



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PEA2488 – Eletrônica de Potência II

Aplicações de Inversores

**Lourenço Matakas Junior
Wilson Komatsu**

Versão outubro/2013

PEA – Depto. Eng. Energia e Automação Elétricas

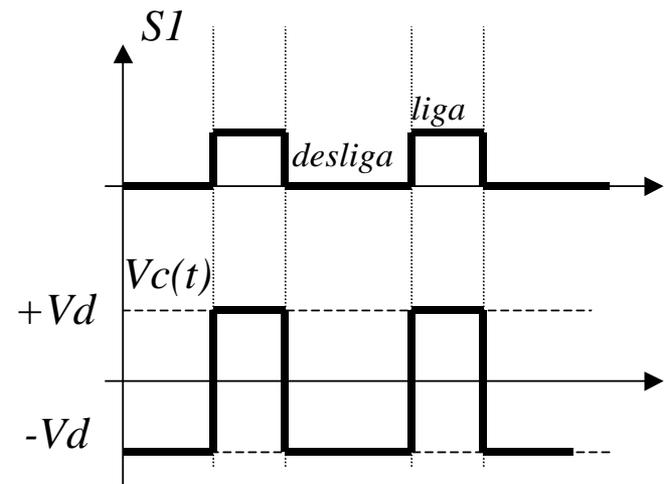
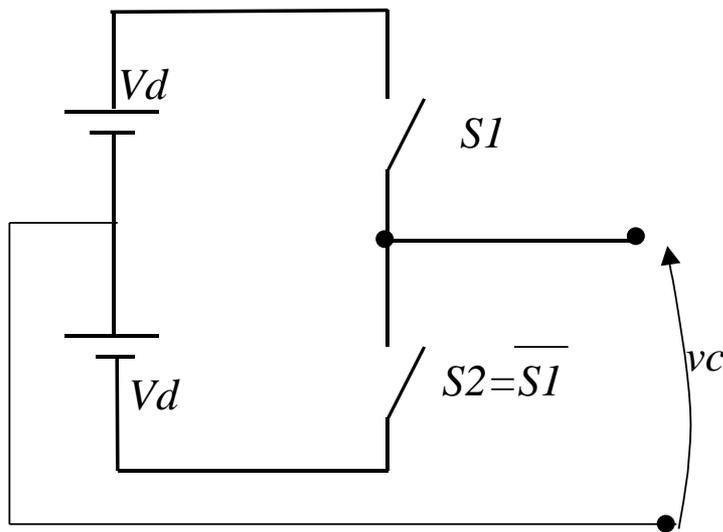


Aplicações de Inversores

- 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



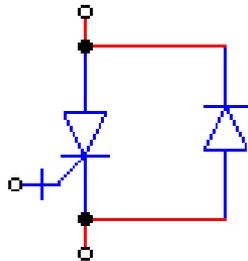
Inversor tipo fonte de tensão monofásico (meia ponte ou *half bridge*)



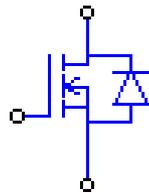
Dois níveis de tensão



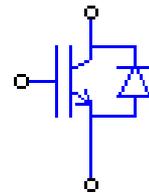
Fonte de tensão: Implementação das chaves



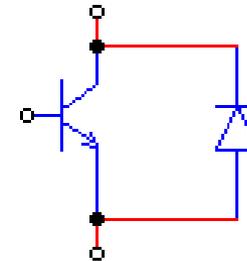
GTO



MOSFET



IGBT

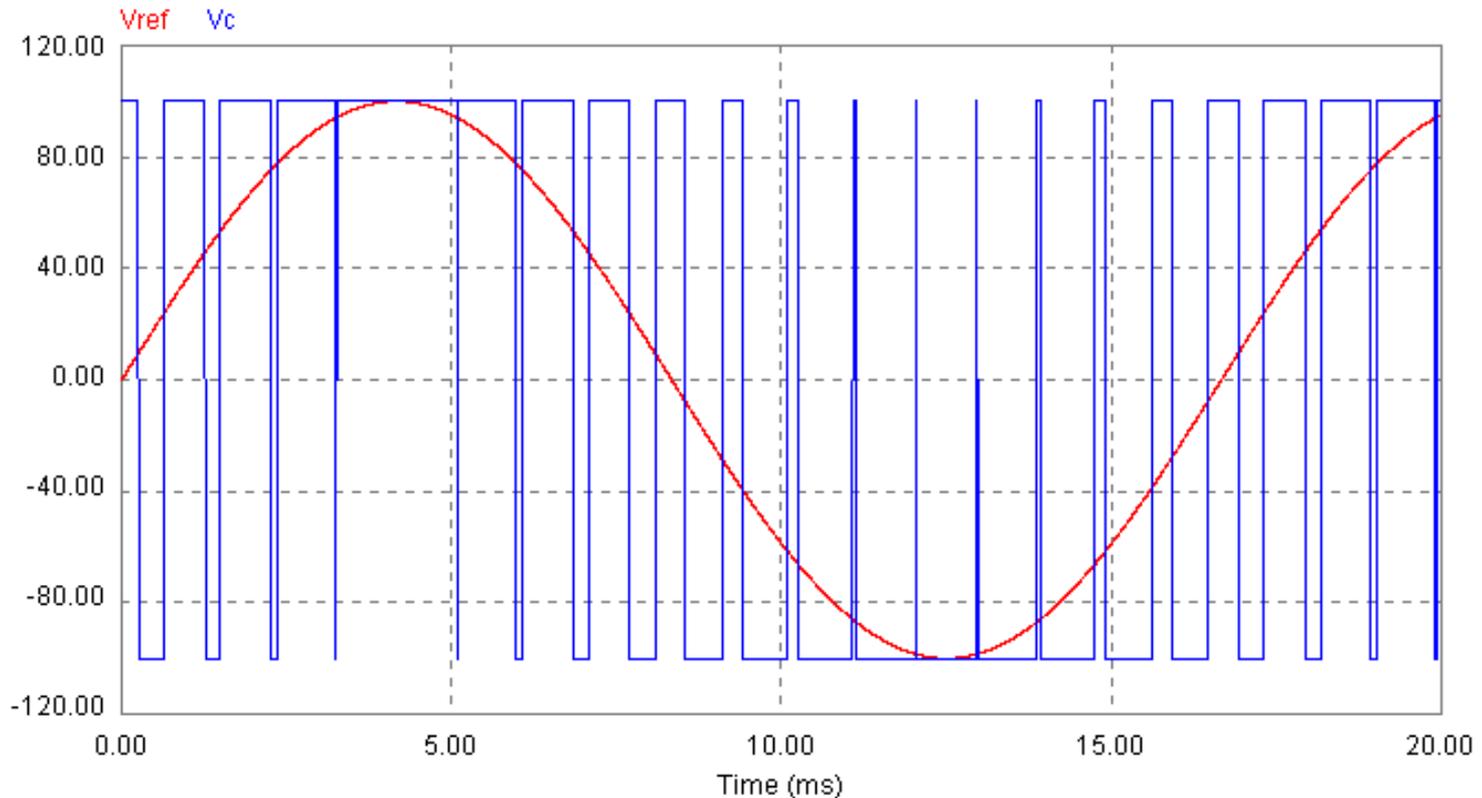


transistor bipolar

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



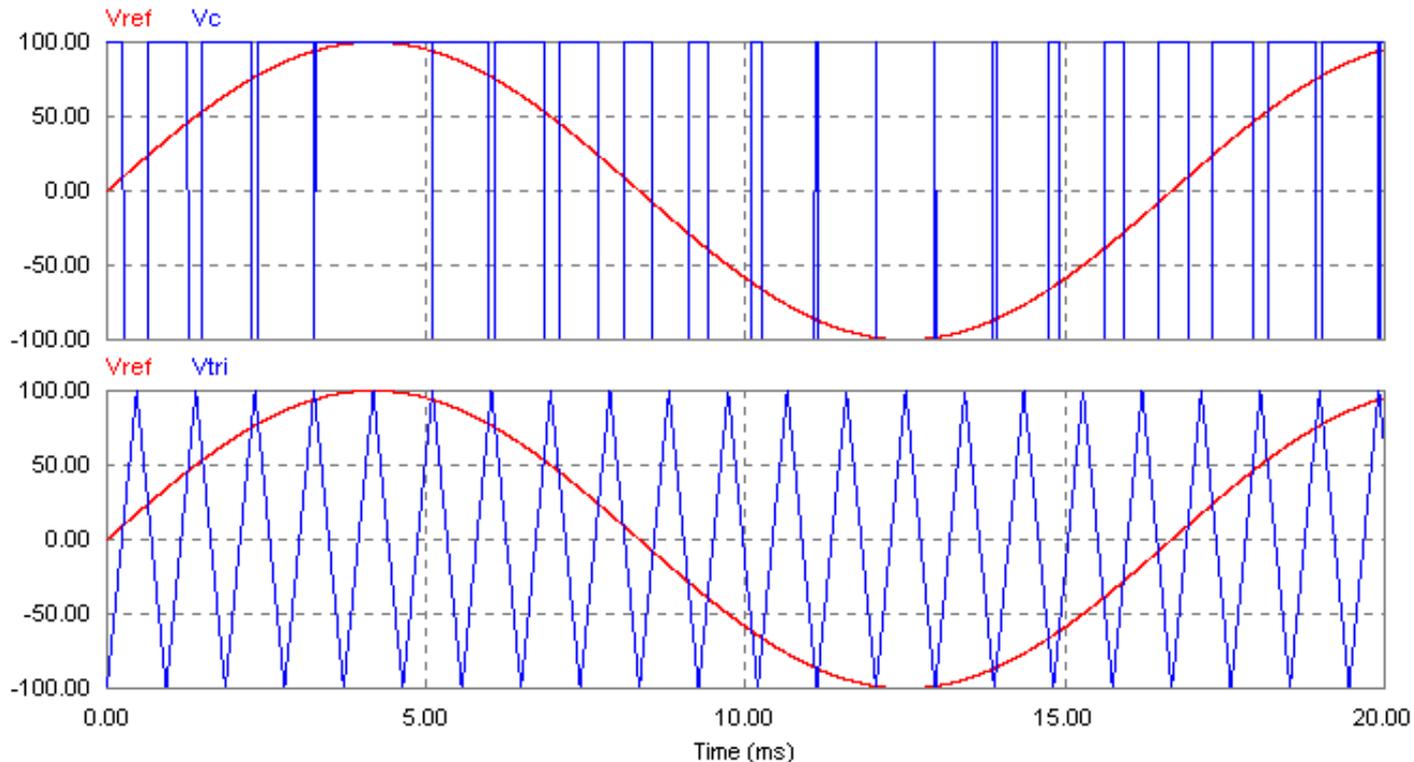
Operação com Modulação PWM



- 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*)

