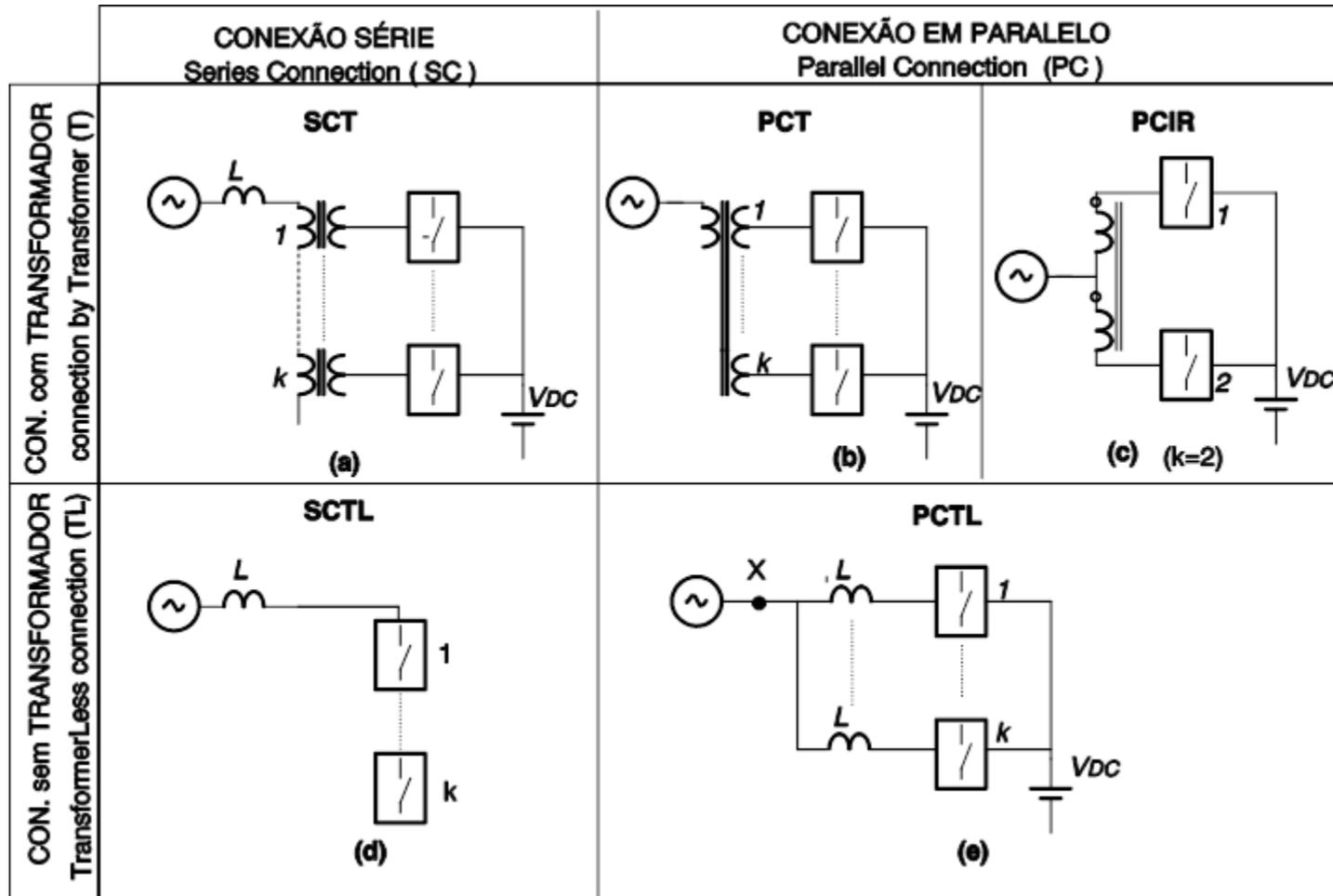


- Multiconversor

3 conversores → 1ª raia em 3 fchav

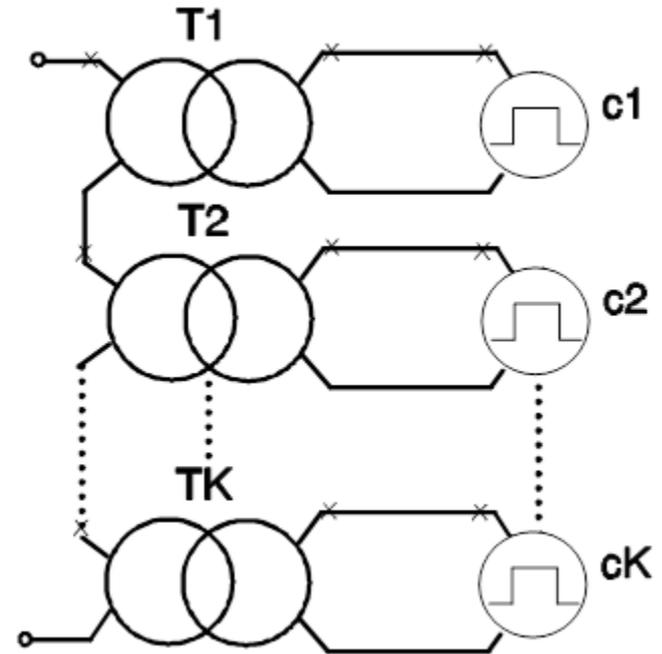
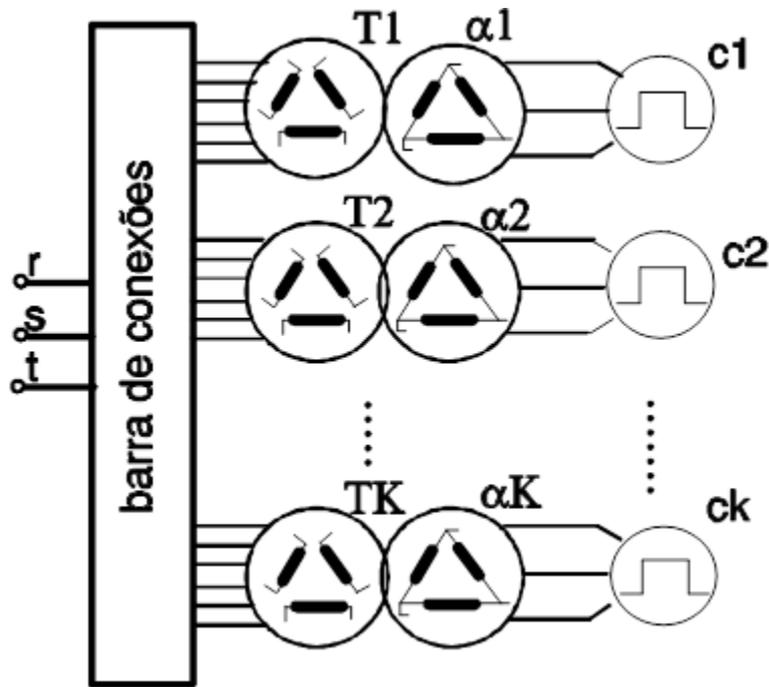


