

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - UNICAMP
EE 833 - ELETRÔNICA DE POTÊNCIA
CONVERSORES CC-CA - INVERSORES

6.1 Introdução

Como exemplos de aplicações pode-se citar:

- Controle de velocidade de motores de corrente alternada (forma senoidal ou retangular, frequência e amplitude variáveis);
- Fontes de alimentação ininterrupta (em geral com forma senoidal, frequência e amplitude constantes);
- Sistemas de alimentação embarcados em navios, aviões, etc. (em geral com forma senoidal, frequência e amplitude constantes);
- Compensadores aplicados em redes elétricas (em geral com forma não senoidal, frequência fundamental constante).

6.2 Inversores tipo fonte de tensão (VSI – Voltage Source Inverter)

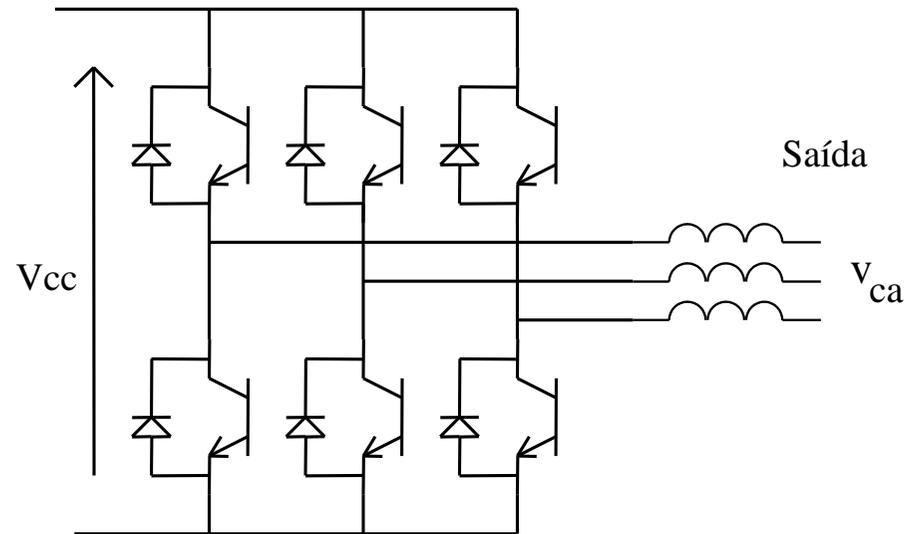


Figura 6.1. Inversor trifásico tipo fonte de tensão.

6.2.1 Inversor VSI com saída quadrada

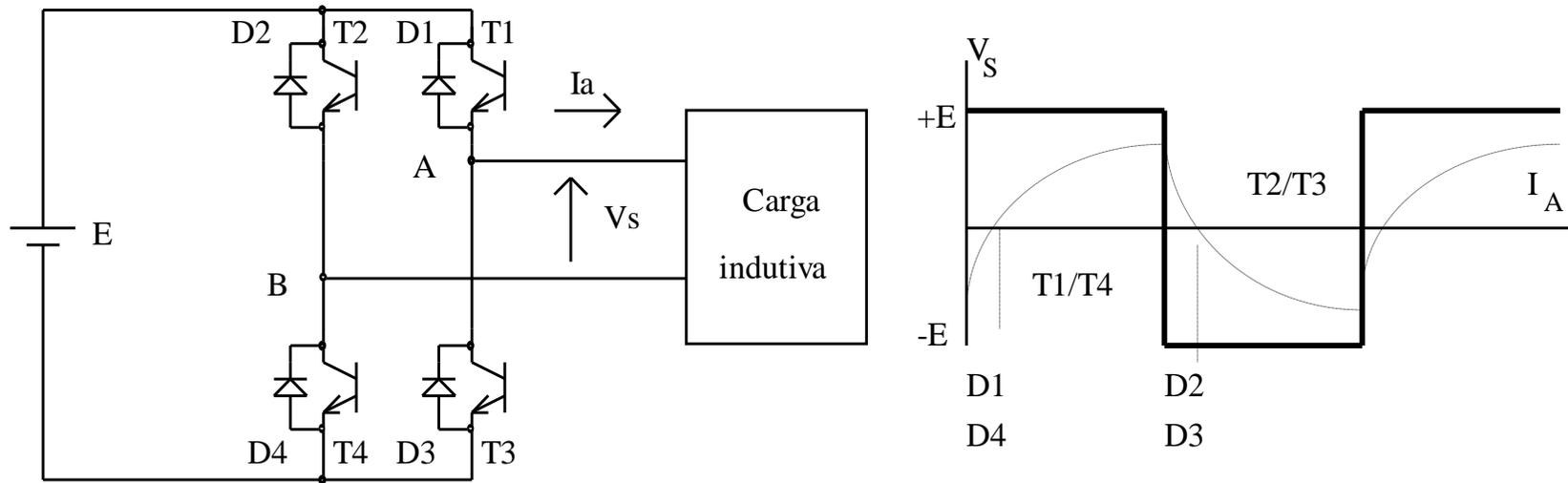


Figura 6.2. Inversor monofásico e forma de onda quadrada de saída (carga indutiva).