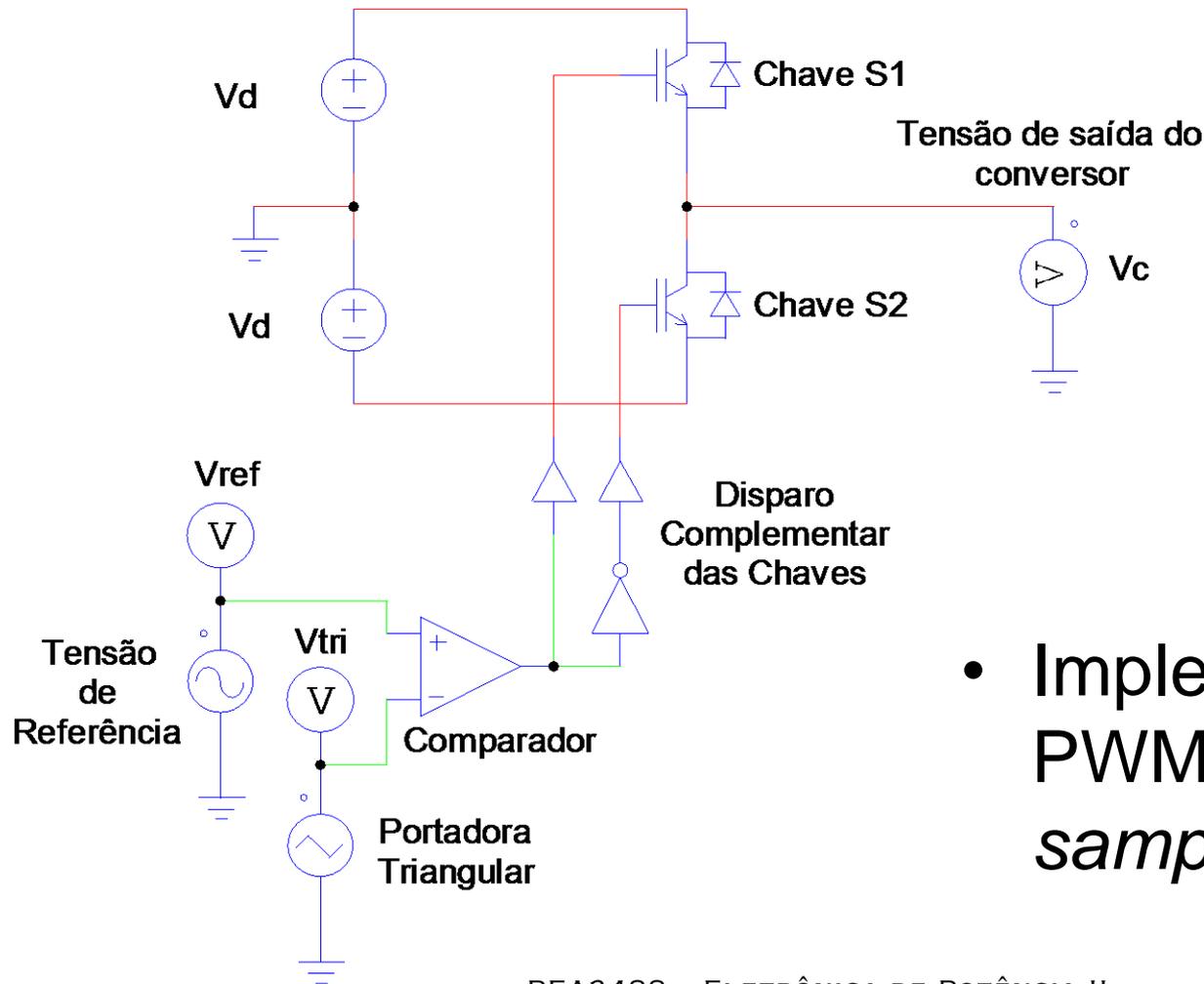


PWM com Portadora Triangular

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



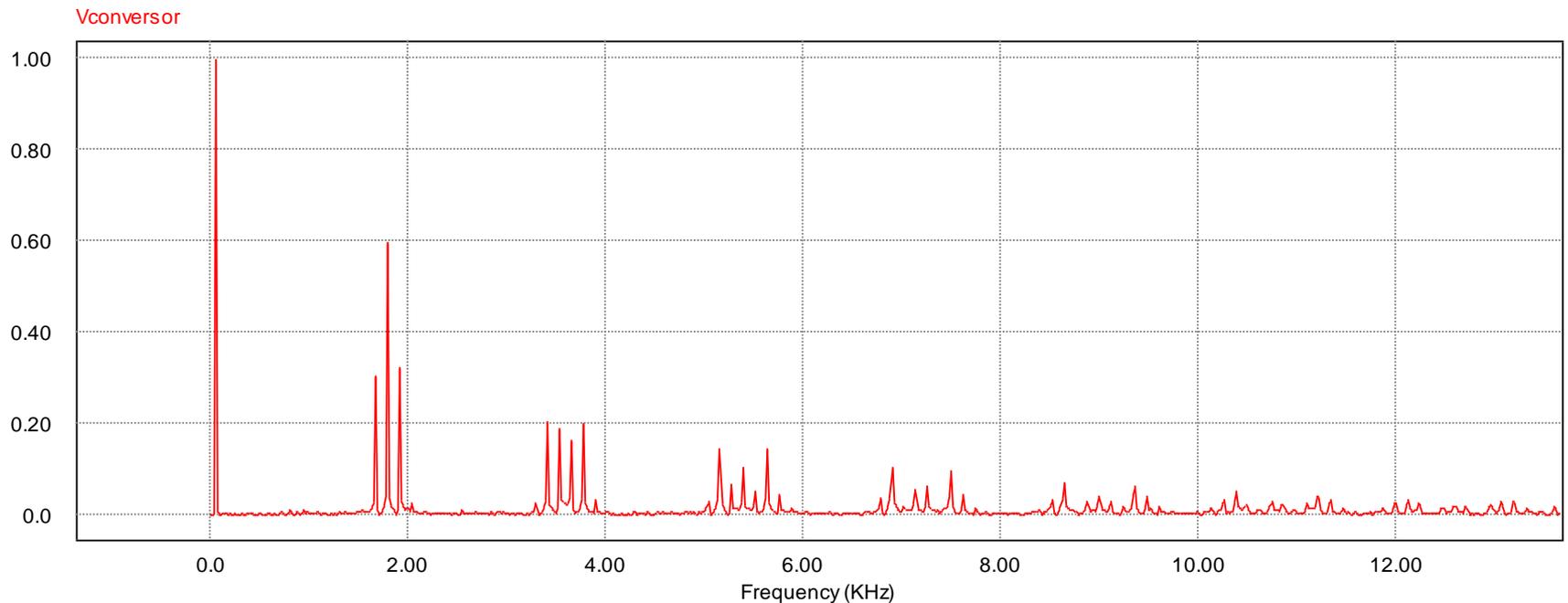
Inversor *Half-Bridge* + Modulador PWM



- Implementação do PWM com *natural sampling*



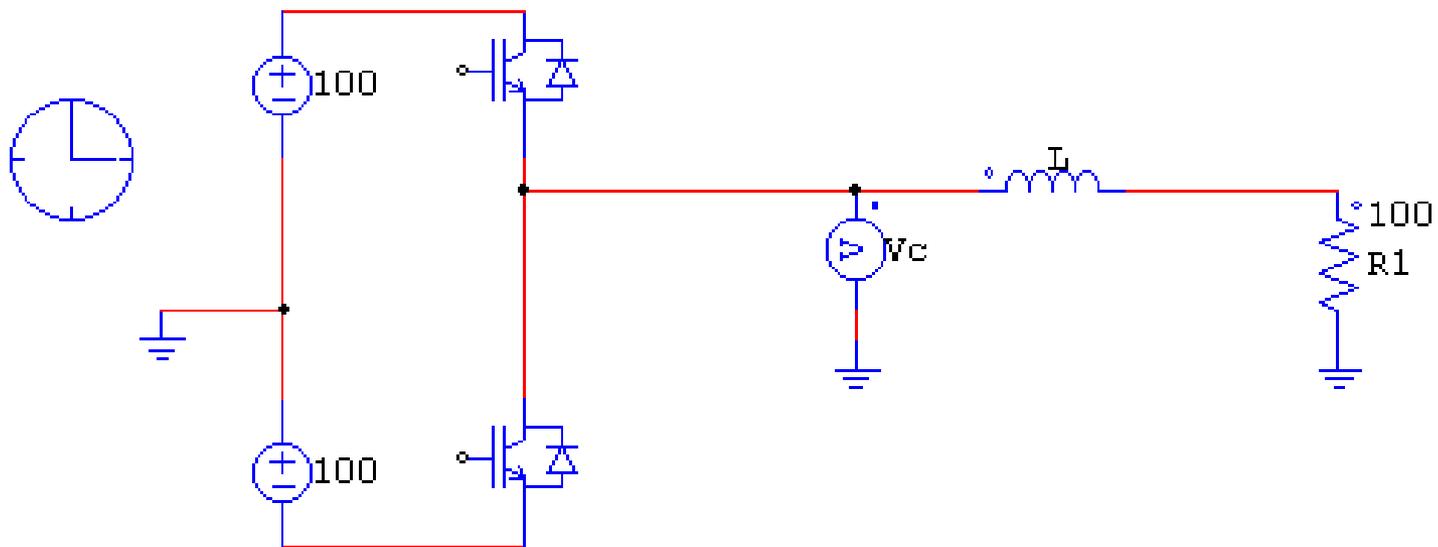
Espectro do sinal PWM



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



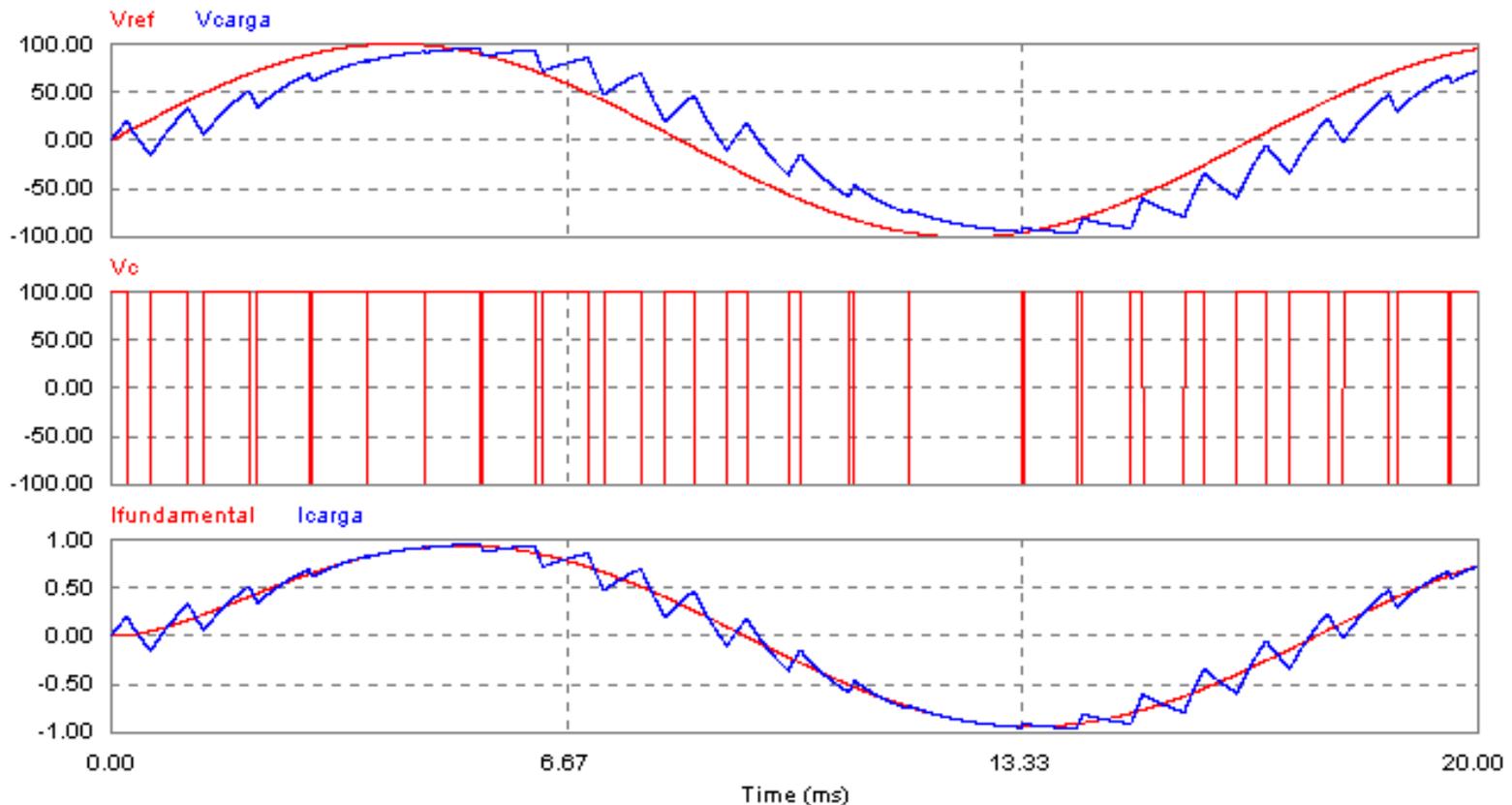
Filtrando a corrente de saída



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



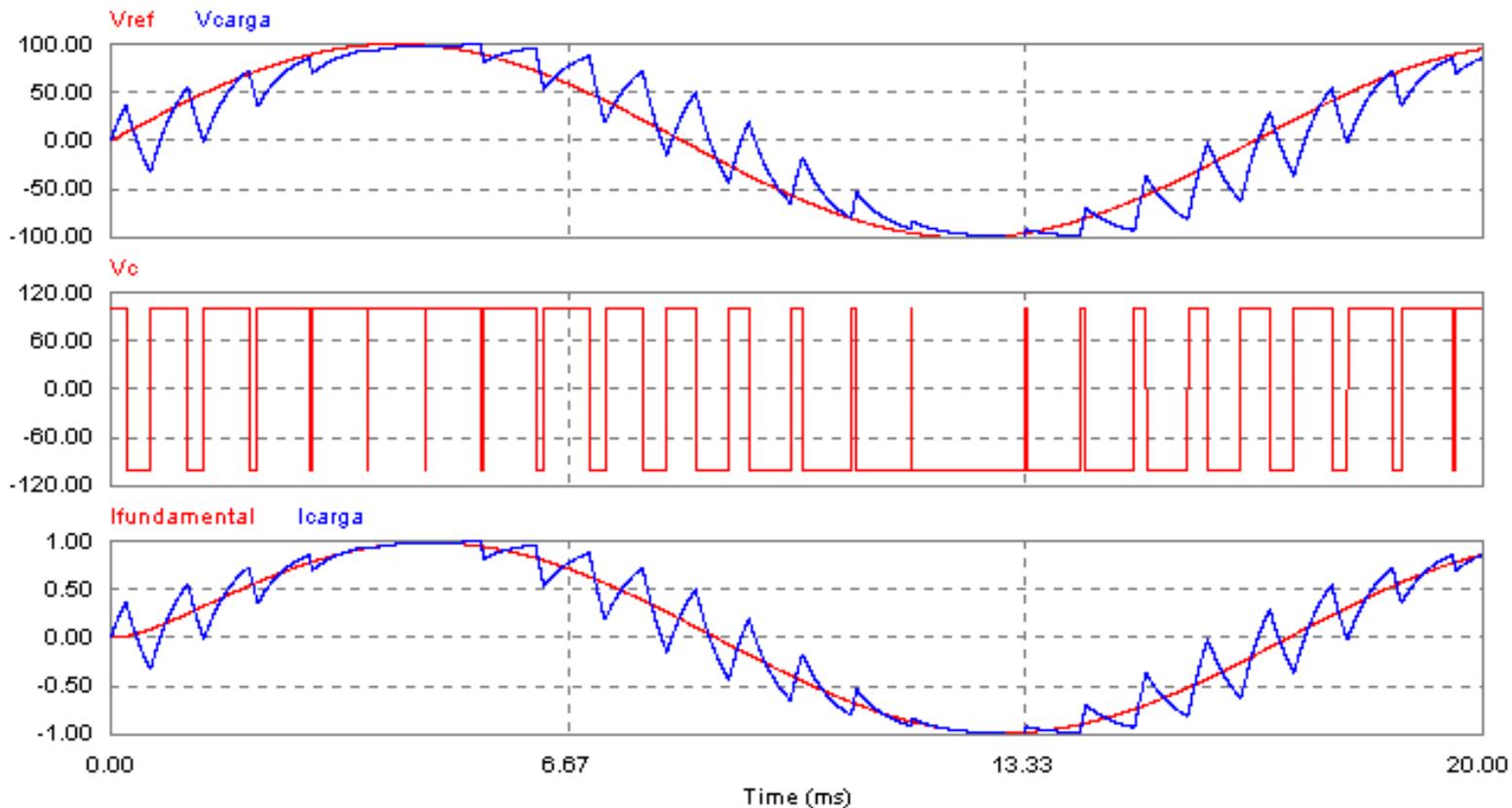
Comportamento do Filtro L



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