# Multiconversores - Tipos





# Associação série com transformadores

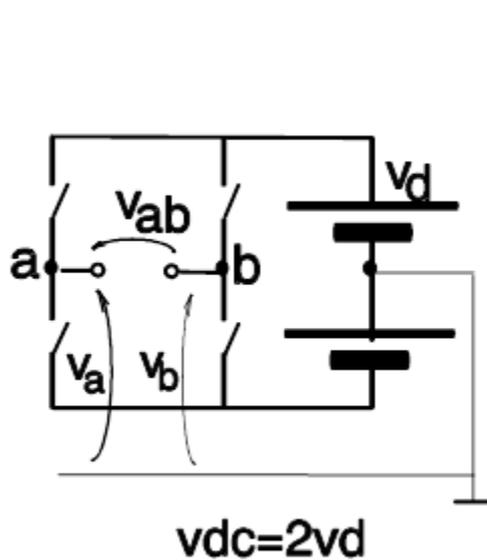


- Conexão de unidades trifásicas

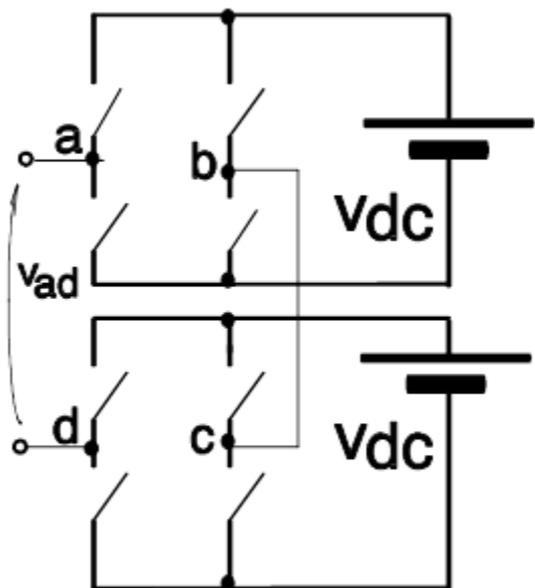
- Conexão de unidades monofásicas



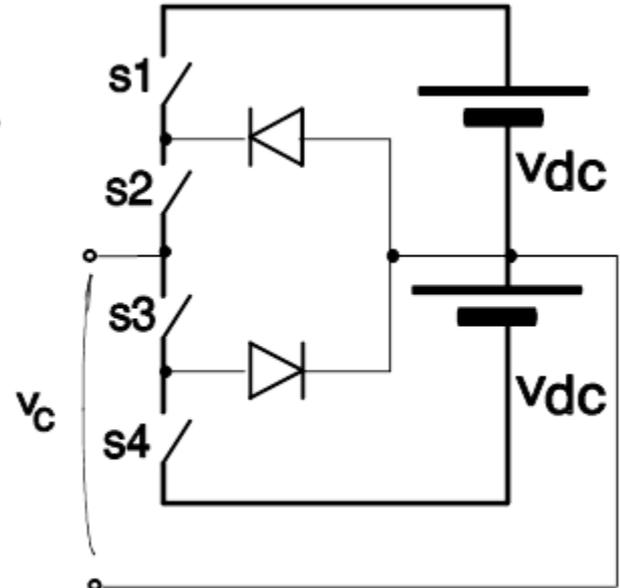
# Associação série sem transformadores



- Conversor em ponte completa



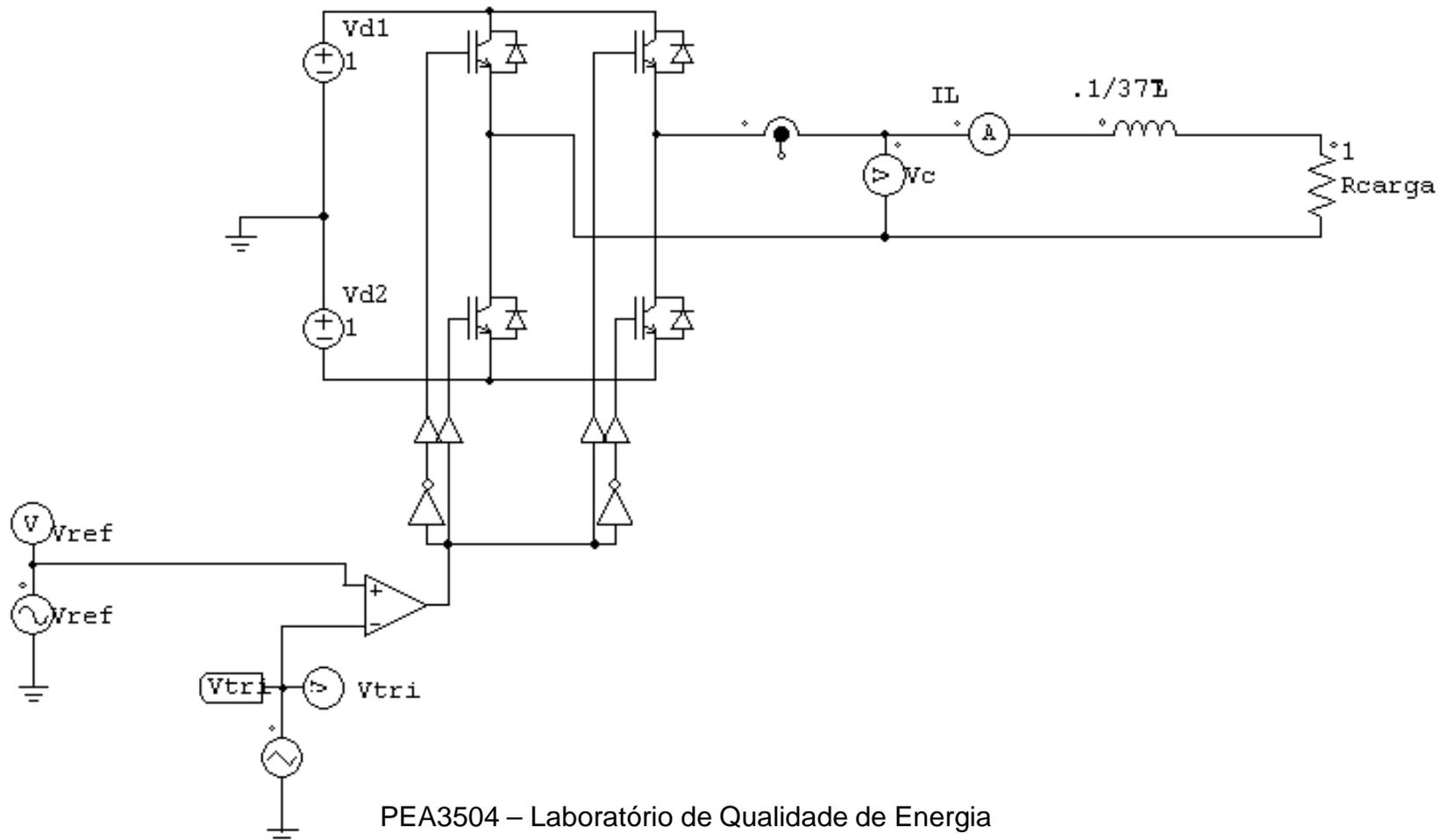
- Associação em série de dois conversores