6.2.2 Inversor VSI com saída quase quadrada.

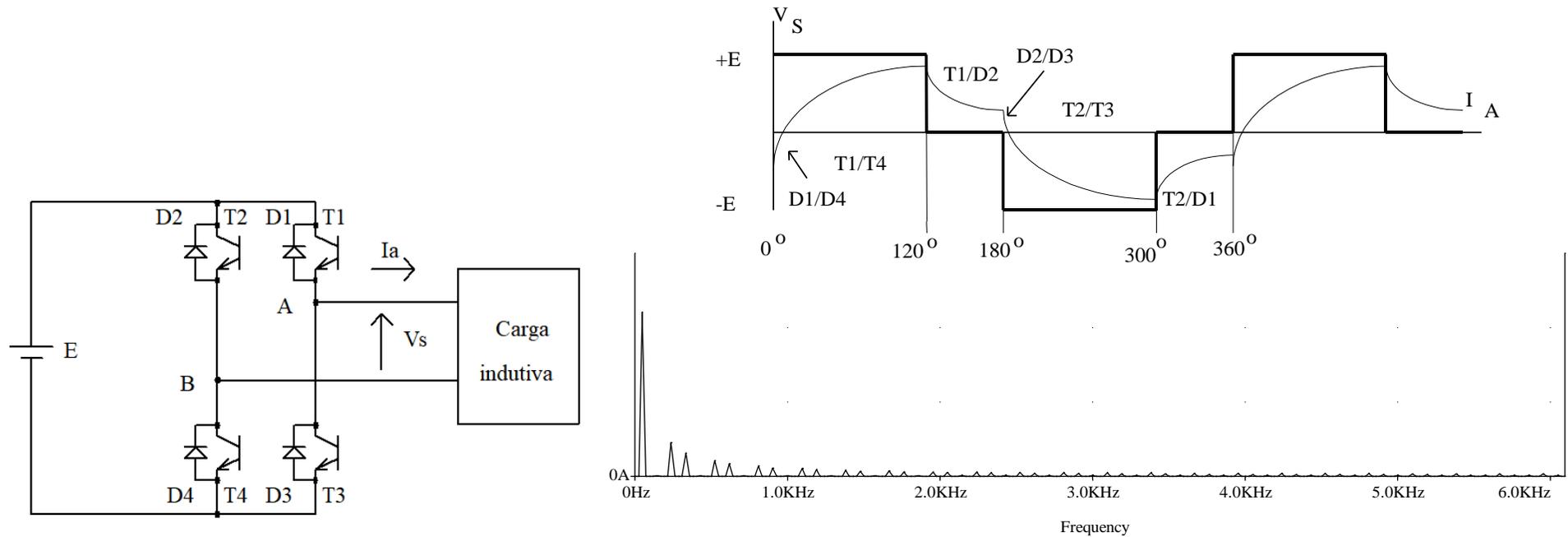


Figura 6.3. Circuito, forma de onda com carga RL e espectro da onda quase quadrada.

6.3 Modulação por Largura de Pulso - MLP

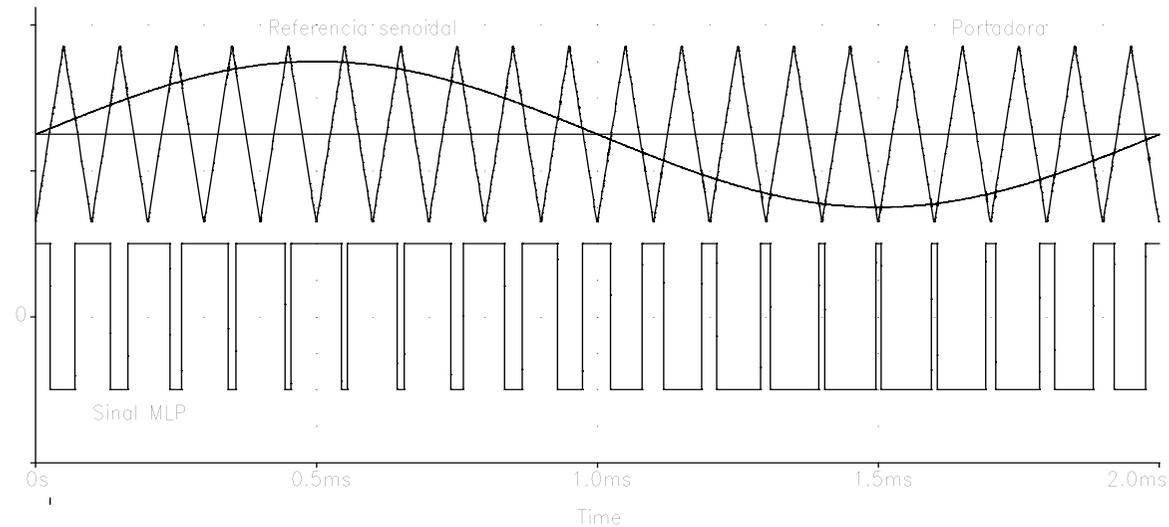


Figura 6.4. Sinal MLP de dois níveis.