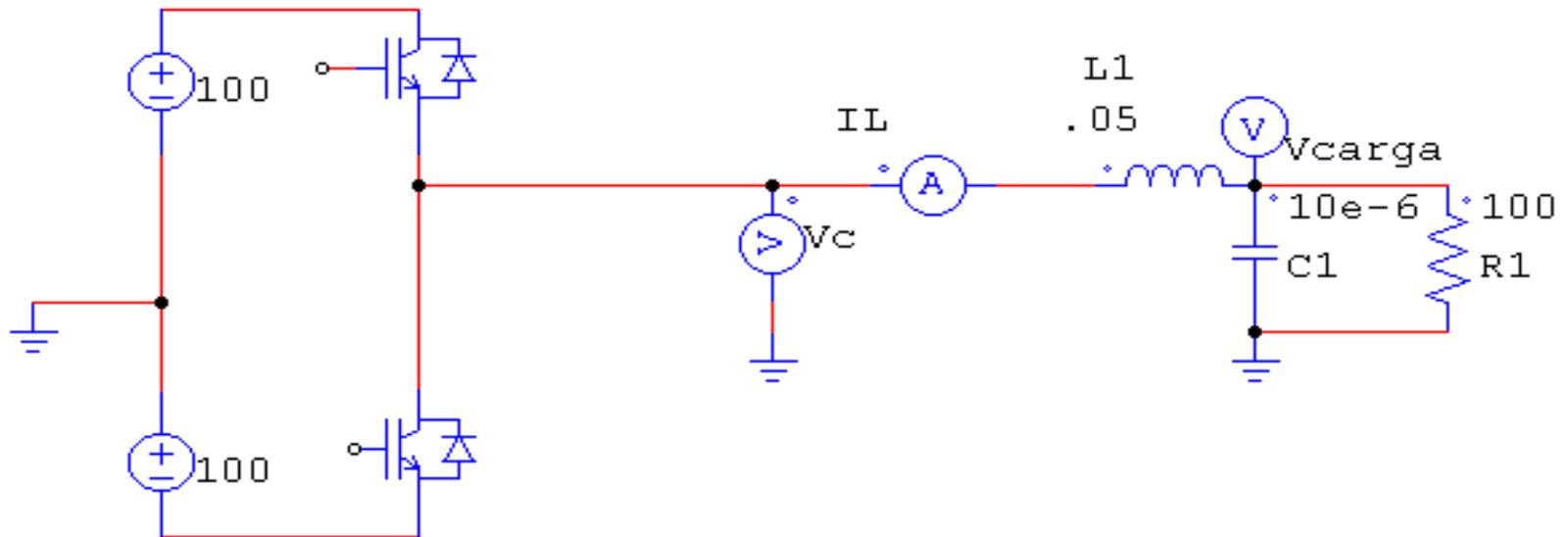
Comportamento do Filtro L



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



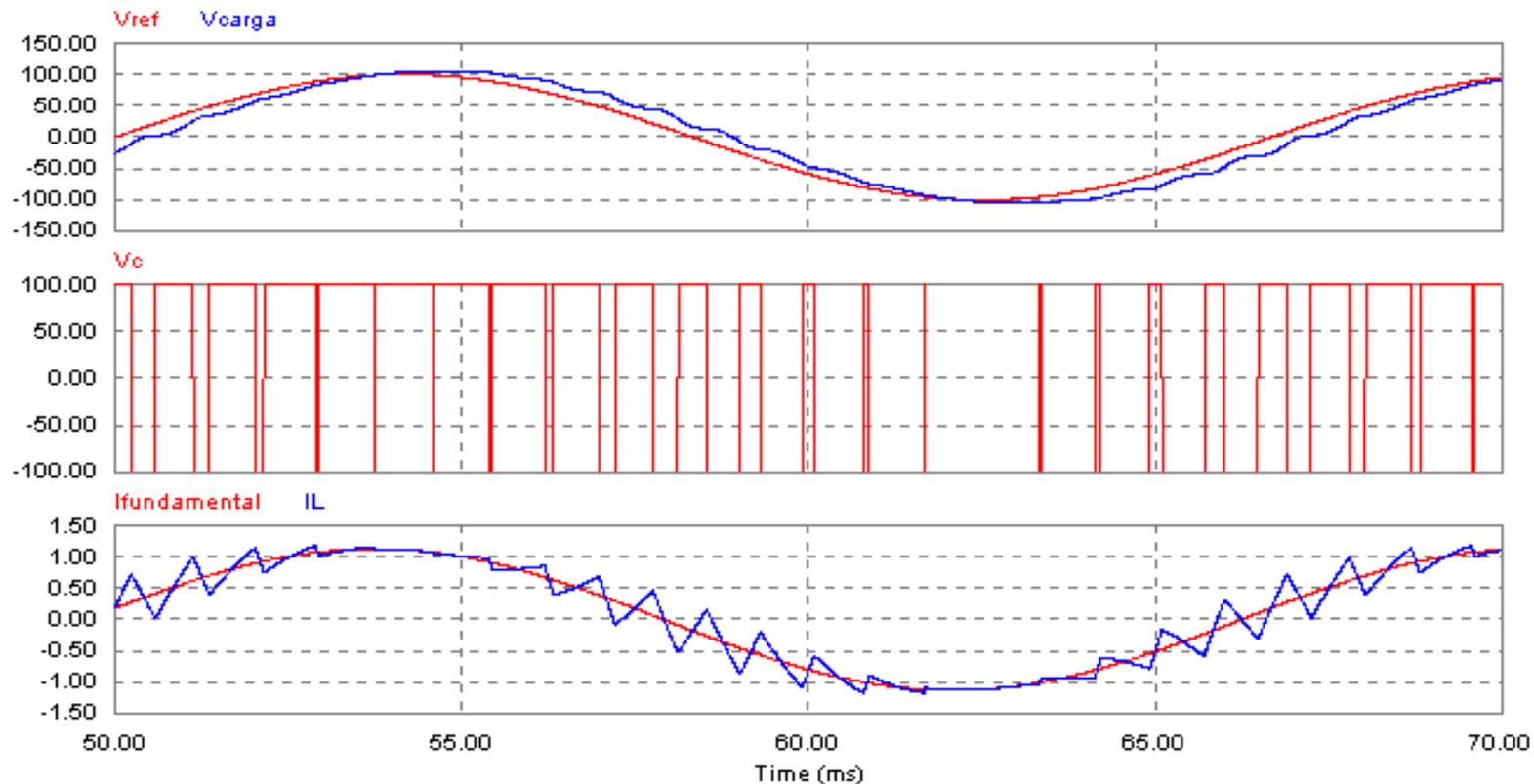
Filtrando a tensão de saída



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



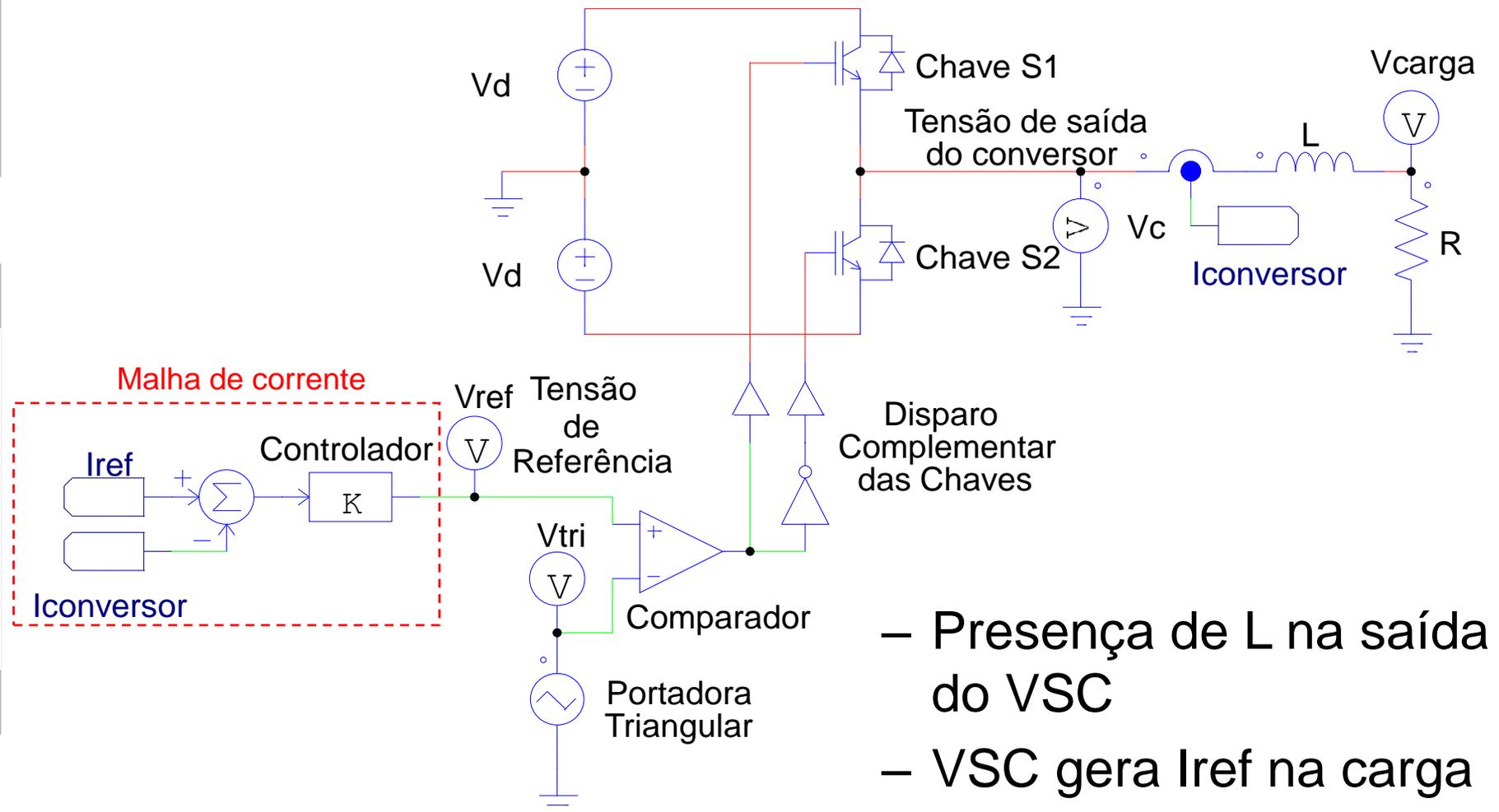
Comportamento do Filtro LC



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



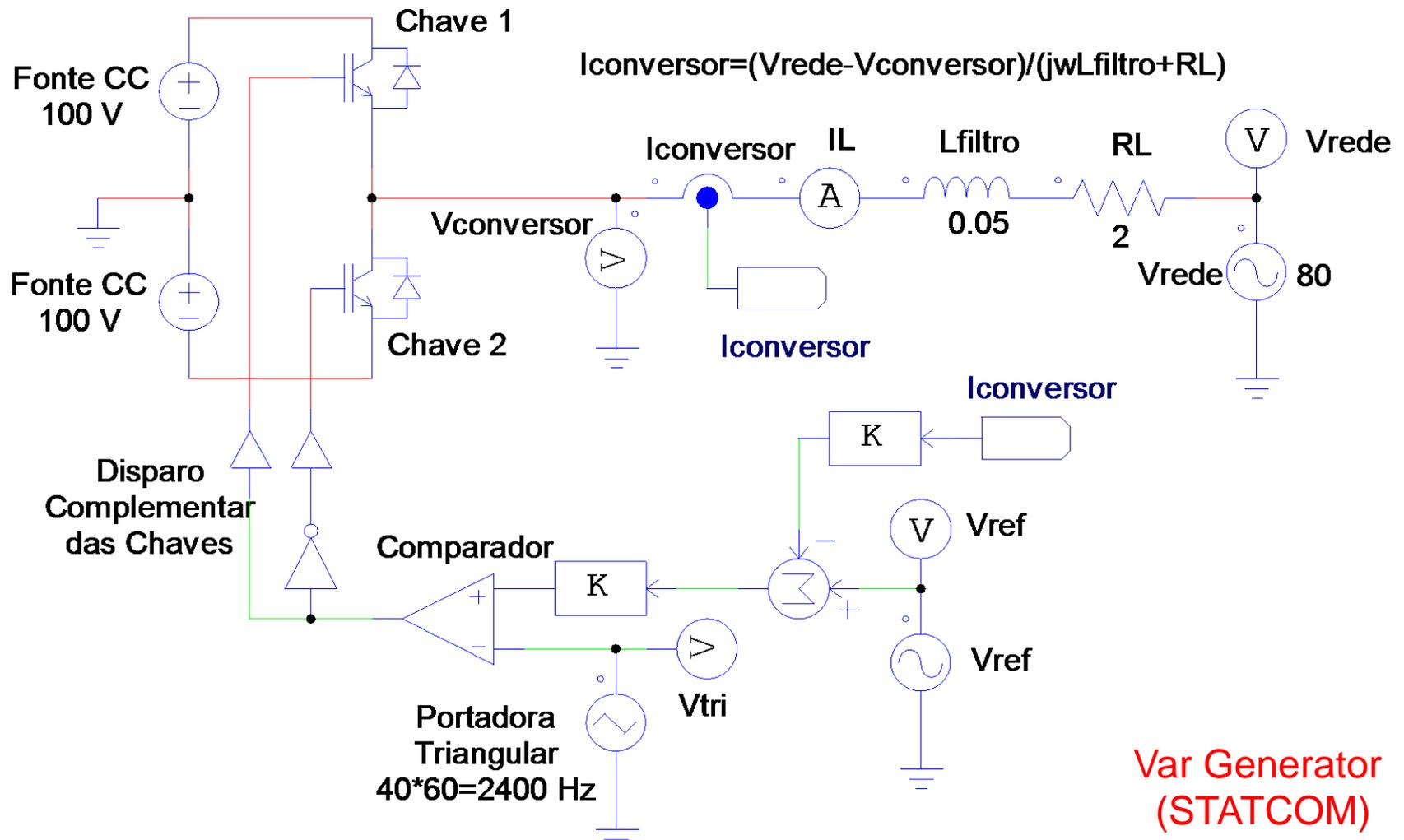
Obtendo uma Fonte de Corrente com um VSC



- Presença de L na saída do VSC
- VSC gera I_{ref} na carga



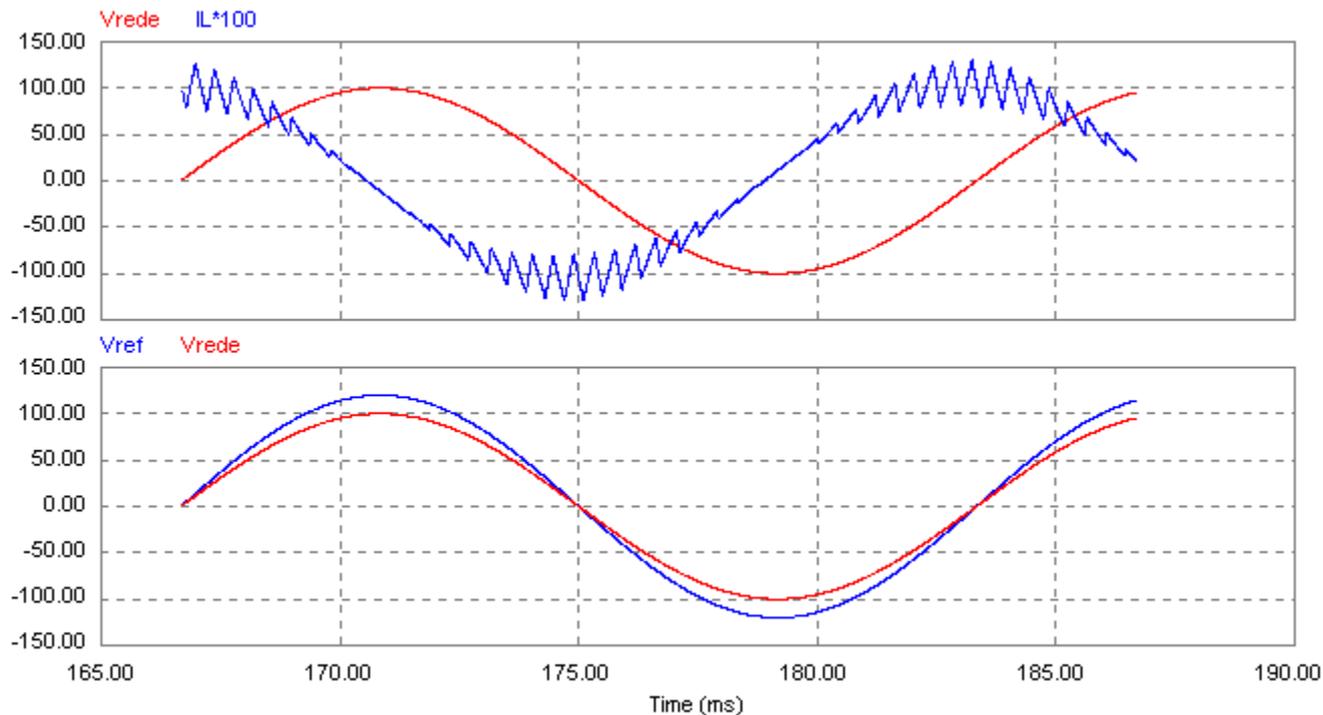
Exemplo: Emulando um Capacitor



Var Generator (STATCOM)