- Conversor tipo NPC (*Neutral Point Clamped*)

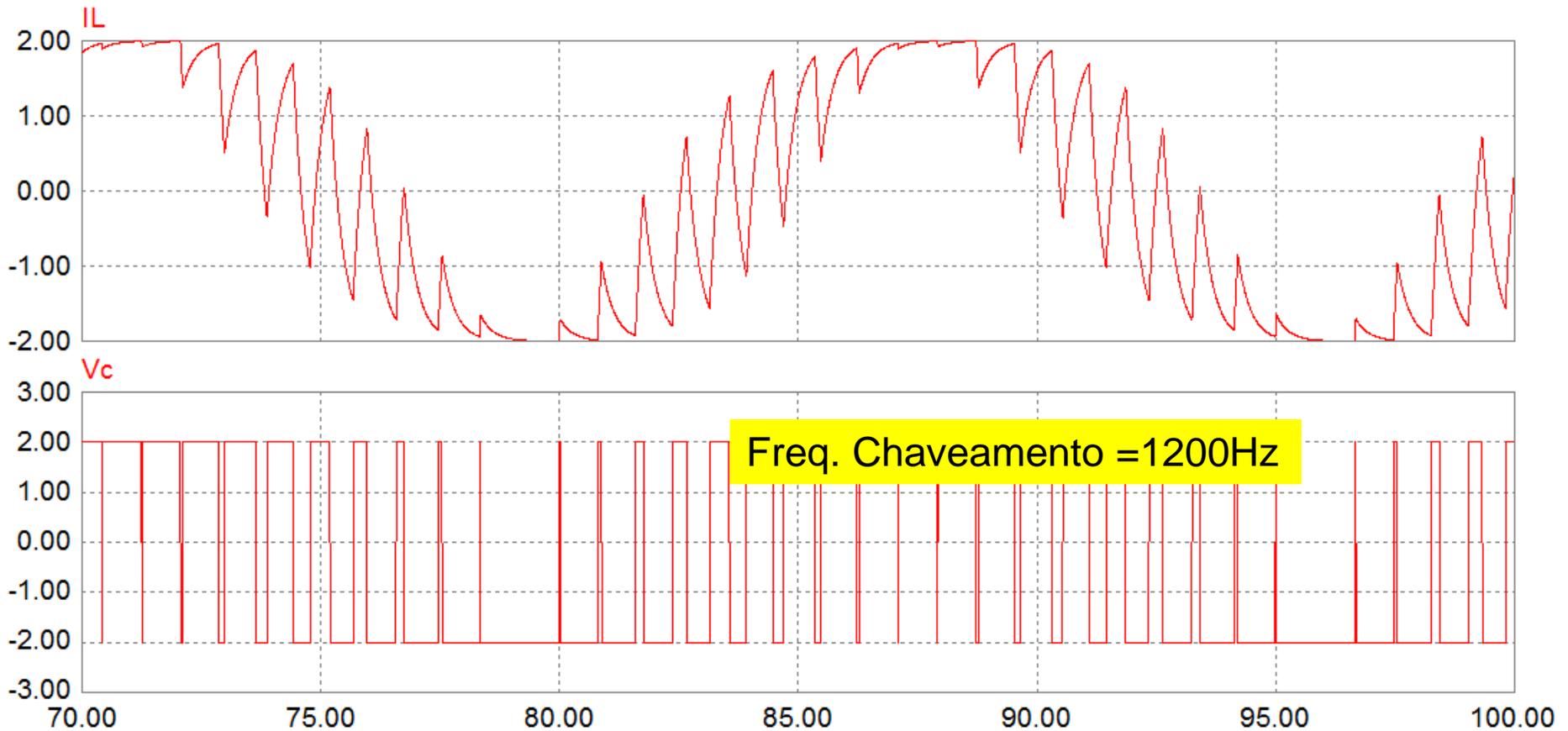


# O conversor ponte H – PWM 2 níveis



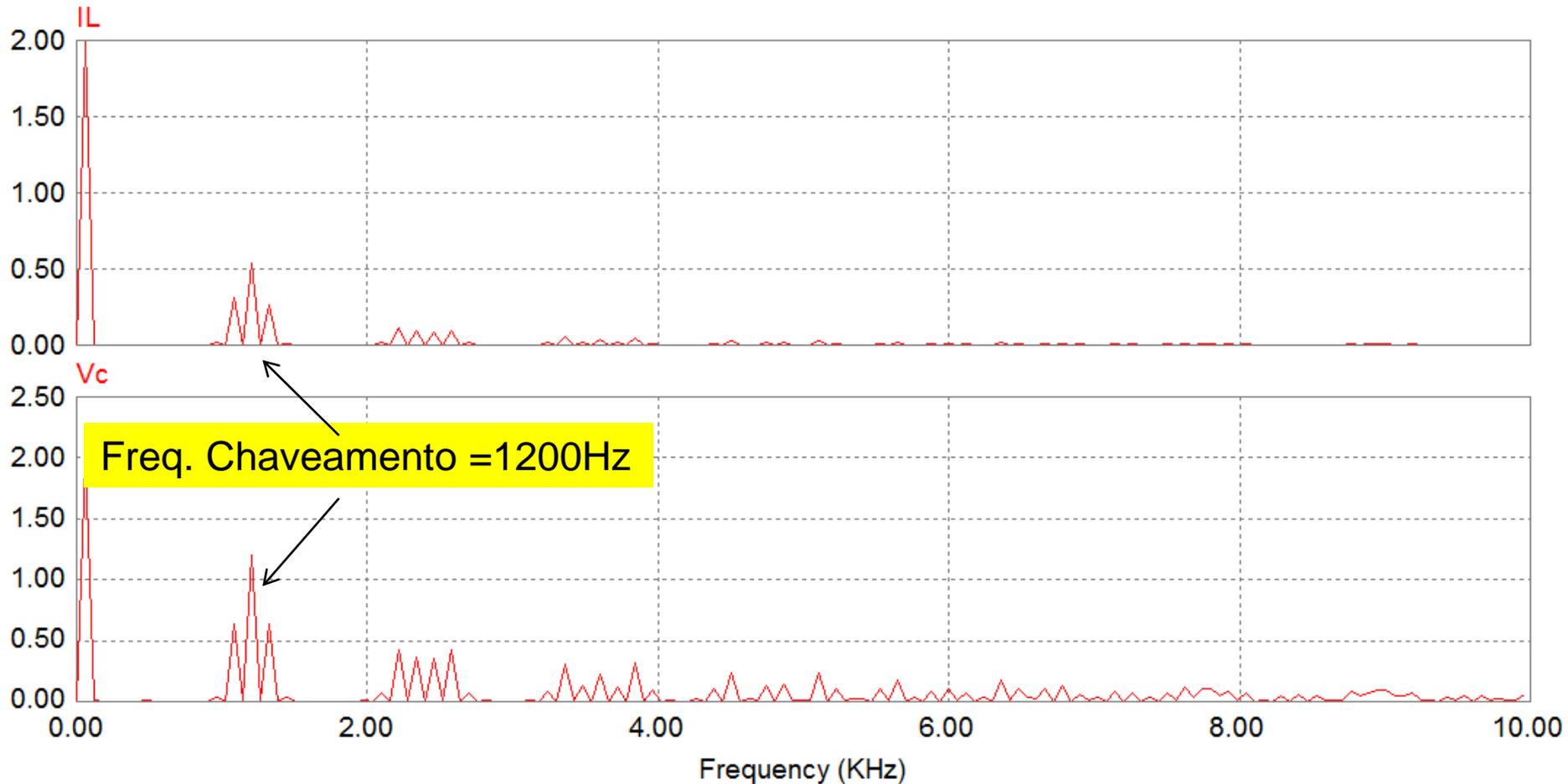


# O conversor ponte H – 2 níveis



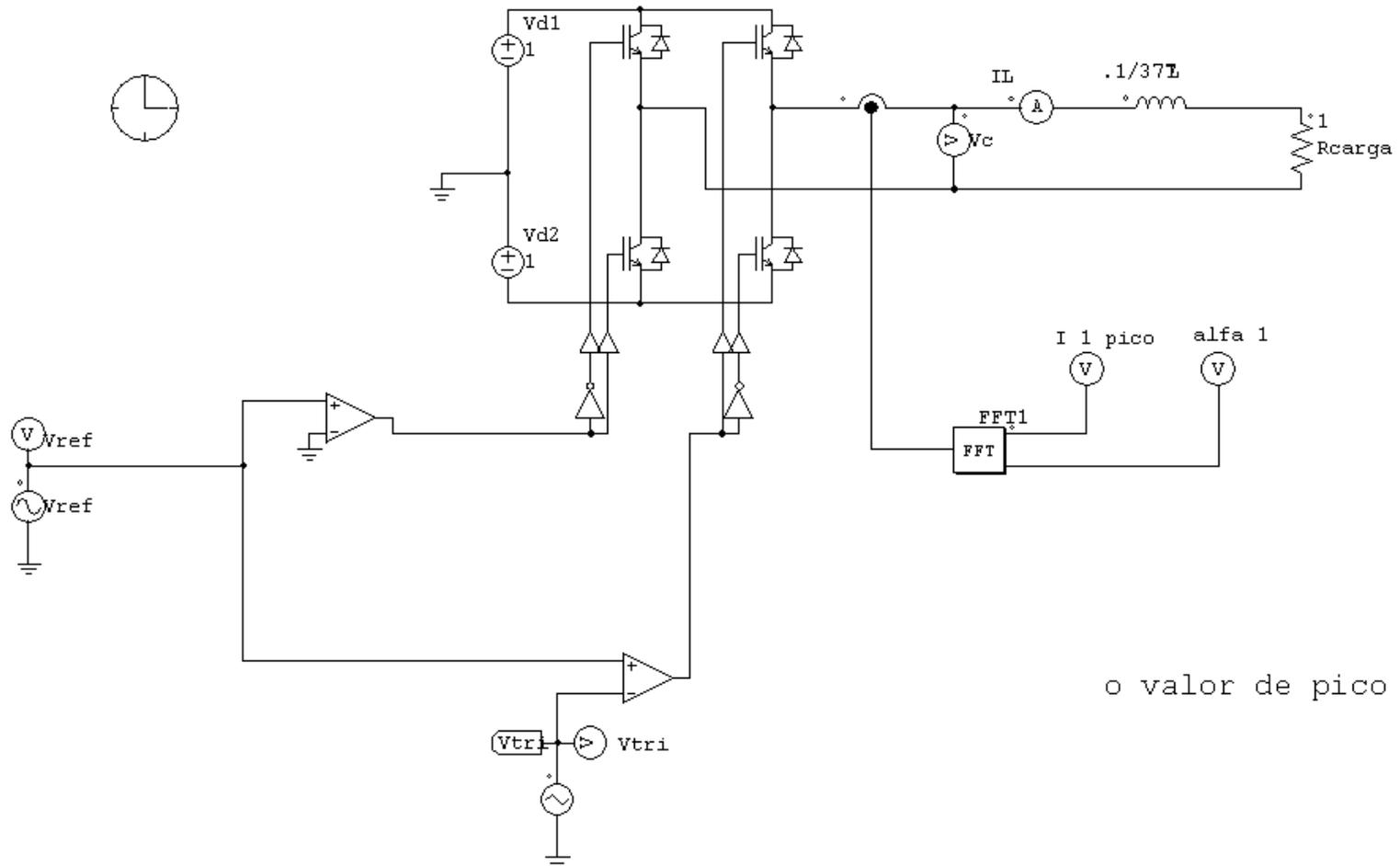