No exemplo dessa figura, para uma portadora bipolar, variando entre $-V_s$ e $+V_s$, ou seja, com uma variação pico-a-pico $V_{spp}=2V_s$, e uma referência senoidal $v(t)=V_p \cdot \text{sen}(\omega t)$, sendo $V_p < V_s$, a largura de pulso para a saída de 2 níveis segue a equação:

$$\delta(t) = \frac{1}{2} + \frac{v(t)}{V_{spp}}$$

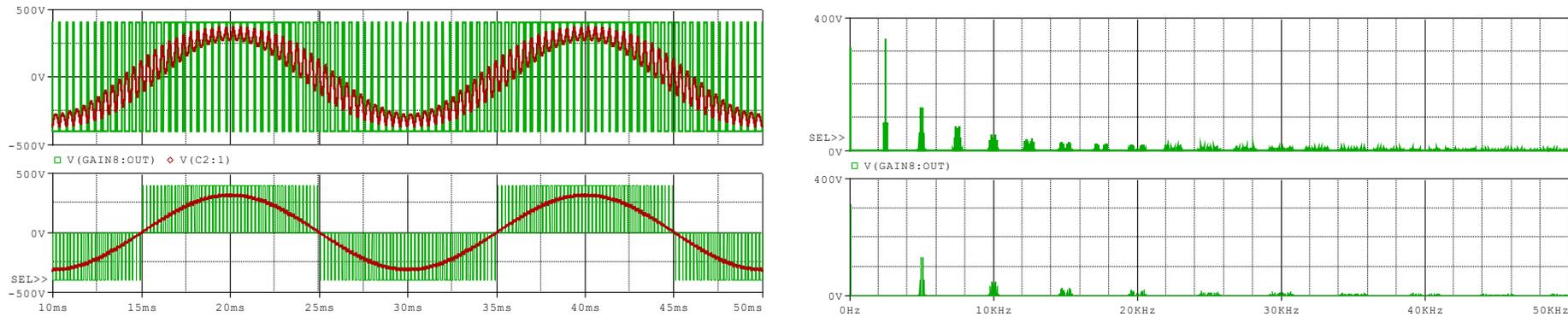


Figura 6.5. Comparação de modulação de dois e de três níveis. Formas de onda e espectros dos sinais MLP. Filtro LC de saída $L=2\text{mH}$ e $C=10\mu\text{F}$.

Há diferentes maneiras de se obter uma modulação de três níveis. Um dos modos faz uso de dois sinais PWM, um obtido com a própria referência e outro o inverso da referência, como mostra a figura 6.6. Cada um dos sinais PWM (e seu inverso) é usado para comandar um ramo do inversor de transistores (T1/T3 e T2/T4, na figura 6.2). Como mostra a figura 6.7, os comandos para os transistores de um mesmo braço são complementares de modo que nunca ambos conduzam simultaneamente (o que causaria um curto-circuito na fonte de tensão).