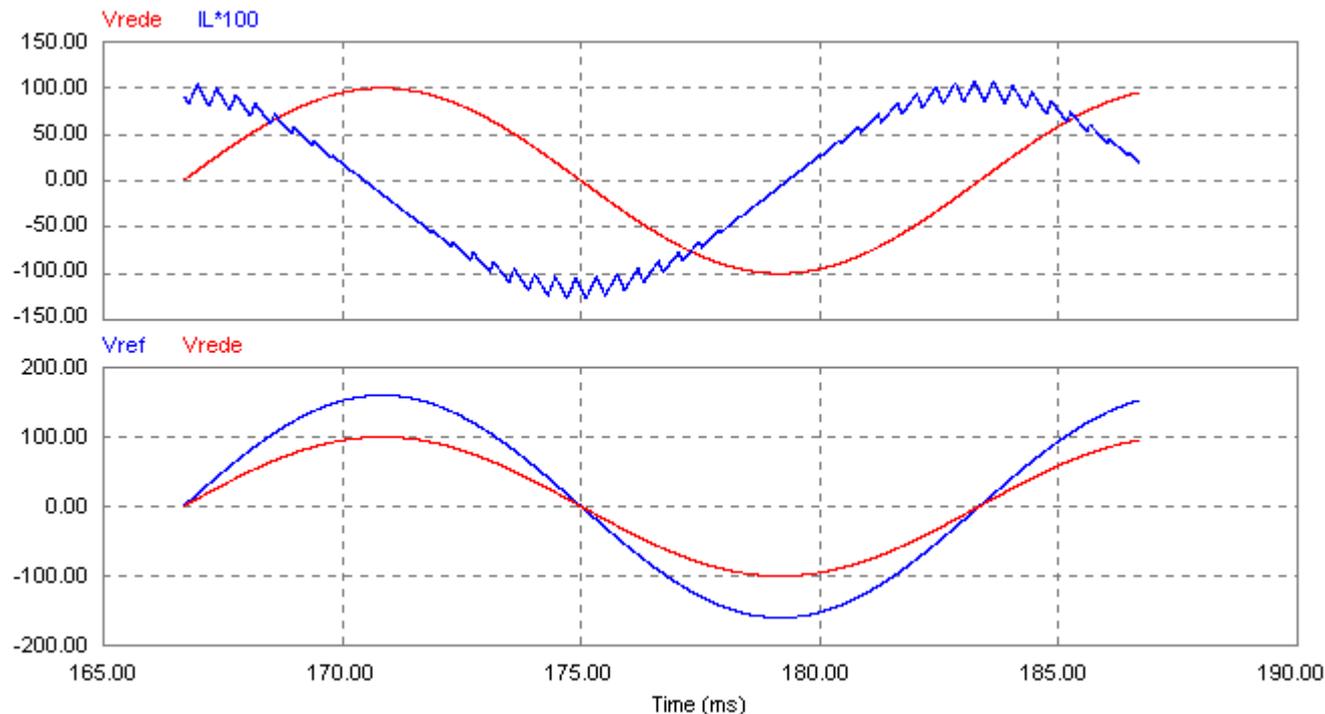
Ex: Emulando um Capacitor



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



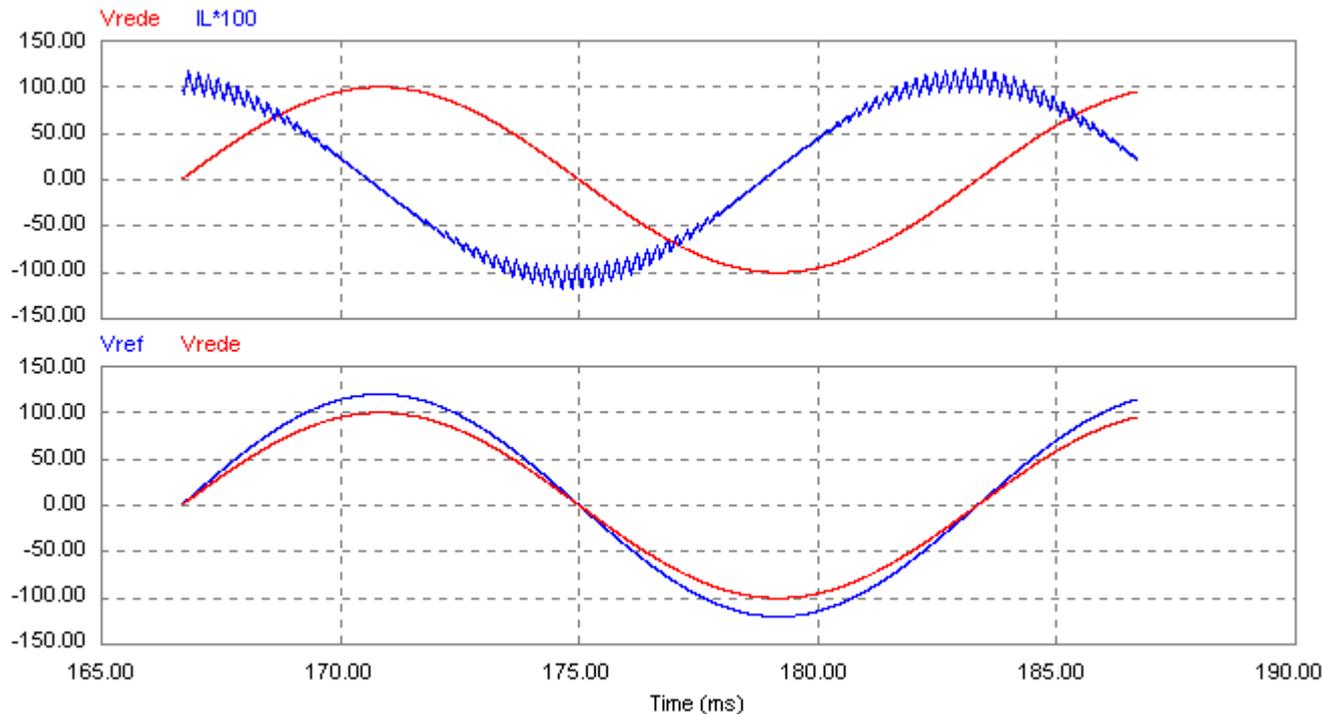
Reduzindo *ripple* com maior L



- $V_{rede\ pico}=100V$; $V_{ref\ pico}=160V$ (mesma fase!!)
- $X_L=3 \times 18 \Omega$, $f_m=2400Hz$, $V_d=160V$



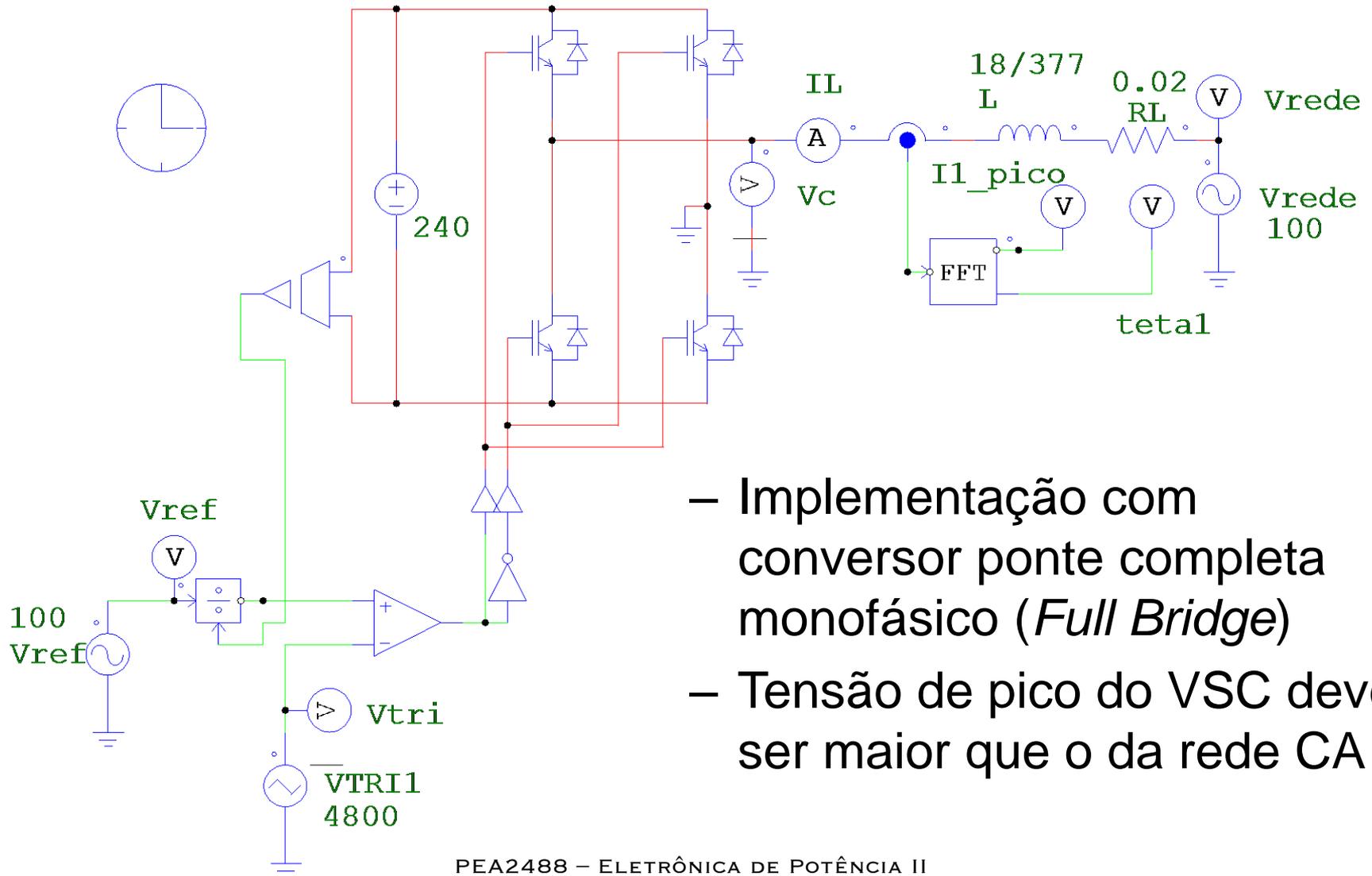
Reduzindo *ripple* com maior f_m



- $V_{rede\ pico}=100V$; $V_{ref\ pico}=120V$ (mesma fase!!)
- $X_L=18\ \Omega$, $f_m=4800Hz$, $V_d=120V$



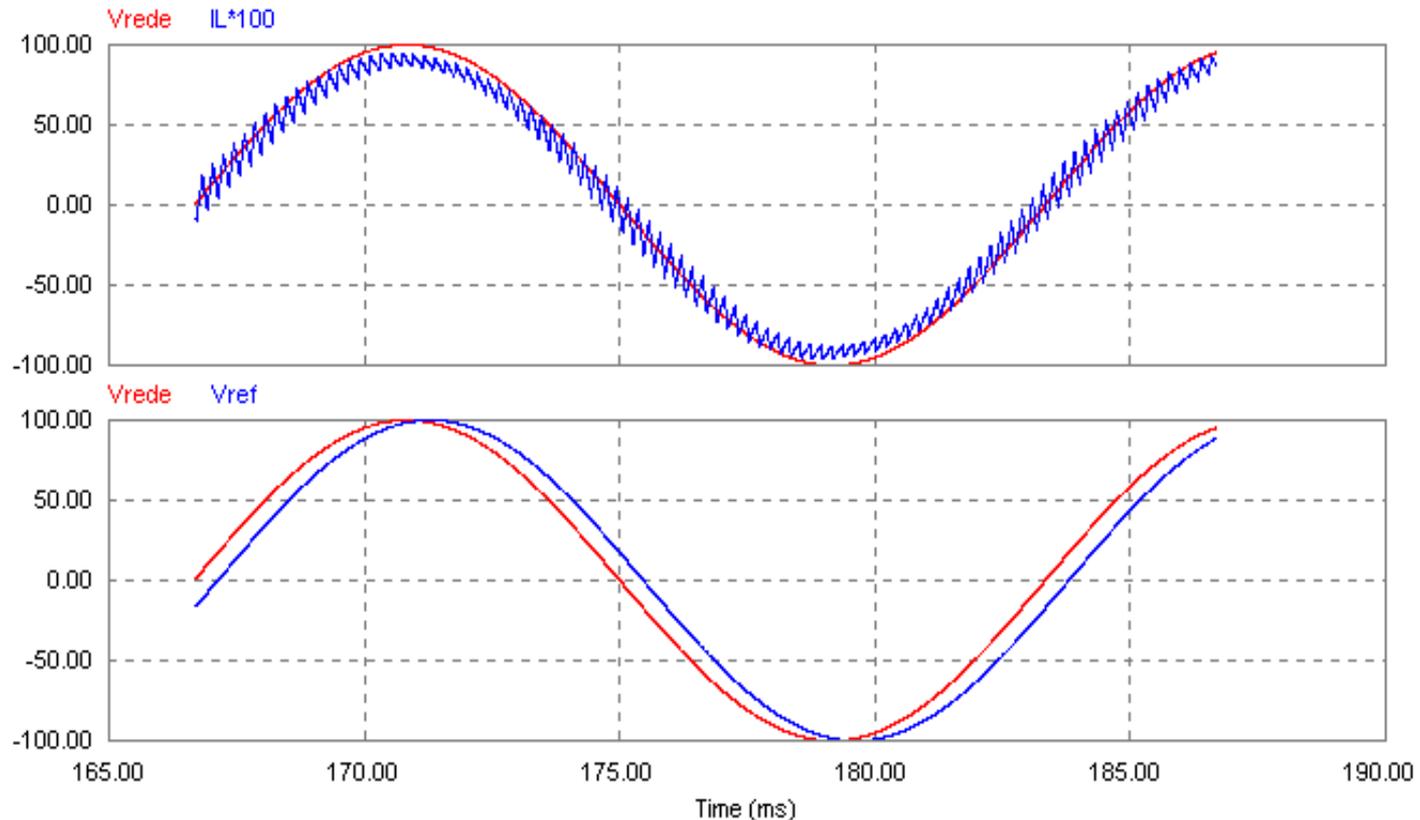
Retificador com Alto Fator de Potência



- Implementação com conversor ponte completa monofásico (*Full Bridge*)
- Tensão de pico do VSC deve ser maior que o da rede CA



Retificador com elevado fator de potência



- $V_{rede\ pico} = 100V$; $V_{ref\ pico} = 100V$ ($\phi = -10\text{graus!!}$)
- $X_L = 18\ \Omega$, $f_m = 4800\text{Hz}$, $V_d = 120V$



Conclusões Parciais

- Tem-se controle independente de P e Q
- L maior minimiza *ripple* de corrente
- L maior leva a maiores tensões no *link* DC
- f_m maior diminui o *ripple* de corrente
- Operação como VAR-Generator não consome potência (exceto perdas), dispensando as fontes no *link* DC

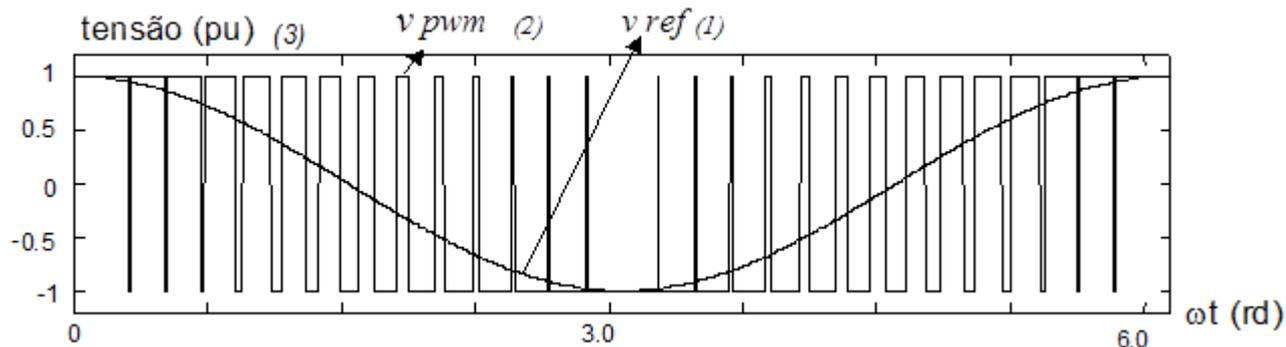


Implementação de Conversores de Elevada Potência

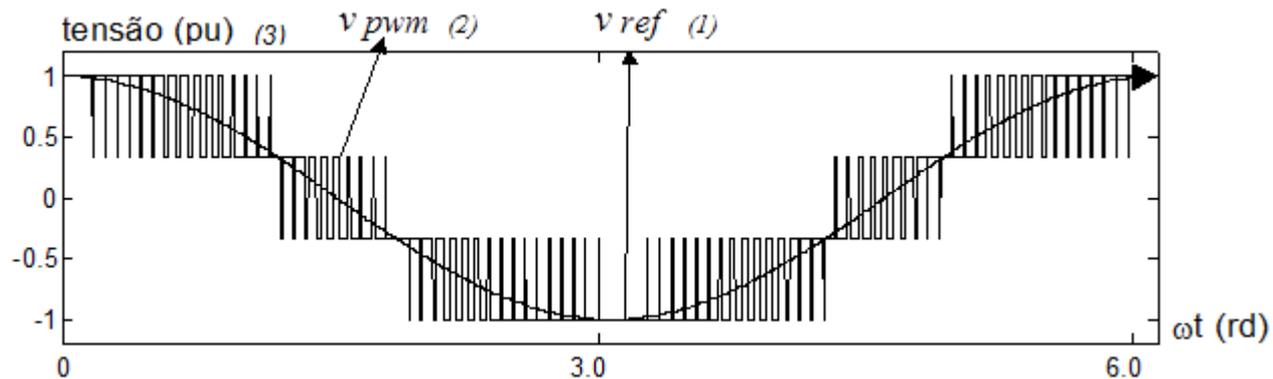
- Associação série / paralelo de chaves
- Associação série paralelo de conversores (Multiconversores)