# O conversor ponte H – 2 níveis





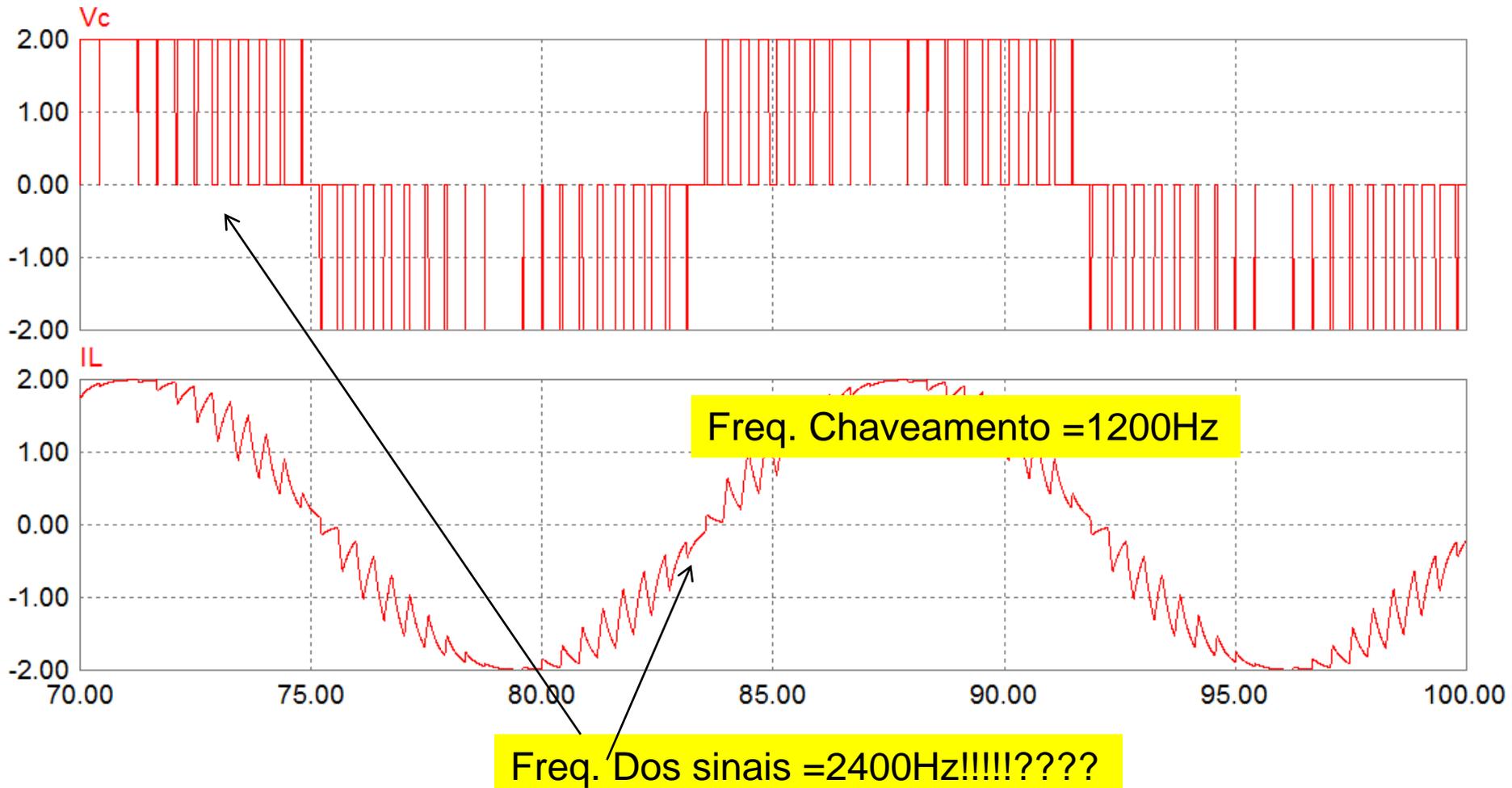
# O conversor ponte H – PWM 3 níveis



o valor de pico



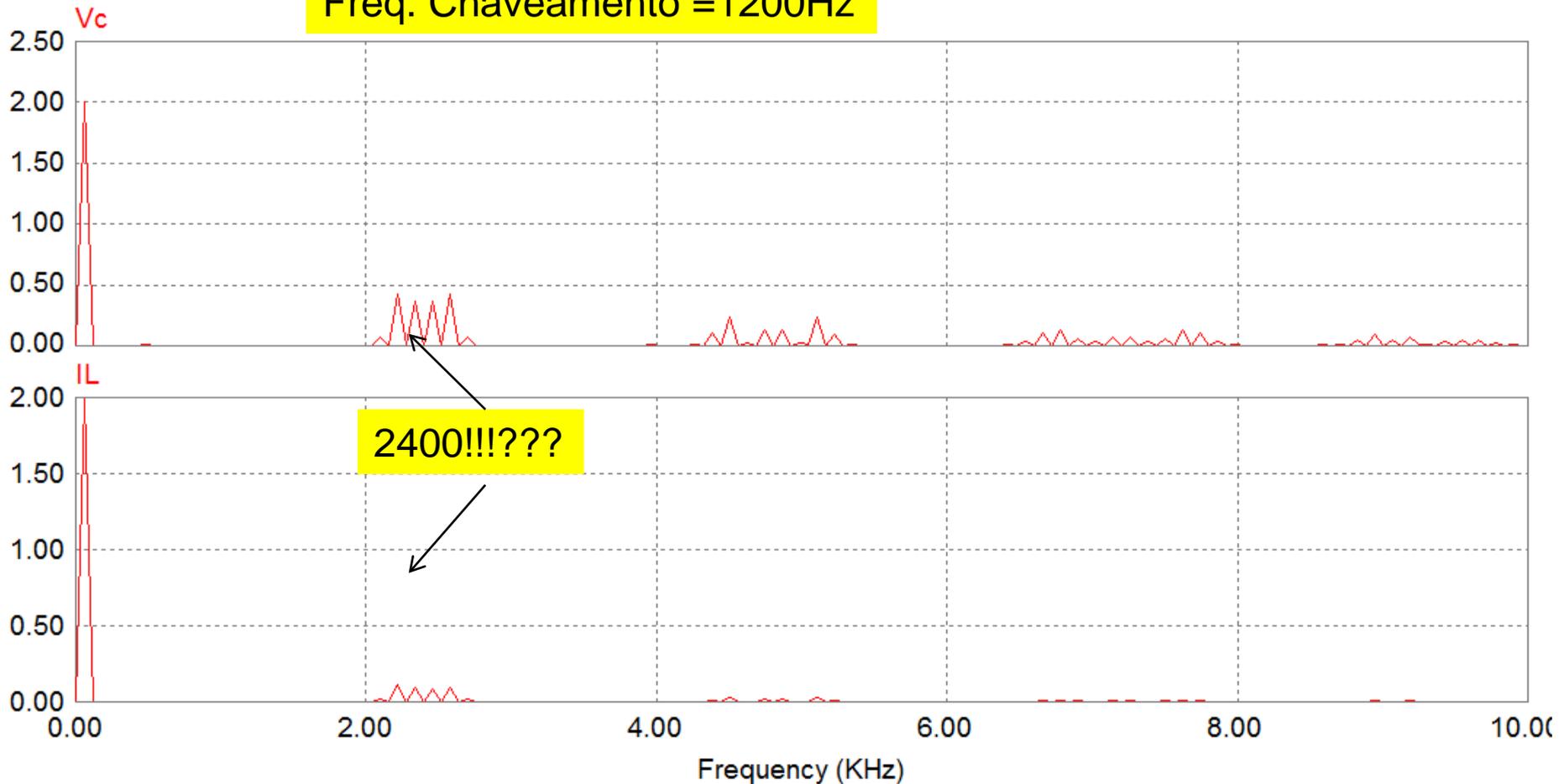
# O conversor ponte H – 3 níveis





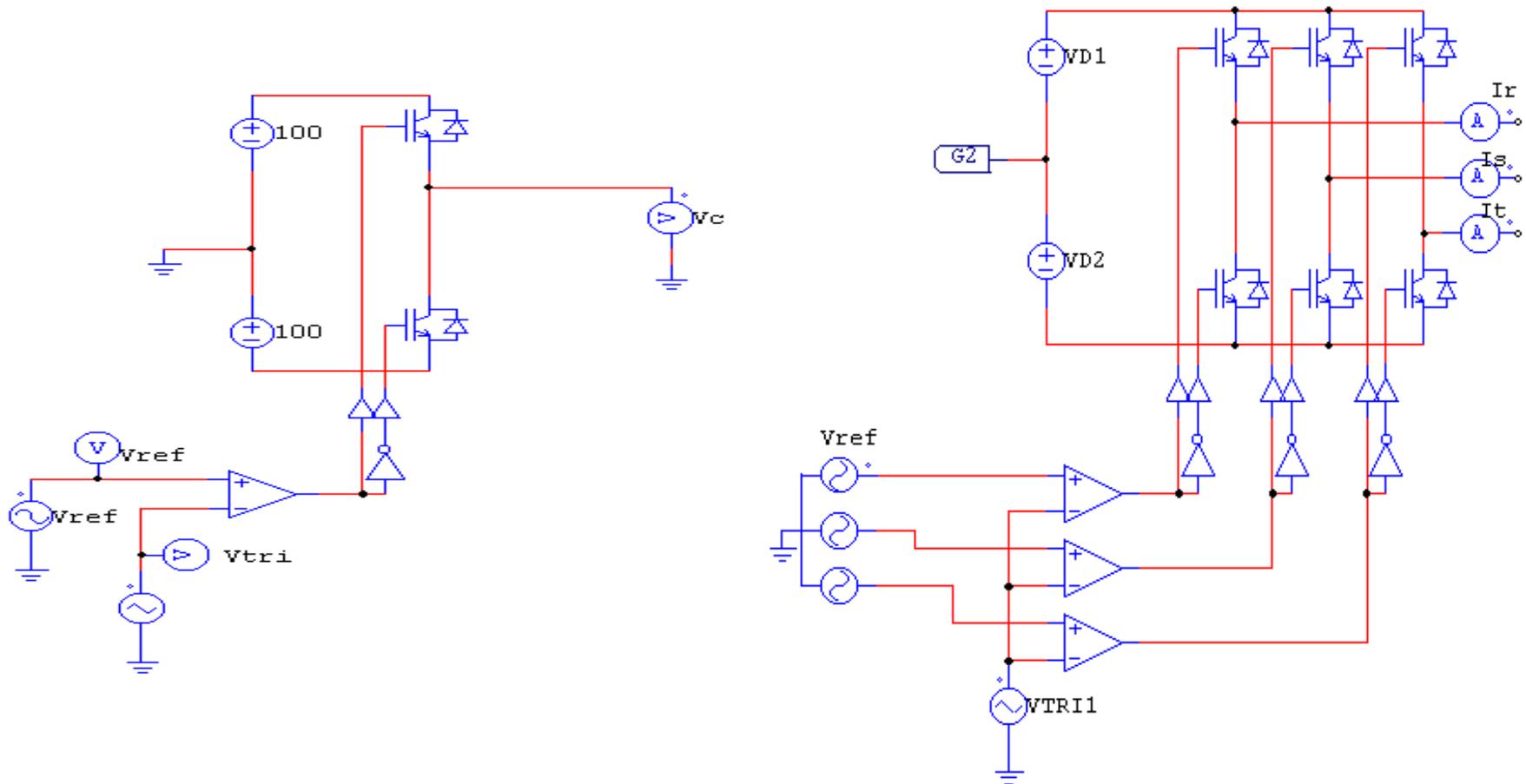