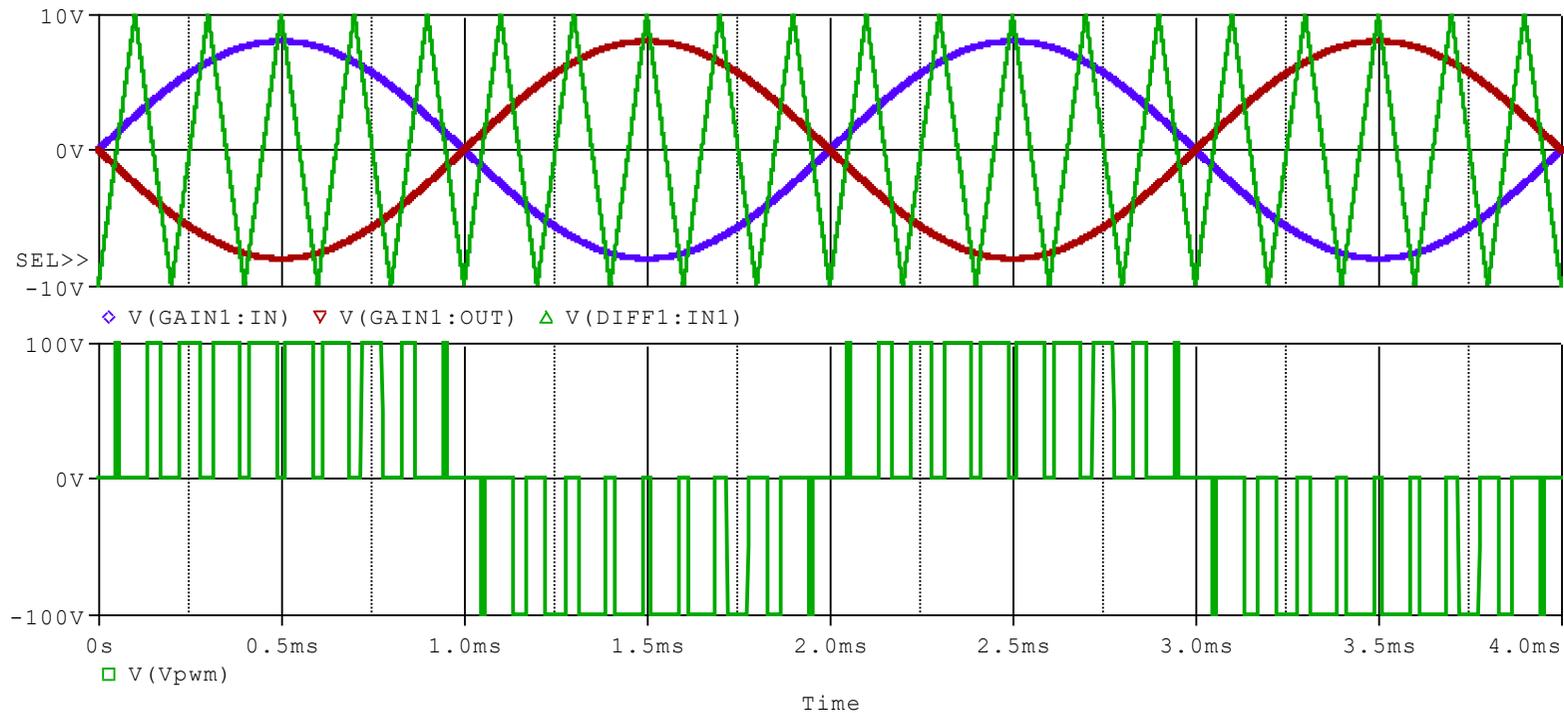


Figura 6.6 Produção de modulação PWM de 3 níveis, para inversor monofásico.

Com modulação de três níveis, a largura de pulso na saída do conversor resulta:

$$|\delta(t)| = \frac{|v(t)|}{V_S}$$

Ou seja, se $V_S=10$ V e $V_p=8$ V, na modulação de dois níveis a largura no pico da referência resulta $\delta_{\max}=90\%$, enquanto na modulação de três níveis tem-se $\delta_{\max}=80\%$.