Formas de Onda



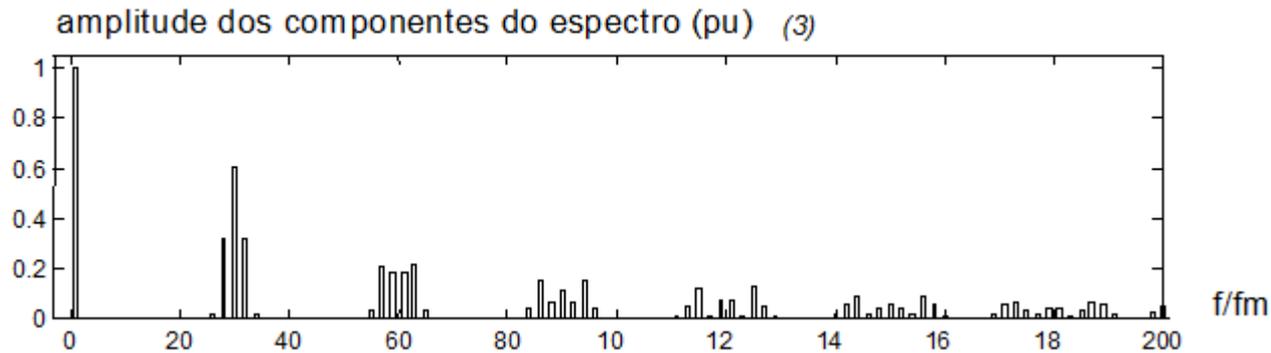
- Conversor único



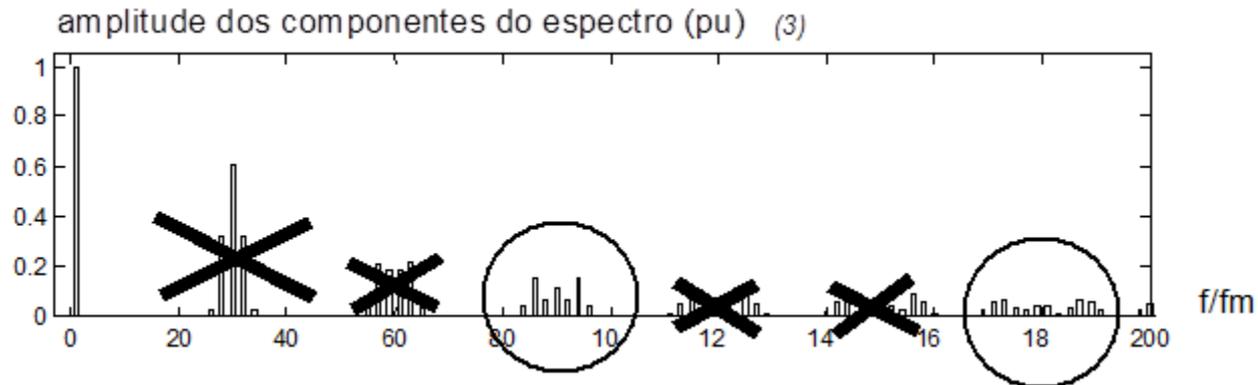
- Multiconversor



Espectro dos conversores



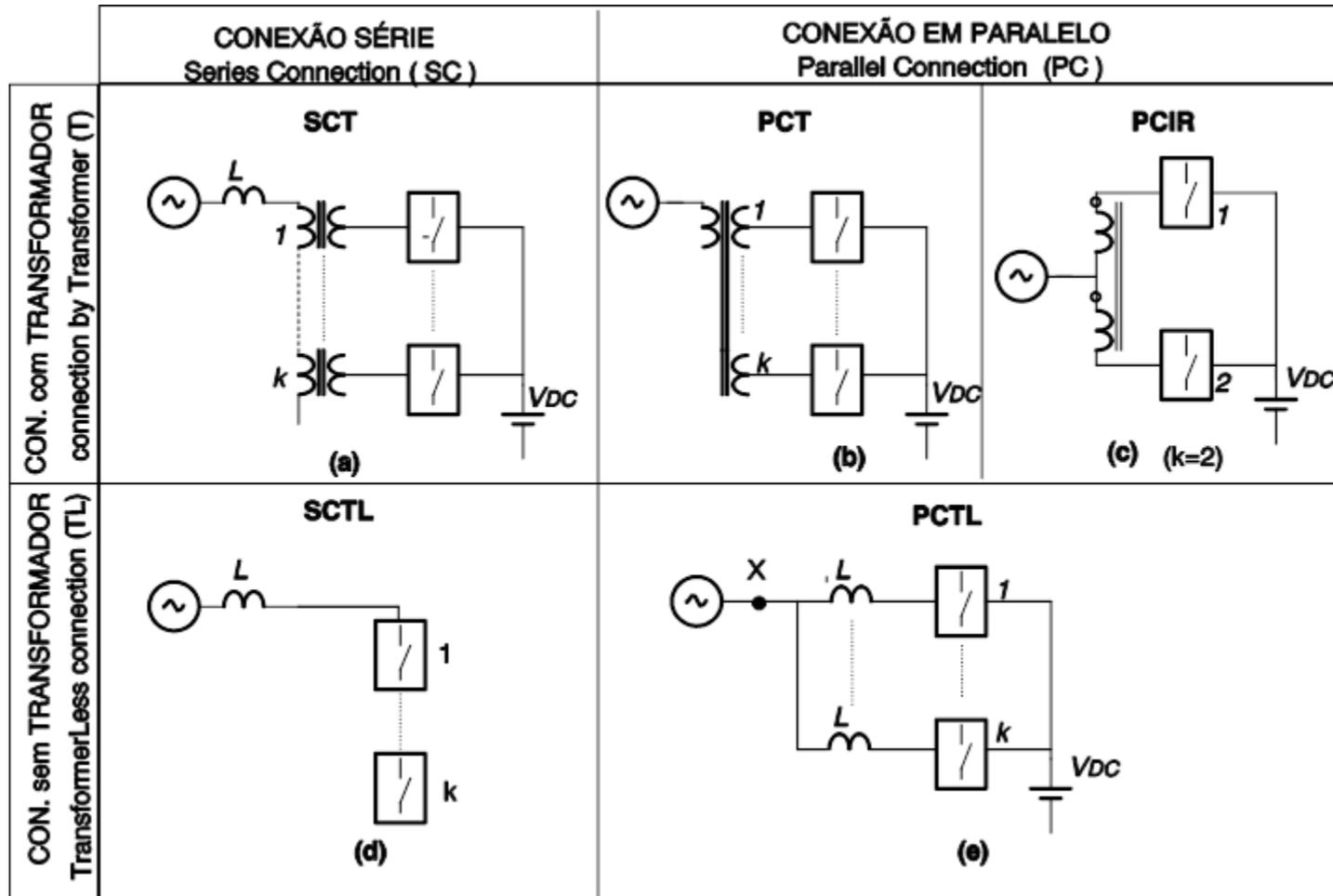
- Conversor único



- Multiconversor

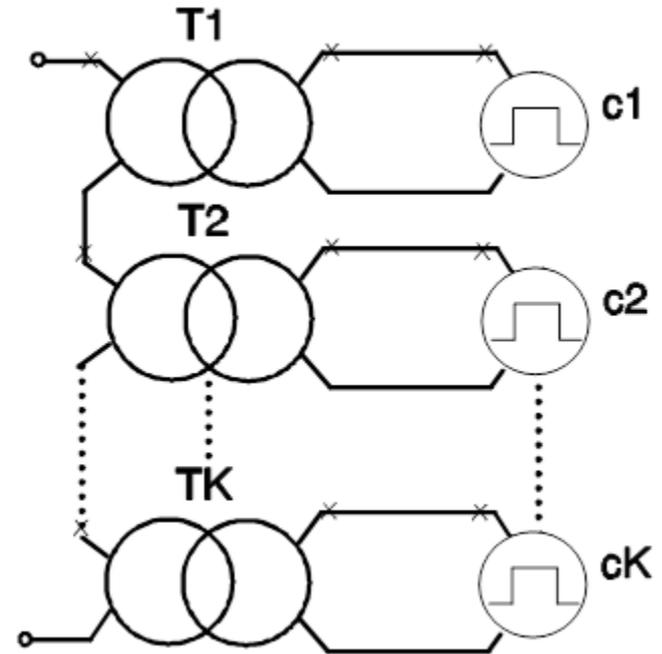
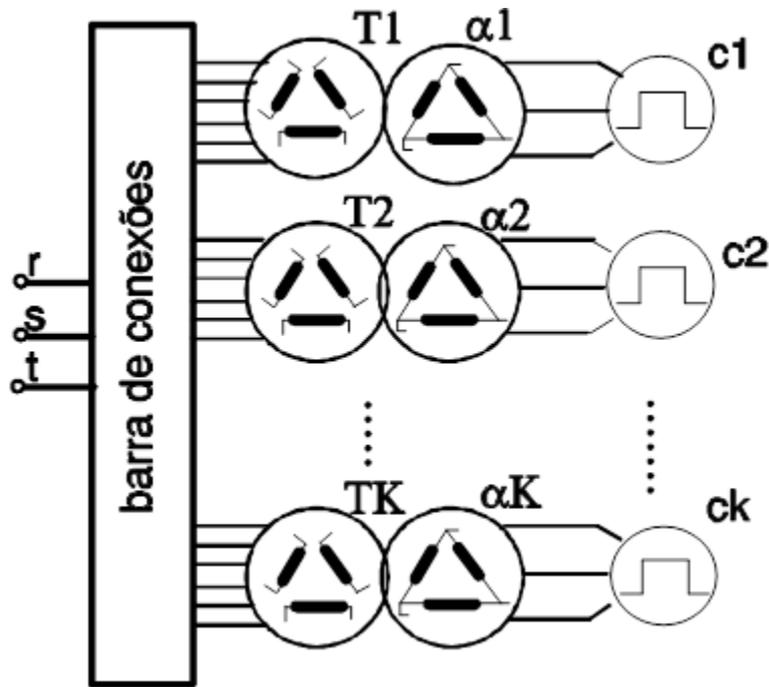


Multiconversores - Tipos





Associação série com transformadores

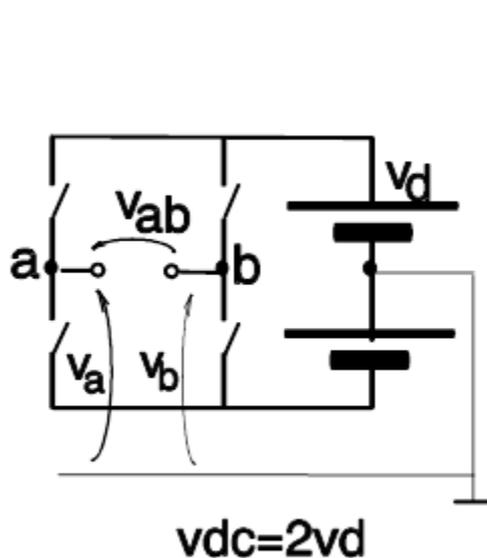


- Conexão de unidades trifásicas

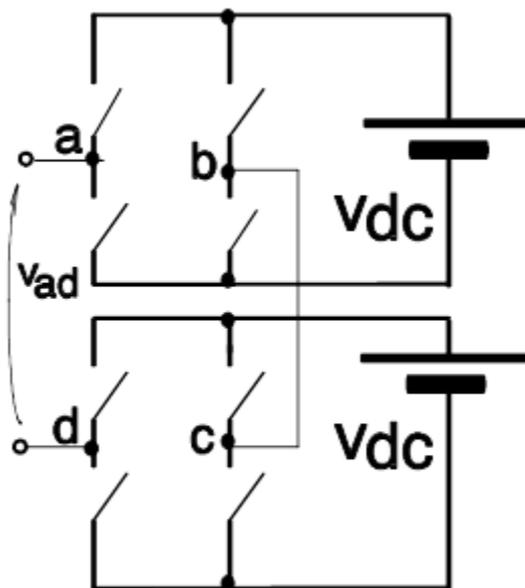
- Conexão de unidades monofásicas



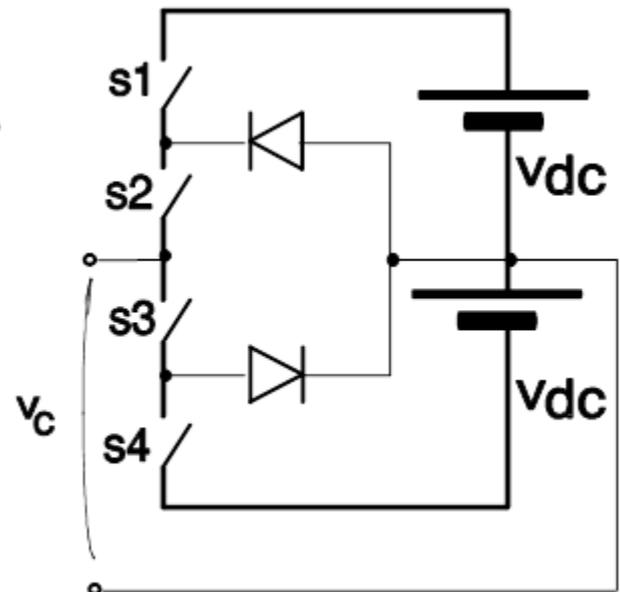
Associação série sem transformadores



- Conversor em ponte completa



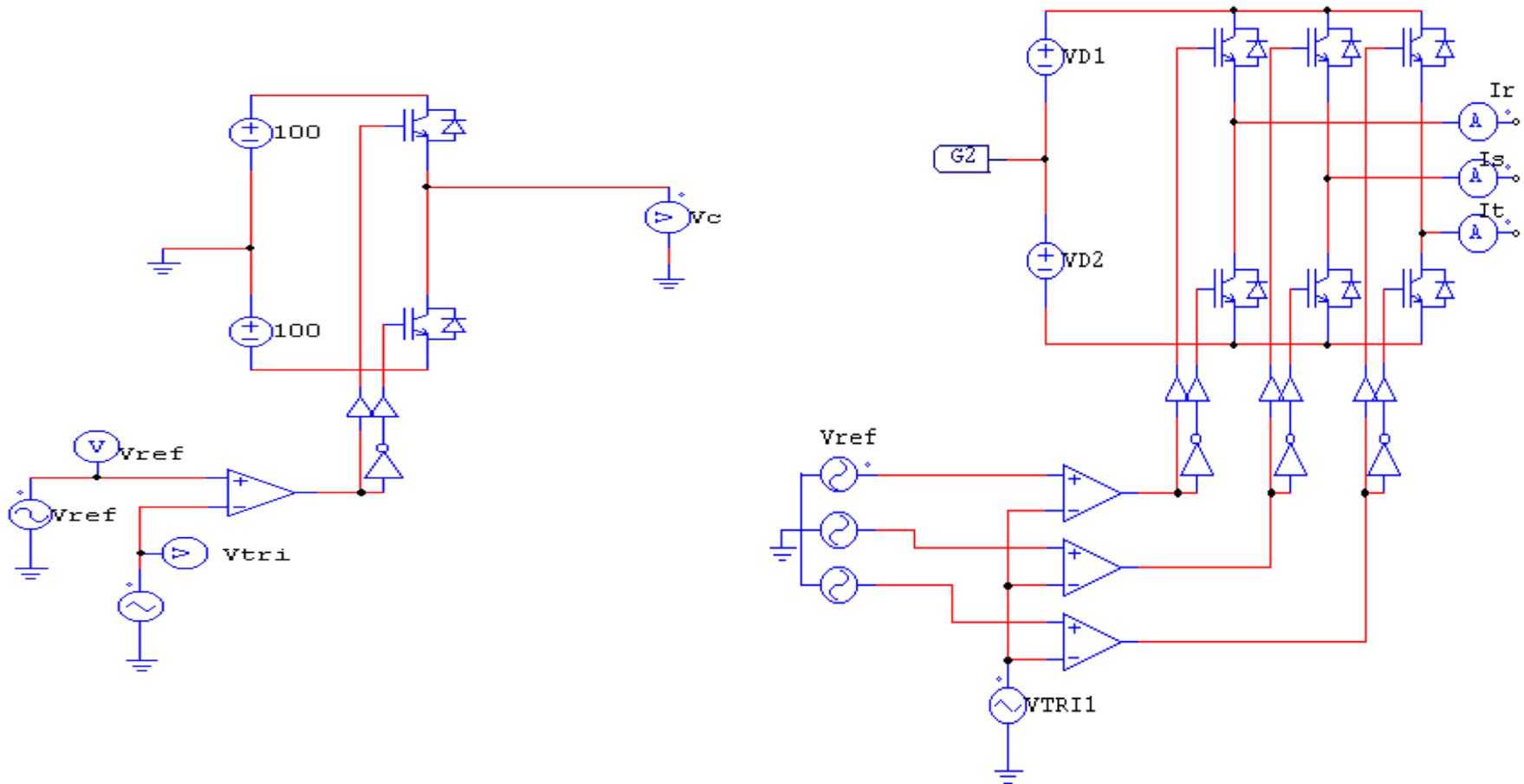
- Associação em série de dois conversores



- Conversor tipo NPC (*Neutral Point Clamped*)