# O conversor ponte H – 2 níveis

Freq. Chaveamento = 1200Hz





# Inversor VSC Mono / Inversor VSC Trifásico



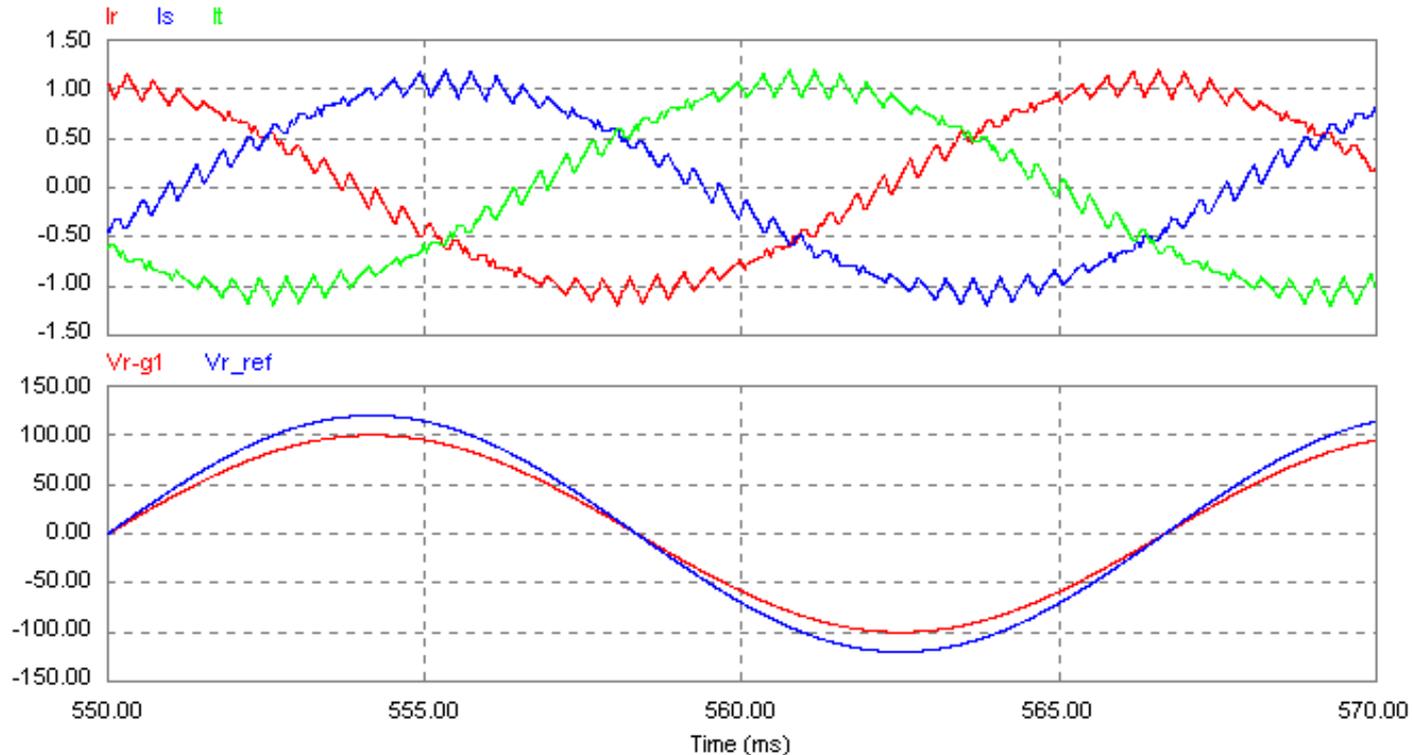


## Ex. VAR GEN. Trifásico

- Inversor VSC trifásico ligado à rede CA;
- Neutro do inversor G2;
- Rede CA ligada em estrela com neutro G1 não conectado a G2;
- $V_{rede\ pico}=100V$ ;  $V_{ref\ pico}=120V$ ,  $V_d=120V$ ;
- Impedância da Rede CA:  $X_L=18\ \Omega$ ;
- Frequência da portadora:  $f_m=2400Hz$