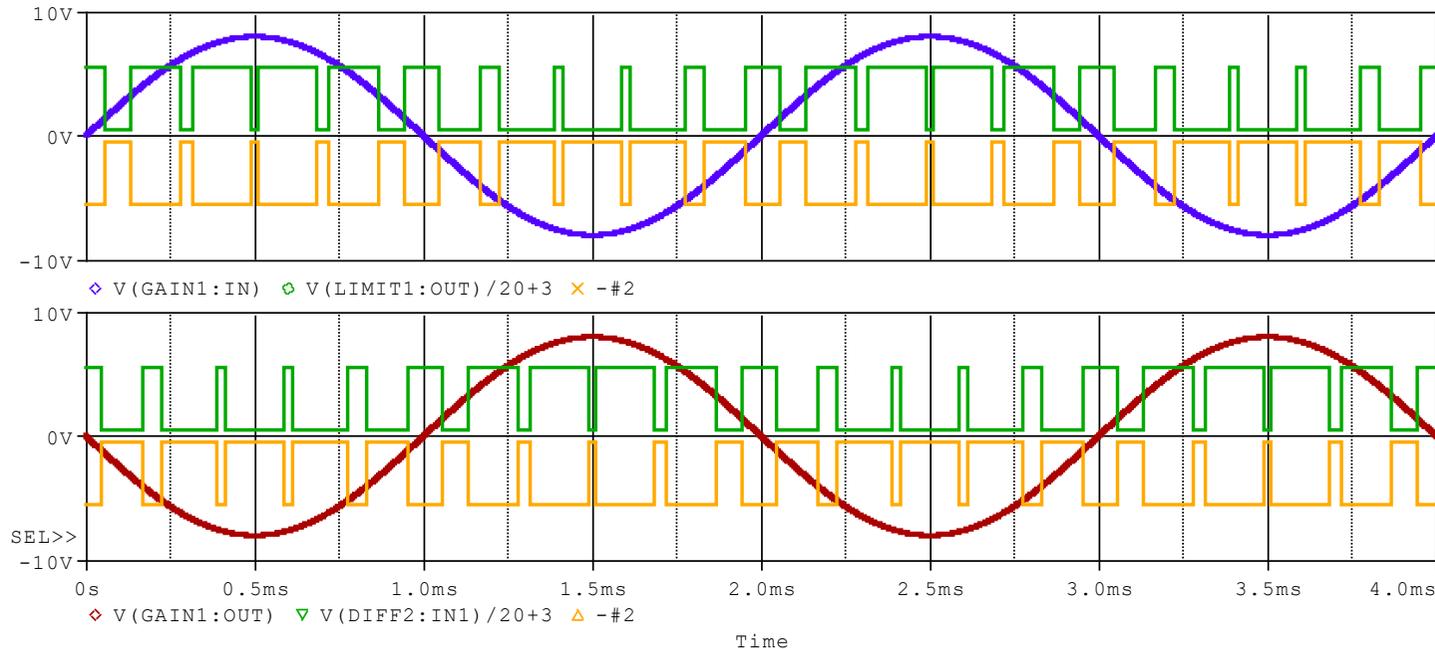


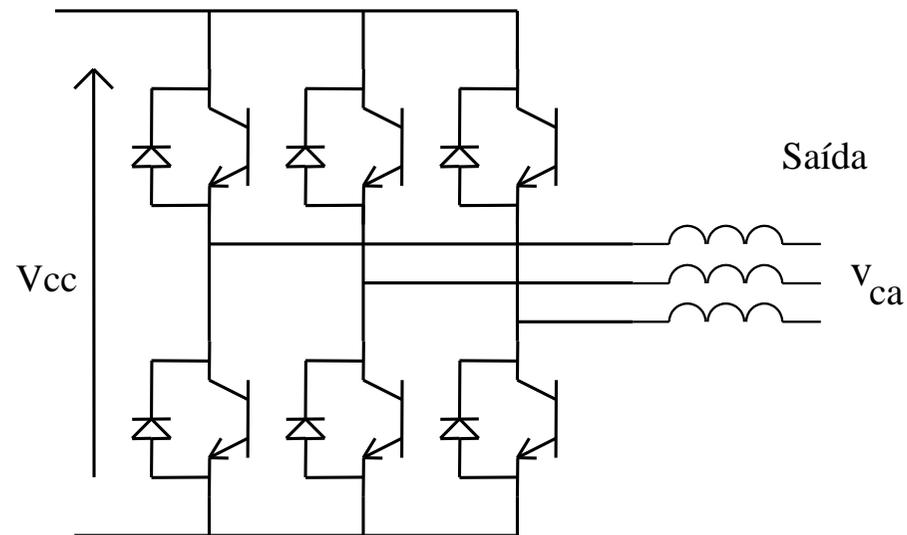
Figura 6.7 Referência e sinais de comando para transistores de cada braço do inversor.

Note-se que os pulsos de cada braço do inversor não estão sincronizados de modo que, ao se combinarem na tensão de saída (figura 6.6) haverá duas comutações em cada período da portadora. A tensão resultante sobre a carga se apresenta com os três níveis esperados. Todos os transistores comutam na frequência da portadora.

A tensão produzida pelo inversor, considerando apenas a componente fundamental (que reproduz a referência) pode ser expressa em função do chamado índice de modulação e $0 \leq [M] \leq 1$. Um valor M negativo indica uma defasagem de 180° .

$$v_{inv}(t) = M \cdot V_{CC} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

No caso trifásico, cada braço é comandado a partir de uma referência vinculada à respectiva fase. Assim, o sinal de comando aplicado em cada braço é de dois níveis. Quando se observa a tensão de linha (entre uma fase e outra) esta será de três níveis.



6.4 Estruturas de comando e controle em malha fechada

A figura 6.8 ilustra uma situação de operação em malha aberta. Nesse caso, um conversor VSI é capaz de sintetizar em sua saída uma tensão que segue a referência dada, de forma linear. O filtro de saída atuará sobre esse sinal modulado e seu papel é minimizar as componentes de alta frequência. Estando o filtro bem sintonizado, a tensão CA reproduzirá adequadamente a referência.

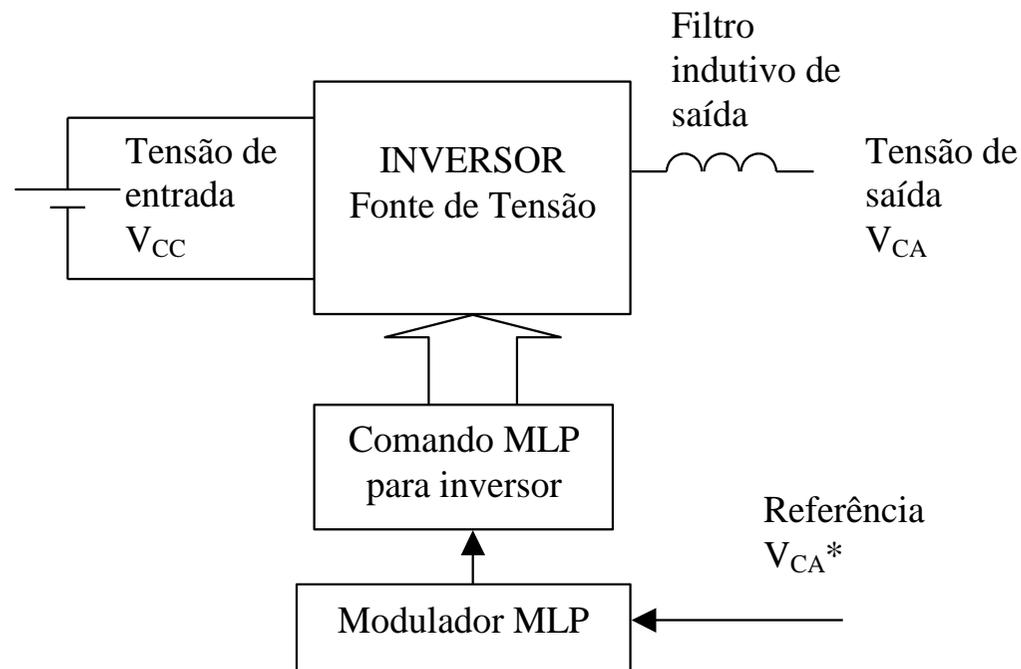


Figura 6.8. Operação de conversor VSI em malha aberta: síntese adequada da tensão de saída.

Quando é necessário controlar a corrente de saída de um conversor VSI tem-se que operar em malha fechada, como mostra a figura 6.9. Mede-se a corrente de saída, a qual é comparada com a referência. O erro é processado por um compensador, cuja saída é a entrada para o bloco MLP.