Inversor VSC Mono / Inversor VSC Trifásico



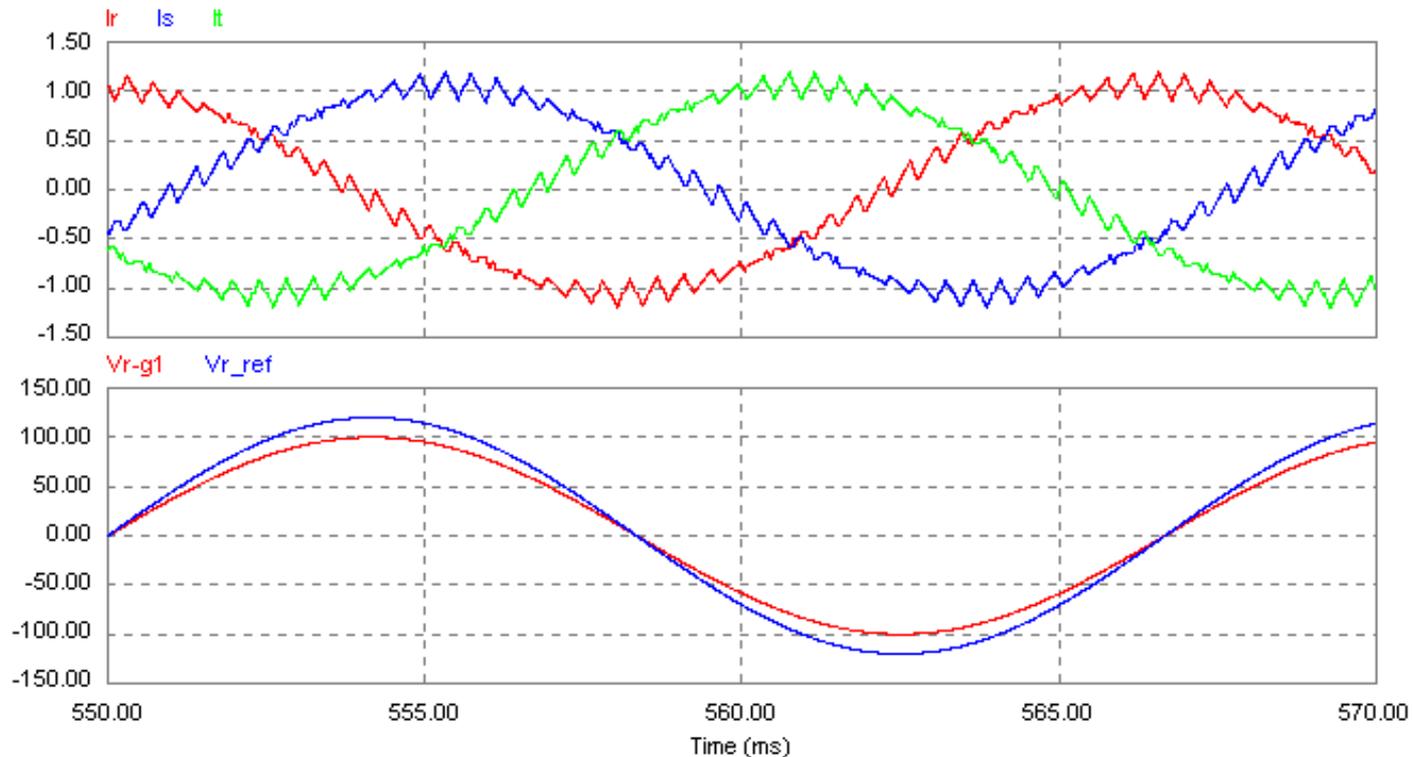


Ex. VAR GEN. Trifásico

- 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: $f_m=2400Hz$



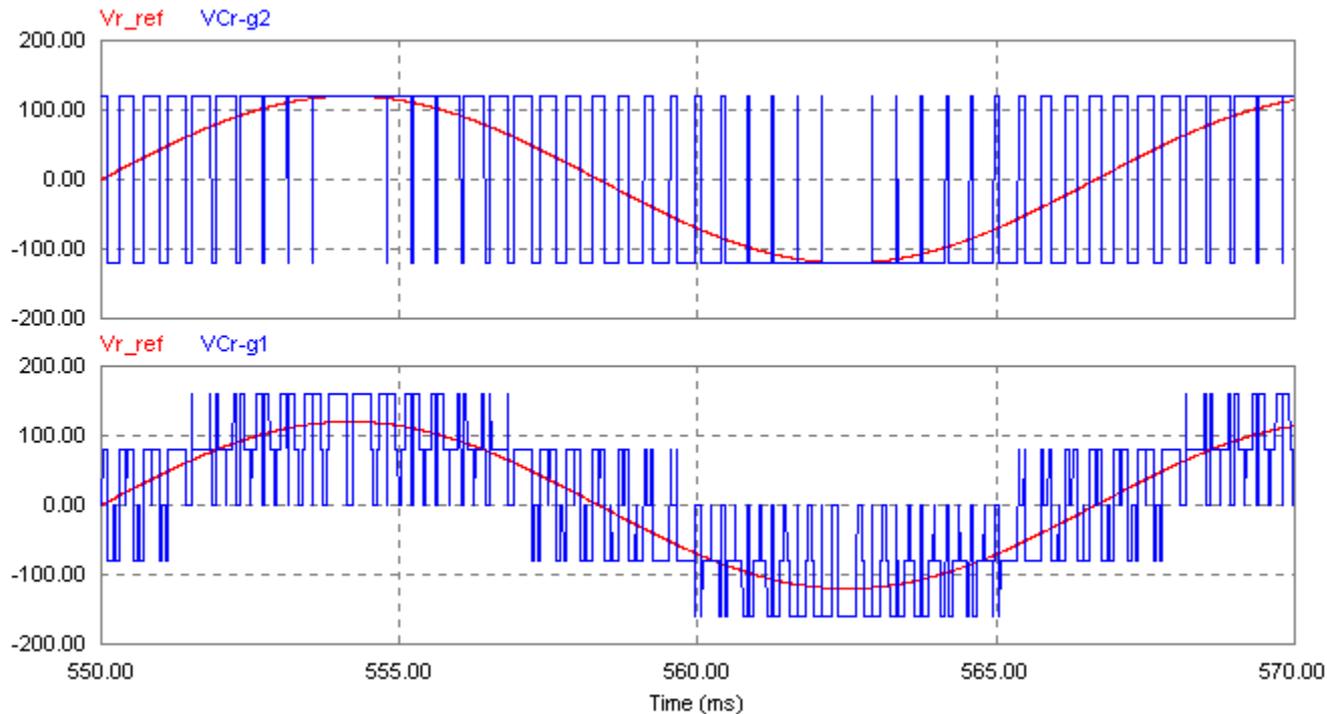
Ex. VAR GEN. Trifásico



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



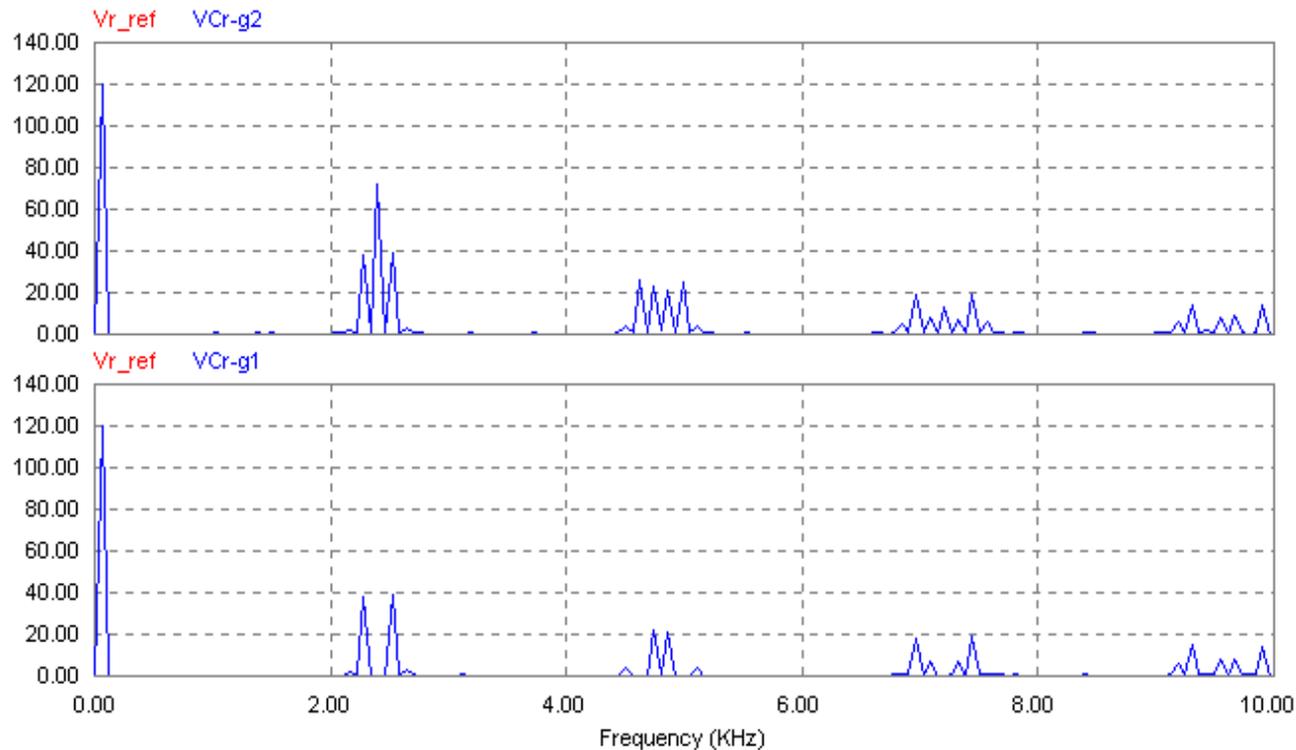
Ex. VAR GEN. Trifásico



- Tensão na fase R do conversor (VCr-g2)
- Tensão equivalente na fase R (VCr-g1) (impõe corrente)



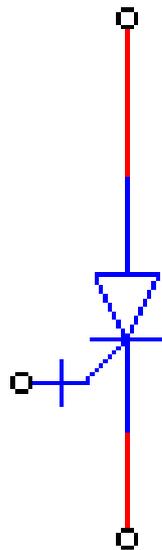
Ex. VAR GEN. Trifásico



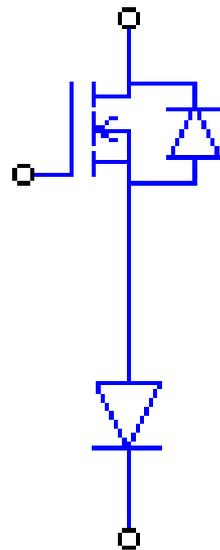
- Espectro da tensão na fase R do conversor (VCr-g2)
- Espectro da tensão equivalente na fase R (VCr-g1)



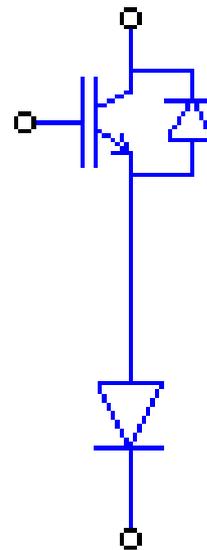
Conversor fonte de corrente (CSC): Implementação das chaves



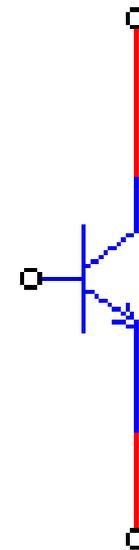
GTO



MOSFET



IGBT

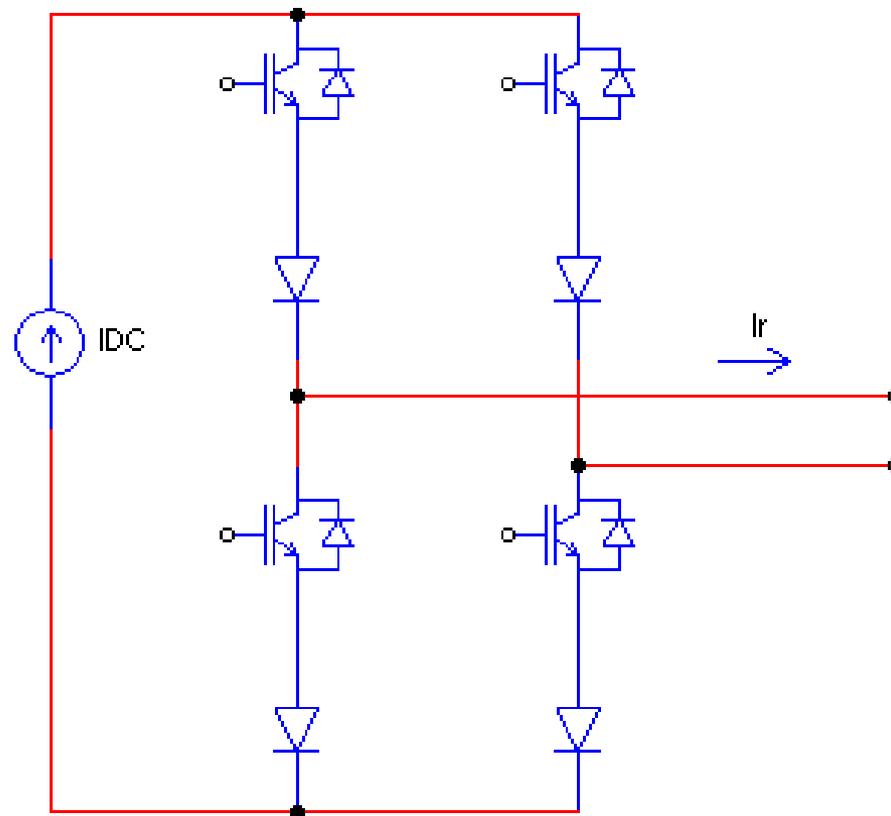


Transistor
Bipolar (NPN)

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



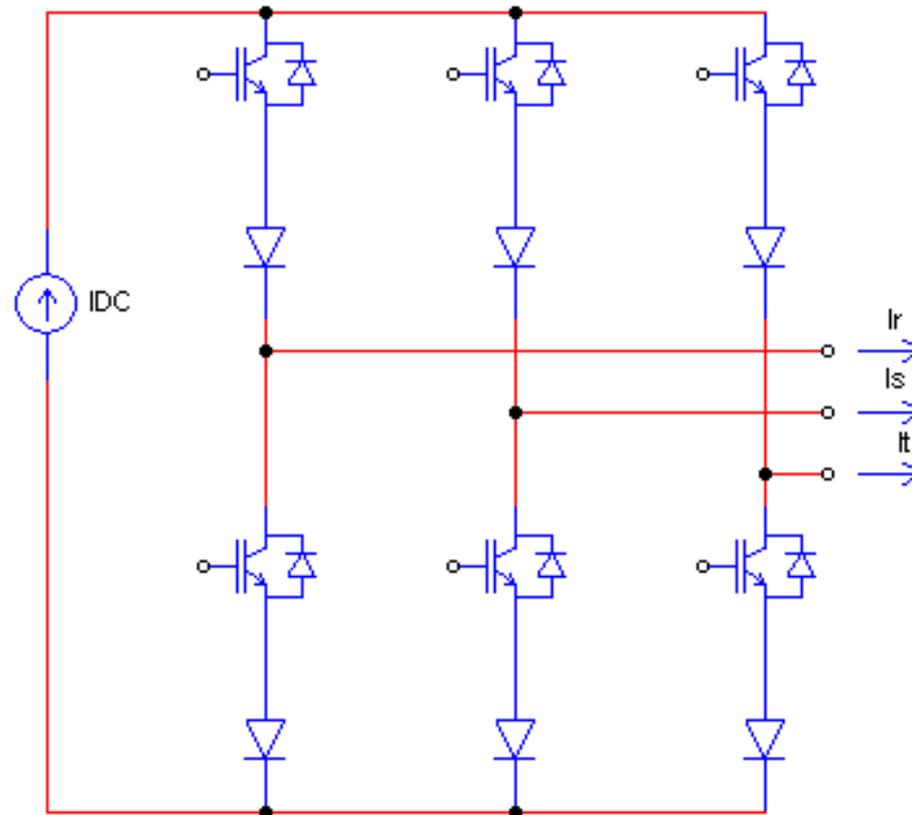
Conversor Tipo Fonte de Corrente - 1 ϕ



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



Conversor Tipo Fonte de Corrente - 3 ϕ



– I_r , I_s , I_t podem assumir os valores : $-IDC$, 0 , $+IDC$



Aplicações do Conversor tipo Fonte de Corrente

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



Filtros Ativos de Potência

- Implementação com conversores auto-comutados (transistores como chaves)
- Objetivo:
 - apresentar alternativas para a implementação das fontes de tensão e correntes utilizadas em Filtros Ativos, FACTS e demais compensadores empregados em sistemas de potência

Tabela 1: Aplicação de Filtros Ativos em Problemas de Qualidade de Energia

| Conexão | Fonte do Problema | |
|------------------|---------------------------------------|---|
| | Carga influi na rede CA | Rede CA influi na carga |
| Paralelo (Shunt) | Filtragem de corrente harmônica | |
| | Compensação de corrente reativa | |
| | Compensação de desbalanço de corrente | |
| | Compensação de Voltage Flicker | |
| Série | Filtragem de corrente harmônica | Compensação de Voltage Sag/Swell |
| | Compensação de corrente reativa | Compensação de desbalanço de tensão |
| | Compensação de desbalanço de corrente | Compensação de distorção de tensão |
| | Compensação de Voltage Flicker | Compensação de interrupção de tensão |
| | Compensação de desbalanço de tensão | Compensação de Voltage Flicker e Voltage Notching |
| Série Paralelo | Filtragem de corrente harmônica | Sag/Swell de tensão |
| | Compensação de corrente reativa | Compensação de desbalanço de tensão |
| | Compensação de desbalanço de corrente | Compensação de distorção de tensão |
| | Flicker de tensão | Compensação de interrupção de tensão |
| | Compensação de desbalanço de tensão | Compensação de Voltage Flicker e Voltage Notching |