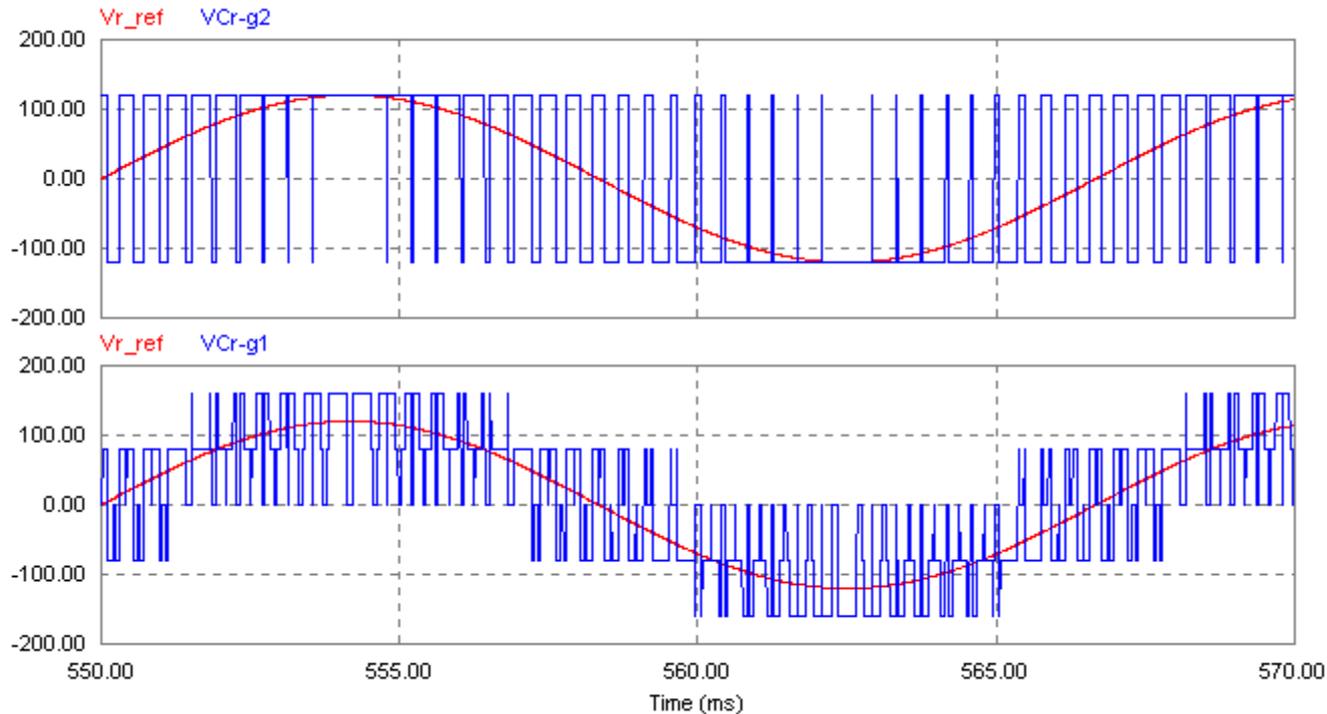
# Ex. VAR GEN. Trifásico



- $V_{rede\ pico}=100V$ ;  $V_{ref\ pico}=120V$  (mesma fase!!)
- $X_L=18\ \Omega$ ,  $f_m=2400Hz$ ,  $V_d=120V$



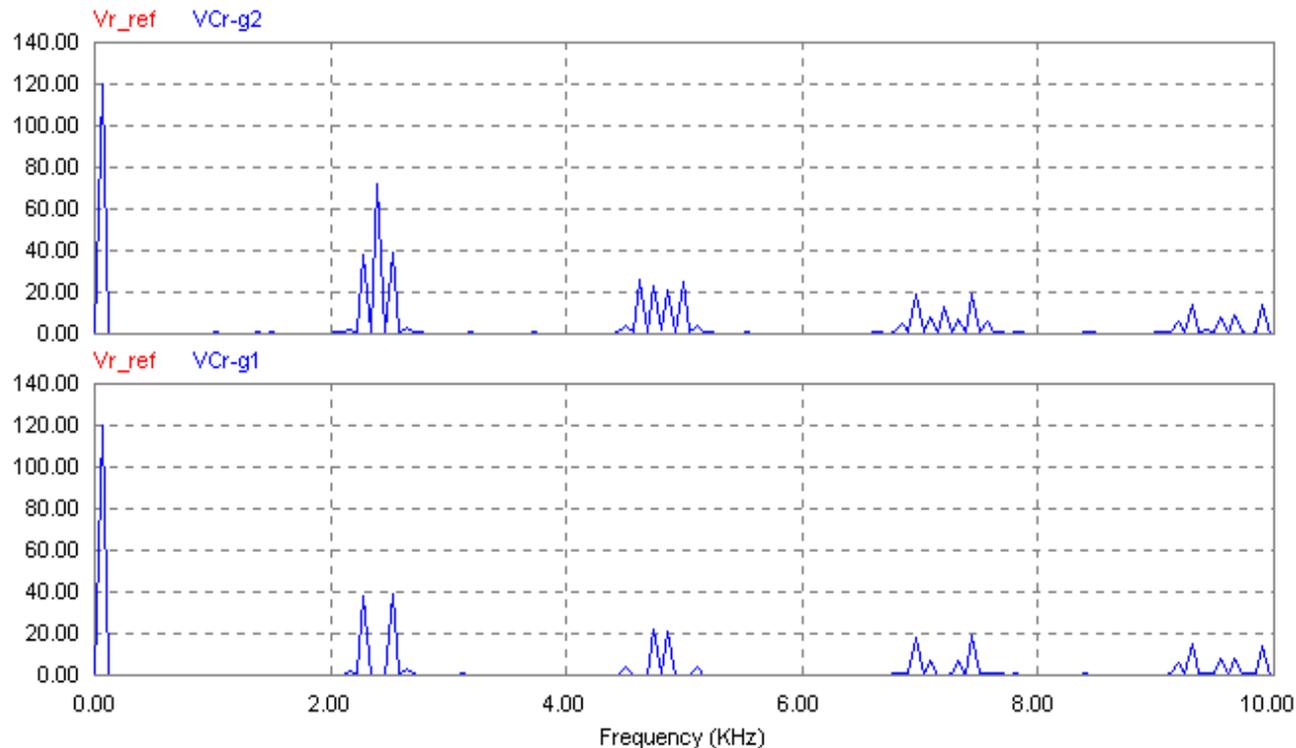
# Ex. VAR GEN. Trifásico



- Tensão na fase R do conversor ( $V_{Cr-g2}$ )
- Tensão equivalente na fase R ( $V_{Cr-g1}$ ) (impõe corrente)