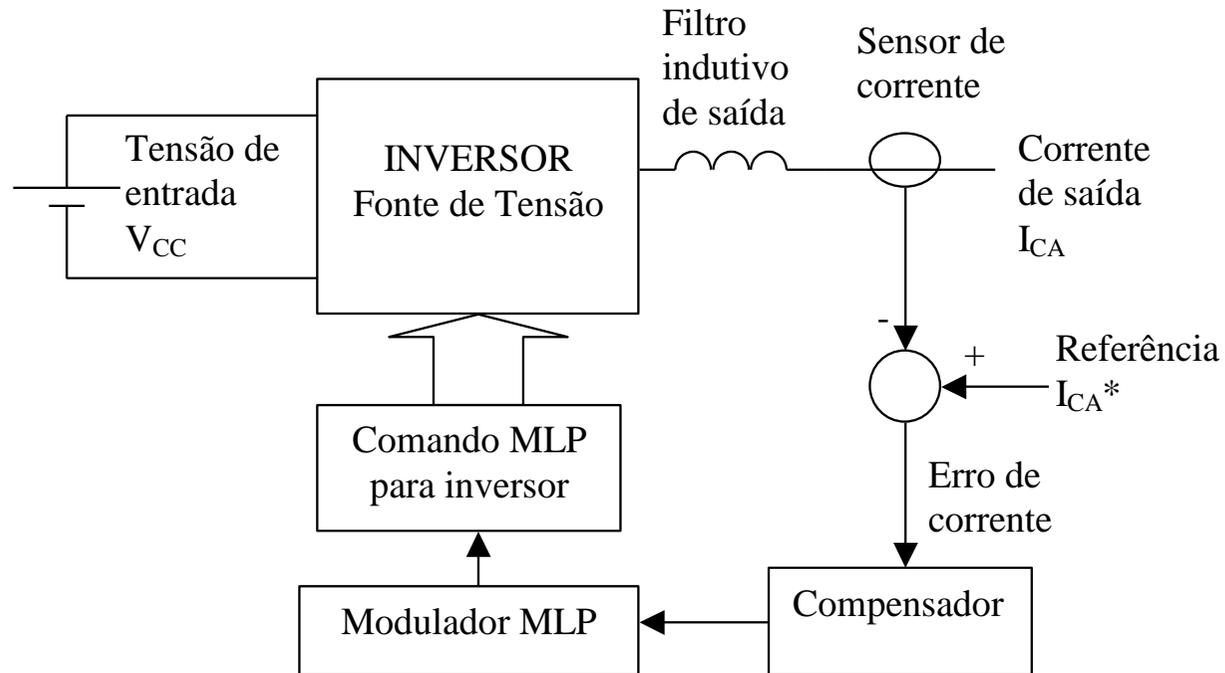


Figura 6.9. Operação de conversor VSI em malha fechada para síntese de corrente de saída.

6.5 Inversor multinível

Os conversores multiníveis apresentam vantagens sobre conversores MLP, especialmente para aplicações de média e alta potência, tais como: possibilidade de conexão direta com a rede em média tensão sem que seja necessário o uso de transformadores; redução dos níveis de Interferência Eletromagnética (EMI) devido à menor taxa de variação da tensão de saída; possibilidade de obtenção de maior potência sem a necessidade de associações em série e/ou paralelo de interruptores, etc.

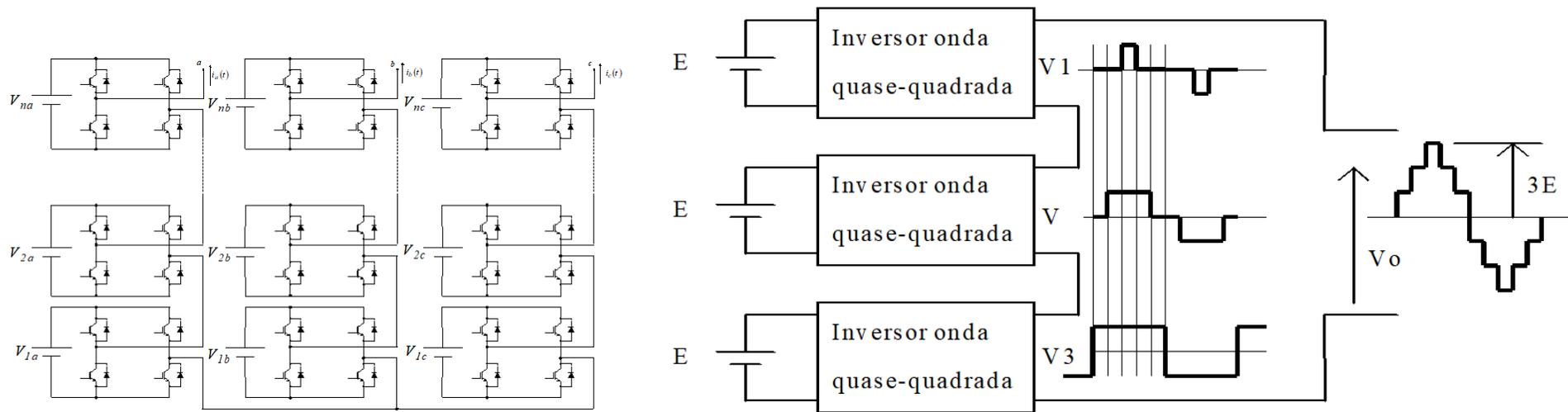


Figura 6.10. Diagrama esquemático de conversor multinível do tipo cascata simétrica.