Fonte: Rudinick, Dixon, Morán, *Delivering Clean and Pure Power*, IEEE Power & Energy Magazine, 2003



Comparação entre filtro passivo e ativo

| Filtro Passivo | Filtro Ativo |
|-----------------------------|---|
| Baixo custo (US\$100/kVA) | Alto custo (~US\$1k/kVA) |
| Robusto | Robustez depende de projeto |
| Projeto específico | Projeto mais genérico |
| Limitação de faixa filtrada | Faixa filtrada (depende da dinâmica do conversor) |
| Não seletivo | Seletivo |
| Pode gerar ressonâncias | Pode amortecer ressonâncias |



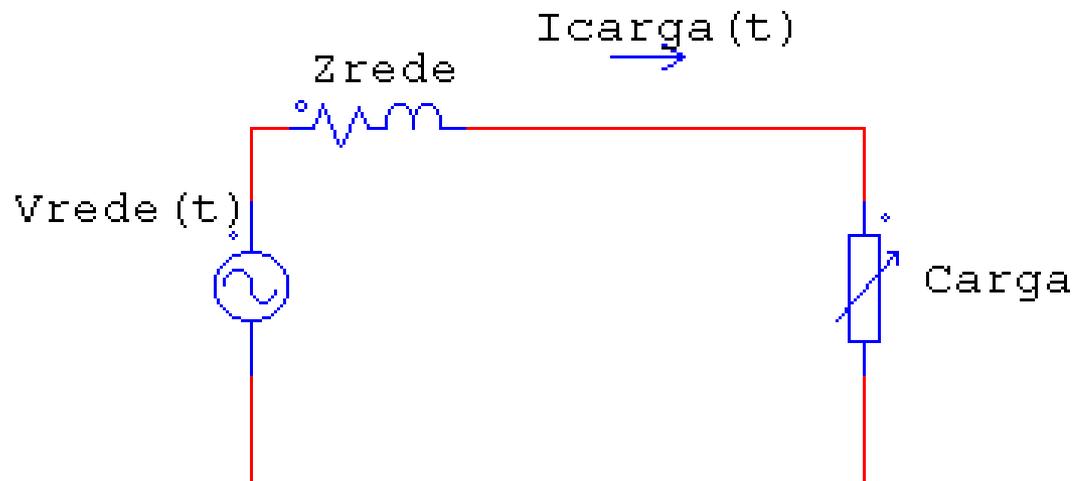
Exemplos de implementação de Filtros Ativos de Potência

- Topologias:
 - Paralelo (Shunt)
 - Série
 - Série/Paralelo
- Estratégias de controle:
 - Filtragem total
 - Filtragem seletiva



Filtro ativo de corrente (Shunt)

- Uma carga não linear, alimentada com tensão $V_{rede}(t)$ absorve uma corrente deformada $I_{carga}(t)$

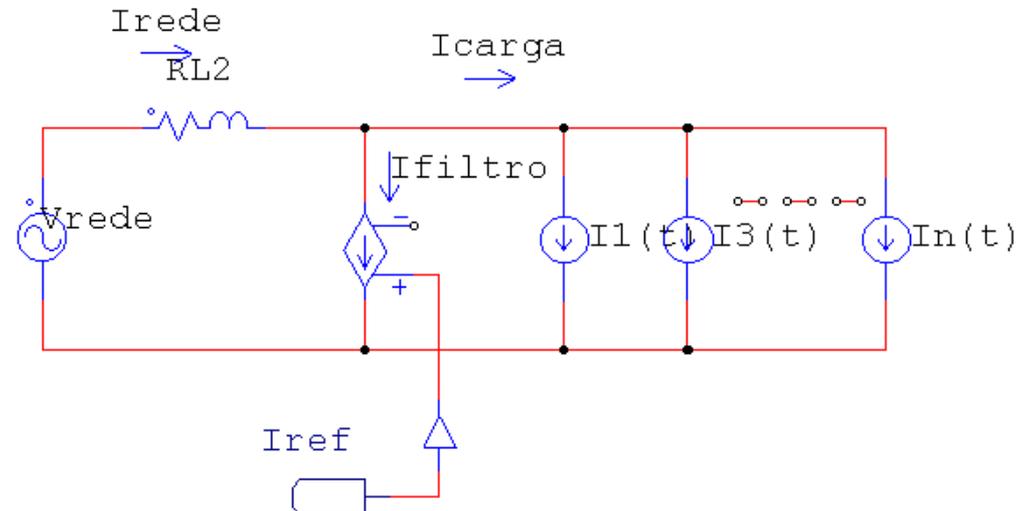
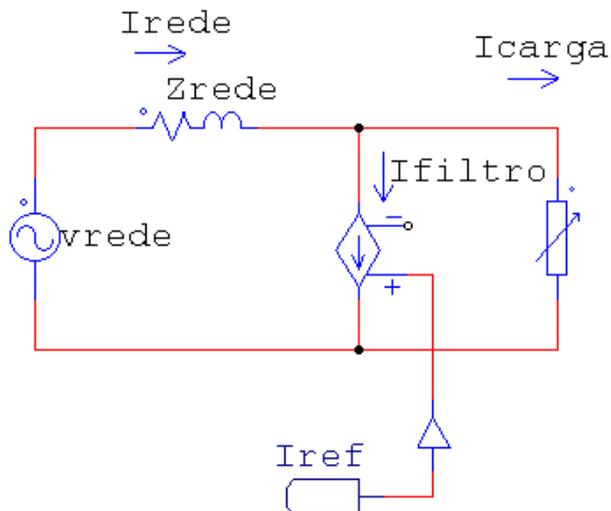




Filtro ativo de corrente (Shunt)

- Inserção de fonte de corrente I_{filtro} em paralelo com a carga
- Carga modelada como fontes de corrente em paralelo
- Deseja-se que a corrente na rede seja igual ao componente fundamental da carga ($I_{\text{rede}}(t) = I_1(t)$)
- Para isso impõe-se uma corrente no filtro igual a:

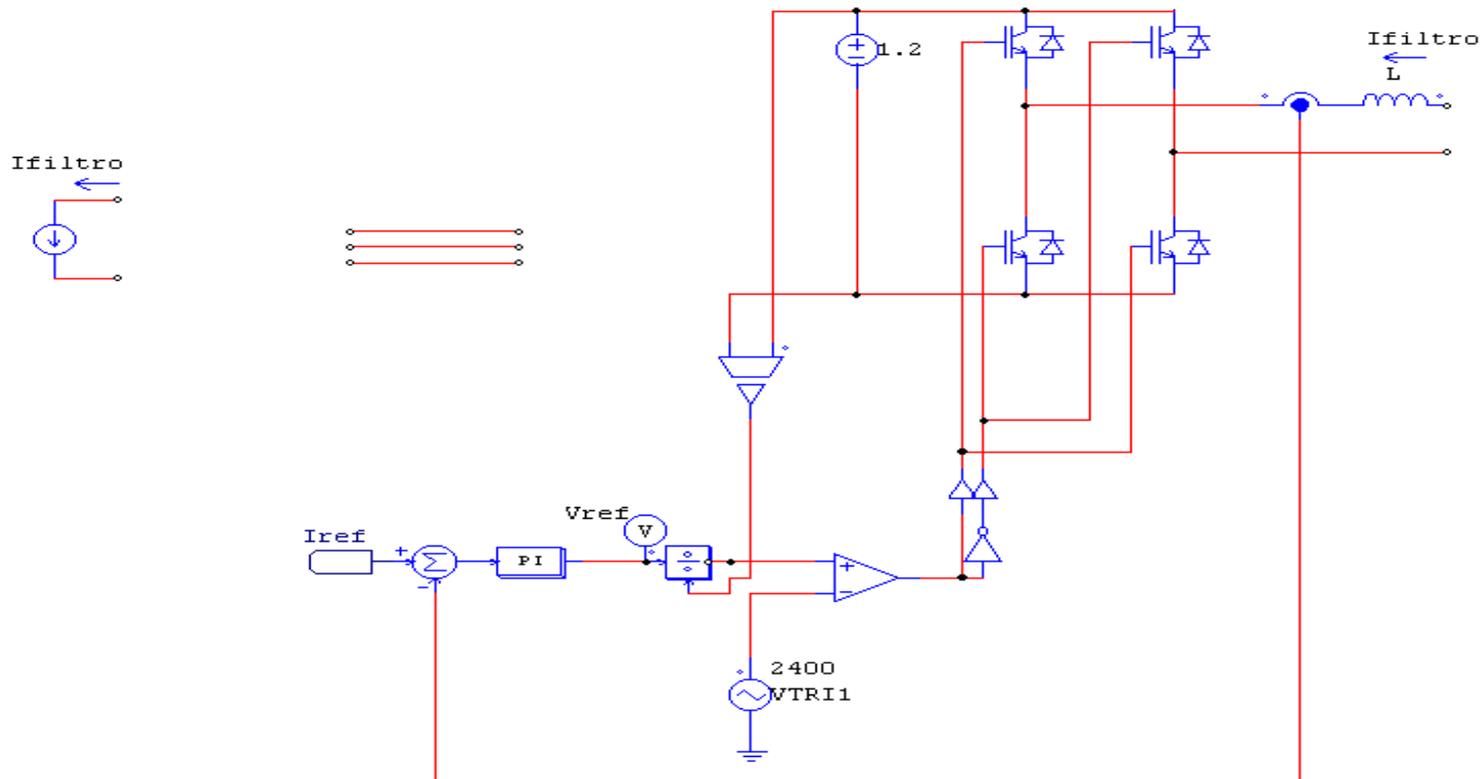
$$I_{\text{filtro}}(t) = I_{\text{carga}}(t) - I_1(t)$$





Filtro ativo de corrente (Shunt)

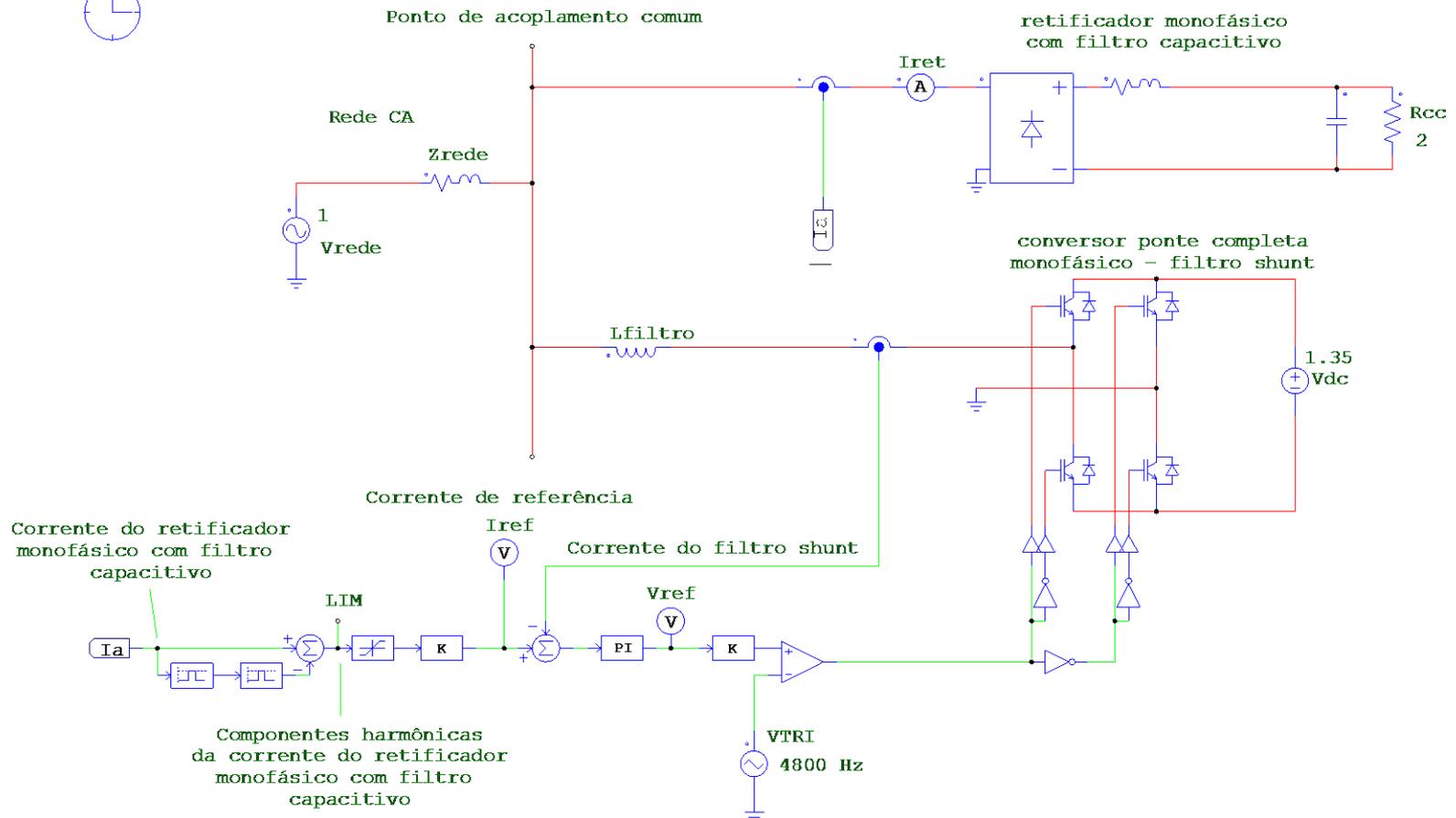
- Gerador de corrente controlado (monofásico):
 - $f_m=2400\text{Hz}$
 - $V_{DC}=1,2\text{ pu}$ (para conseguir impor corrente)





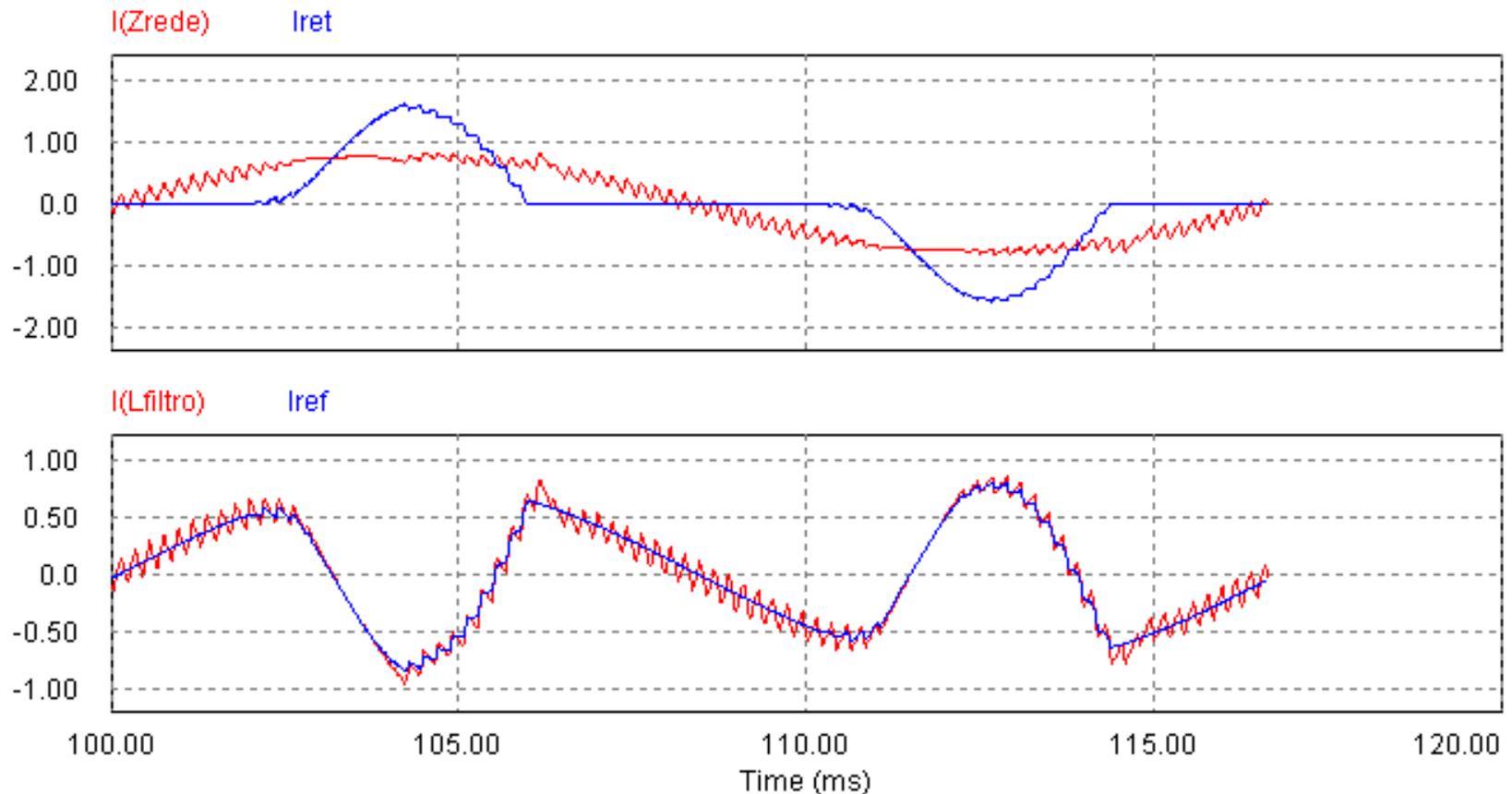
Filtro ativo de corrente (Shunt)