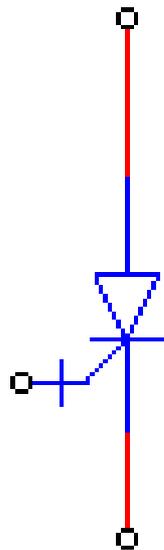
# Ex. VAR GEN. Trifásico



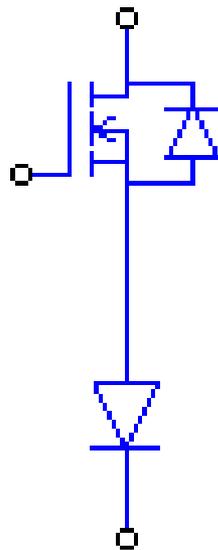
- Espectro da tensão na fase R do conversor (VCr-g2)
- Espectro da tensão equivalente na fase R (VCr-g1)



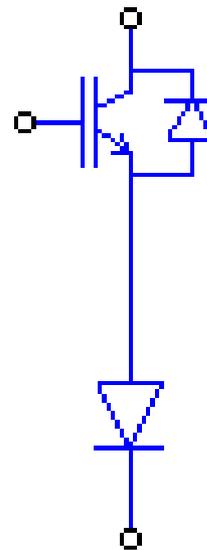
# Conversor fonte de corrente (CSC): Implementação das chaves



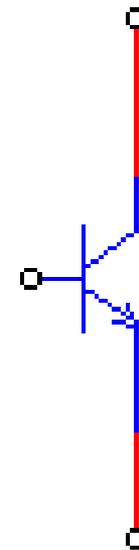
GTO



MOSFET



IGBT

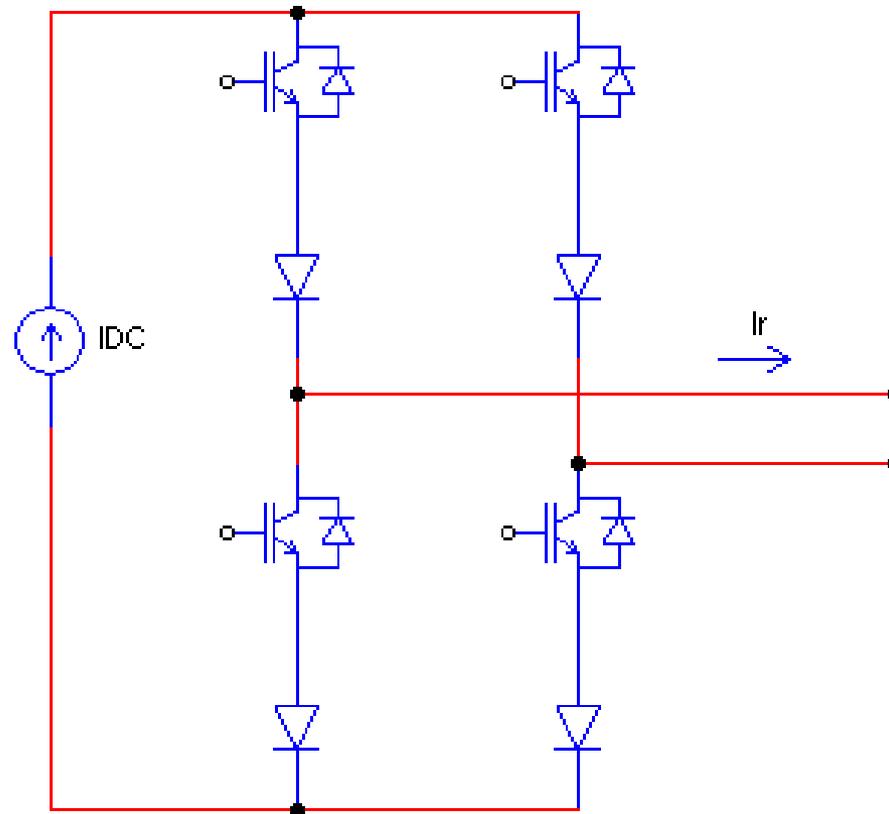


Transistor  
Bipolar (NPN)

- Chaves na implementação como fonte de corrente:  
Bidirecional em tensão e unidirecional em corrente



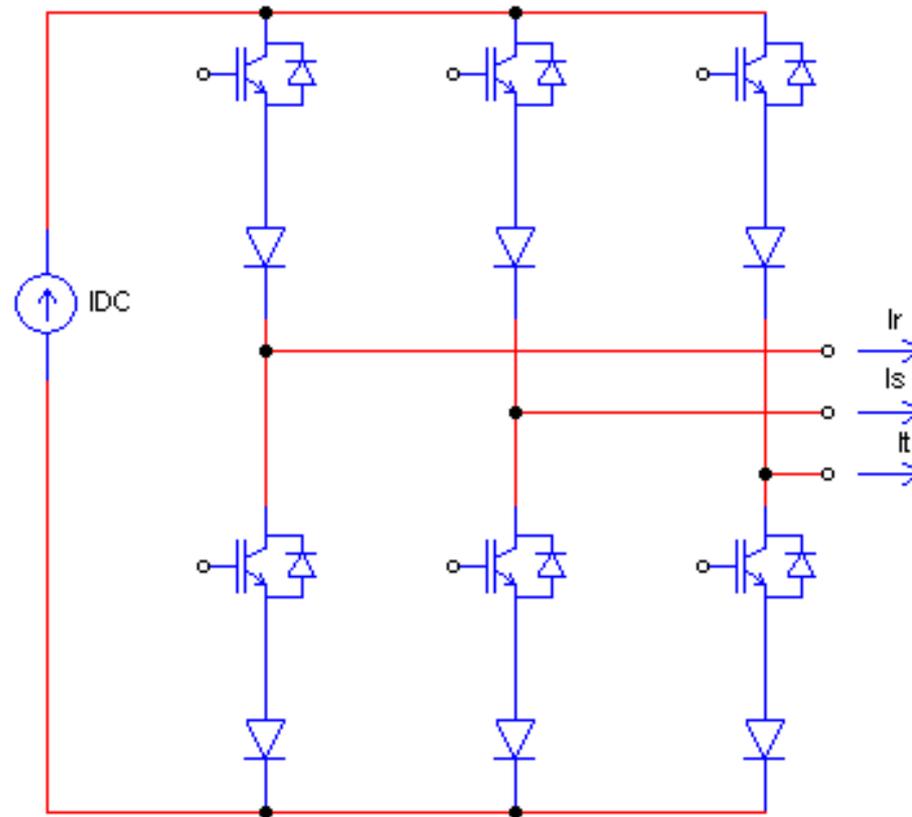
# Conversor Tipo Fonte de Corrente - 1 $\phi$



- $I_r$  pode assumir os valores :  $-IDC$ ,  $0$ ,  $+IDC$
- Note a implementação das chaves!



# Conversor Tipo Fonte de Corrente - 3 $\phi$



–  $I_r$ ,  $I_s$ ,  $I_t$  podem assumir os valores :  $-I_{DC}$ , 0,  $+I_{DC}$



# Aplicações do Conversor tipo Fonte de Corrente

- Derivação (*tap*) em sistemas HVDC
- Fontes para tochas de plasma
- Conversores para SMES  
(Superconducting Magnetic Energy Storage)