Nota-se que a distorção harmônica é reduzida. Os filtros necessários à obtenção de uma onda senoidal devem ter uma frequência que depende do número de níveis presentes na saída, já que as componentes espectrais aparecem nos múltiplos de $2n+1$, onde n é o número de níveis da saída. No entanto, a atenuação não precisa ser muito grande, uma vez que as amplitudes das harmônicas são relativamente pequenas.

Existem diversas outras estruturas de conversores multiníveis, facilmente encontráveis na literatura, mas que não serão discutidas nesta breve apresentação.

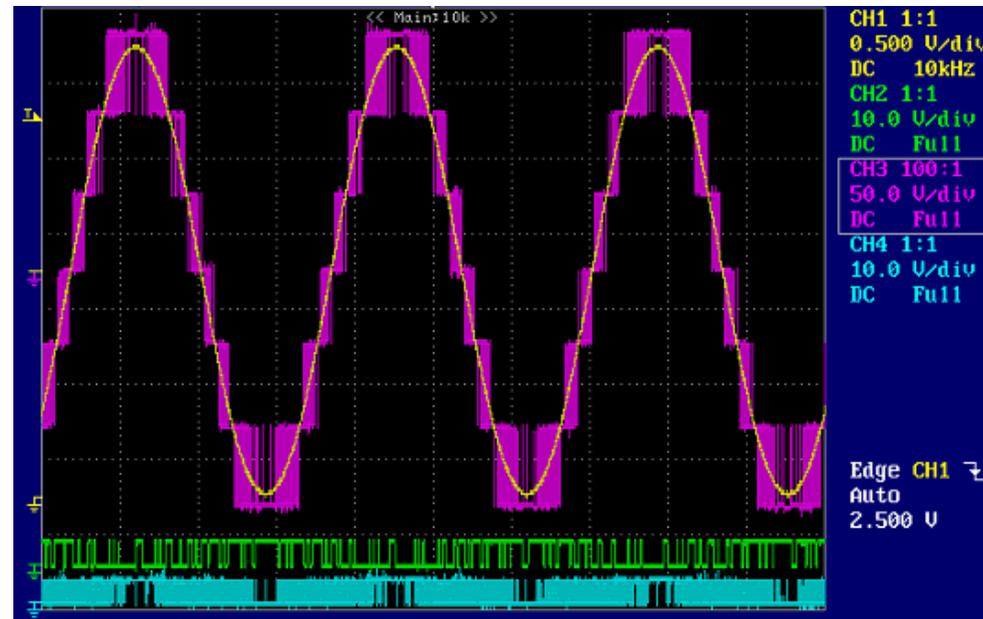


Figura 6.11. Forma de onda experimental de inversor multinível com ajuste MLP¹

¹ de Alvarenga, Marcos B.; Pomilio, J. A. "Analysis of pulse suppression in PWM modulation for symmetric cascaded multilevel inverters", IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society_2011, Page(s): 4654 – 4659

6.6 Aplicações de Inversores operando como fonte de tensão CA

Serão estudados os conversores CC-CA que fornecem em sua saída tensões com frequência fixa, para aplicação, por exemplo, como fonte de tensão, especialmente em fontes de alimentação ininterrupta (chamadas de “no-break” ou “UPS - Uninterruptible Power Supplies”).