- Exemplo com carga não linear (retificador)
- Corrente de referência rastreia somente as harmônicas





Filtro ativo de corrente (Shunt)



- Resultado de simulação com PSIM (ver $I(Zrede)$ e I_{ret})

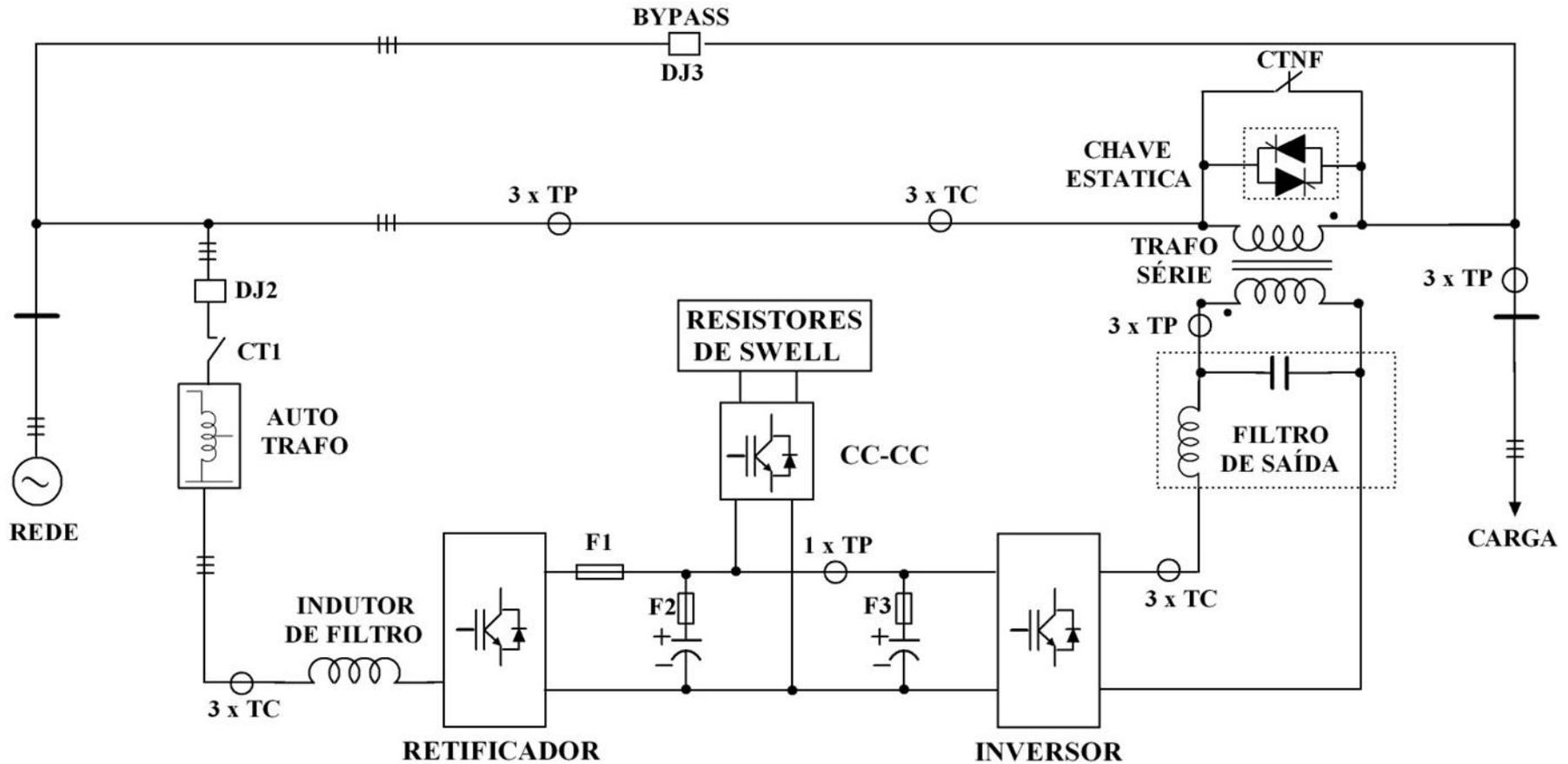


Aplicação para correção de distúrbios transitórios

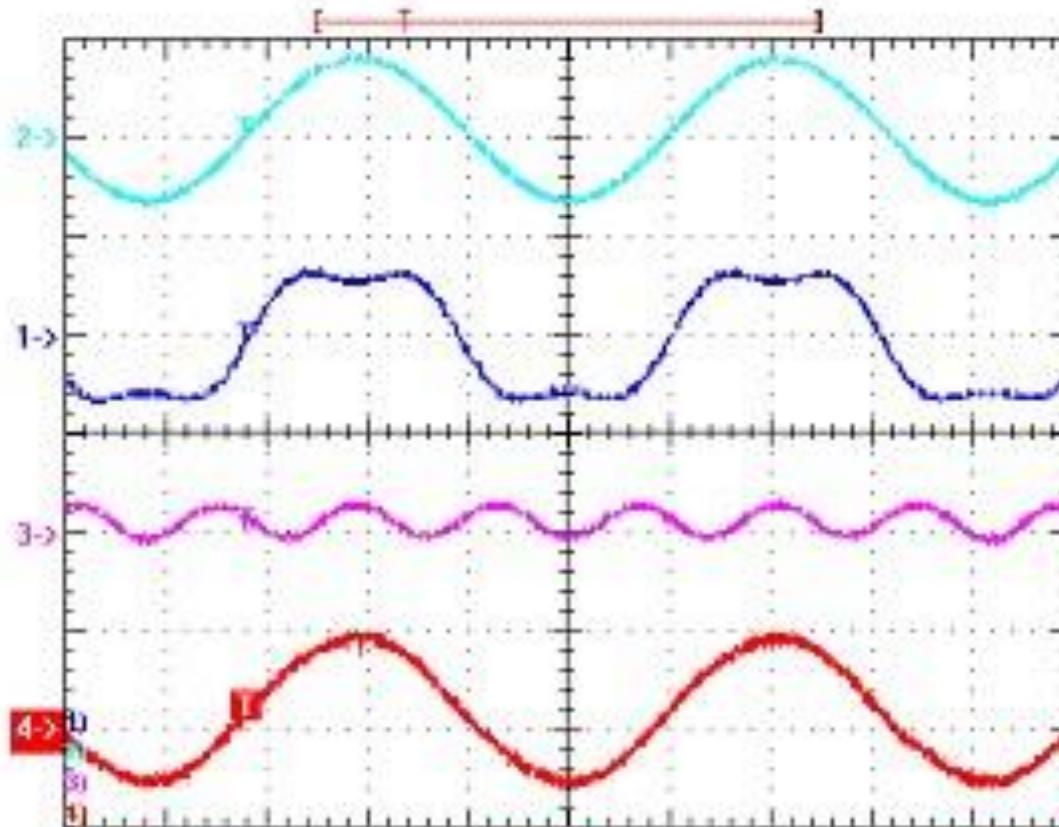
- Exemplo: DVR (*Dynamic Voltage Restorer*);
- Correção de afundamentos (*sags*) e elevações (*swells*) momentâneas de tensão;
- Pode ser projetado para corrigir harmônicas de tensão de carga e harmônicas de corrente na rede.



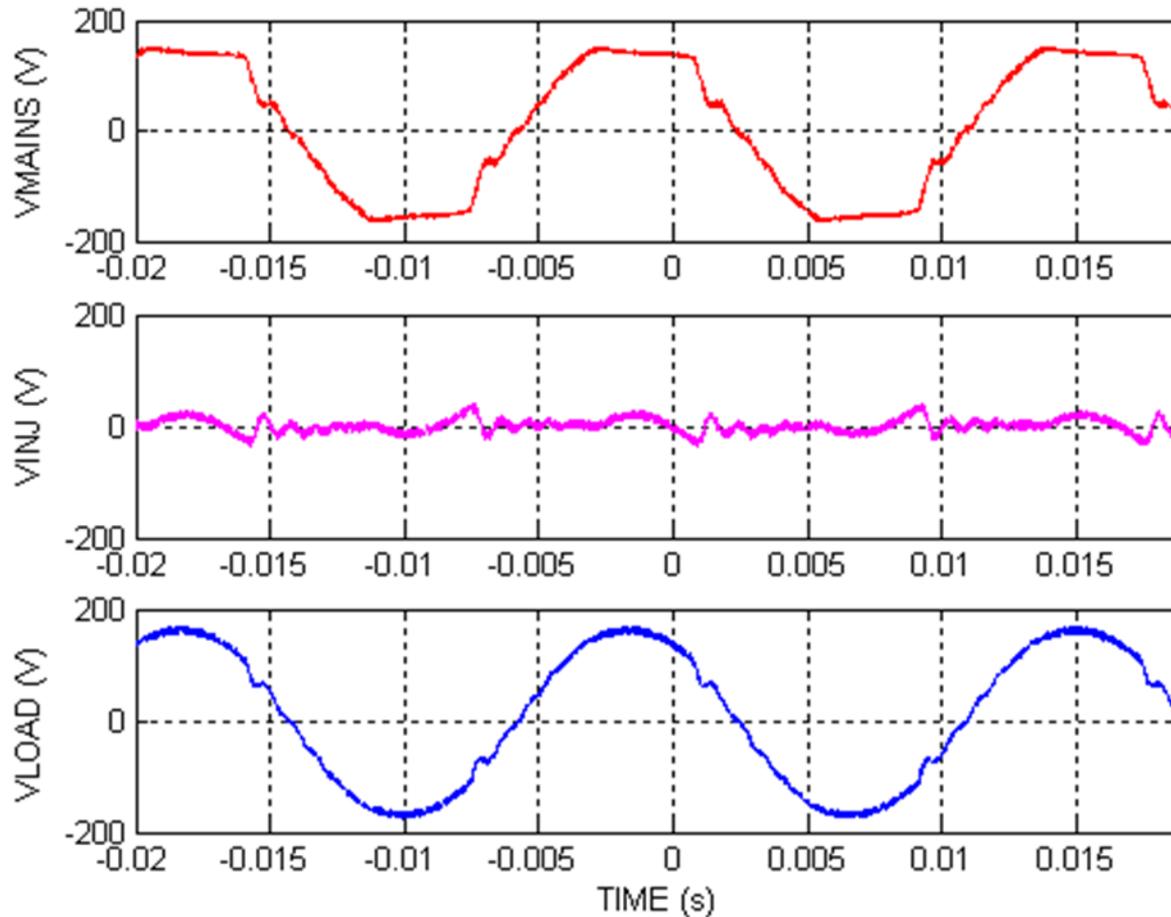
DVR (*Dynamic Voltage Restorer*)



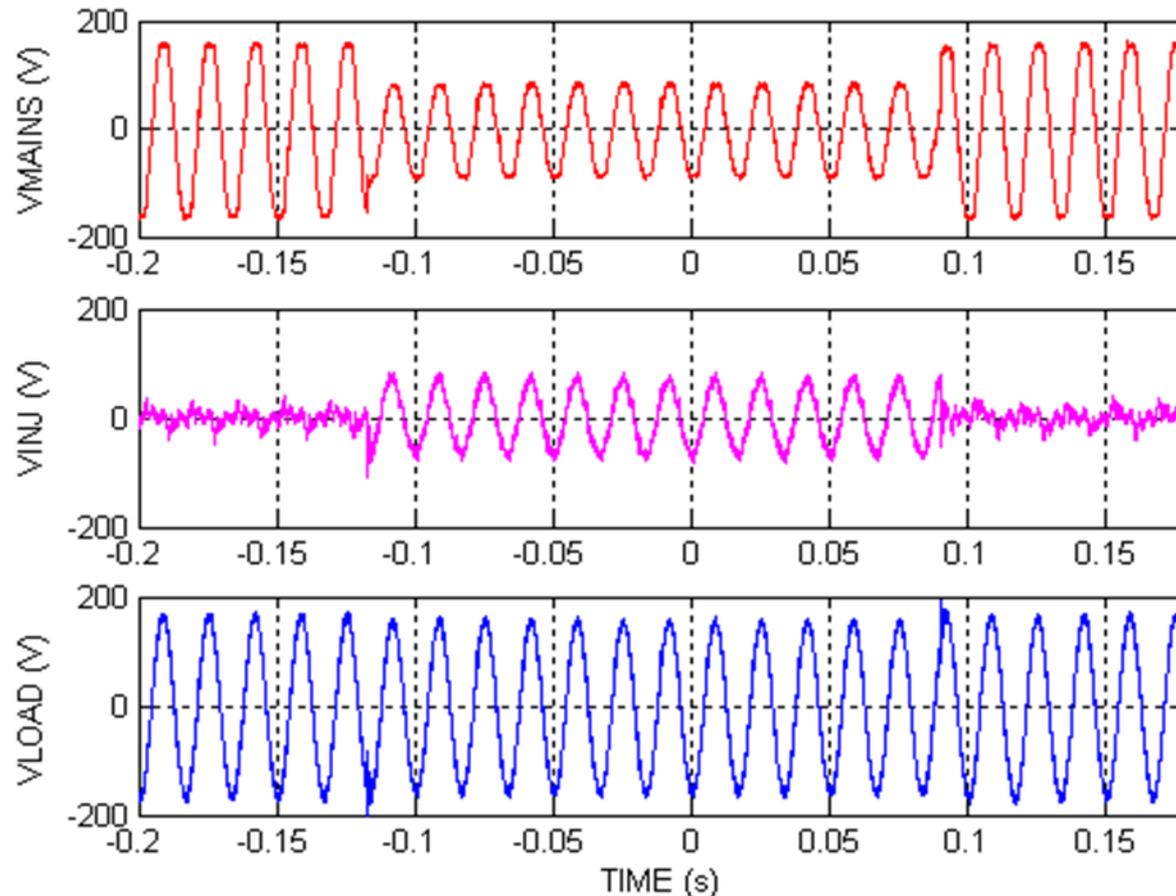
- Esquema elétrico unifilar – ramos série e paralelo



- DVR: Resultados experimentais de filtragem de tensão harmônica: tensão de referência (ciano), tensão de fase da rede com 25% de 3a harmonica (azul), tensão injetada (púrpura) e tensão de fase do lado da carga (vermelho). Protótipo de 5kVA, 220V.



- DVR: Resultados experimentais de filtragem de tensão harmônica na fase A – Tensão de fase da Rede (vermelho) Tensão Injetada (magenta), Tensão de fase da Carga (azul). Protótipo de 5kVA, 220V.



- DVR: Resultados experimentais de correção de *Sag* na Fase A – Tensão de fase da Rede (vermelho) Tensão Injetada (magenta), Tensão de fase da Carga (azul). Protótipo de 5kVA, 220V.



Conclusões

- Aplicações de Inversores
 - Inversores tipo Fonte de Tensão (VSC)
 - Modulação em PWM
 - STATCOM
 - Retificadores com alto fator de potência
 - Filtros Ativos