6.6.1 Requisitos de qualidade na alimentação de equipamentos sensíveis

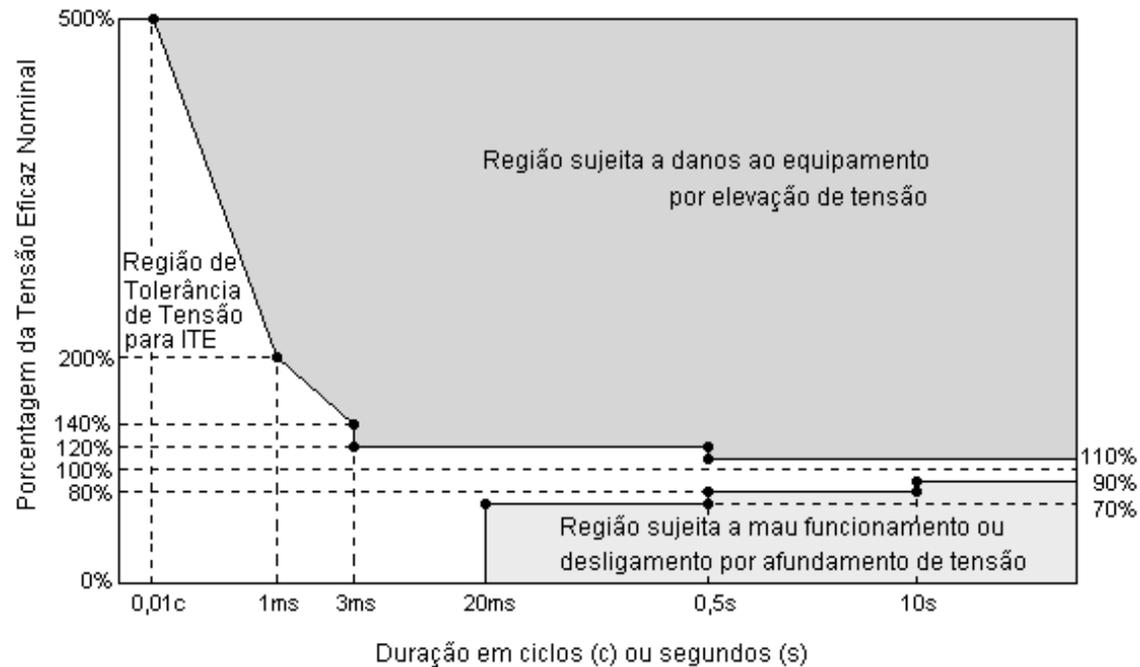


Figura 6.12. Envelope de tolerância de tensão para sistema computacional (norma IEEE 466).

6.6.2 Classificação das UPS

São definidas três configurações, indicadas, simplificada, na figura 6.13:

- linha prioritária;
- inversor prioritário;
- interativo com a linha.

Todas as estruturas contém um elemento armazenador de energia que é, tipicamente, um banco de baterias.

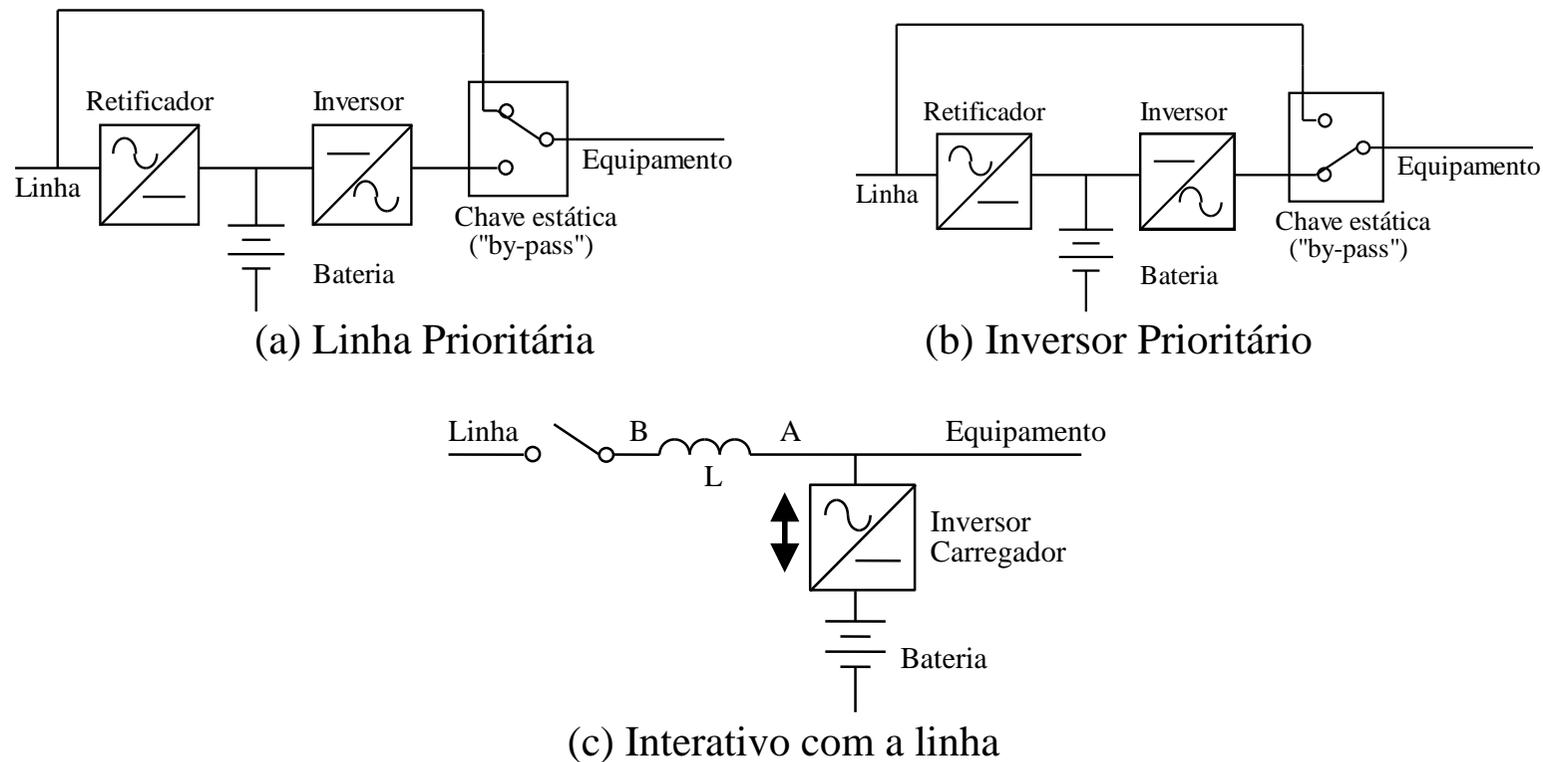


Figura 6.13. Configurações de UPS.

6.6.3 Resultados Experimentais

6.6.3.1 Linha prioritária

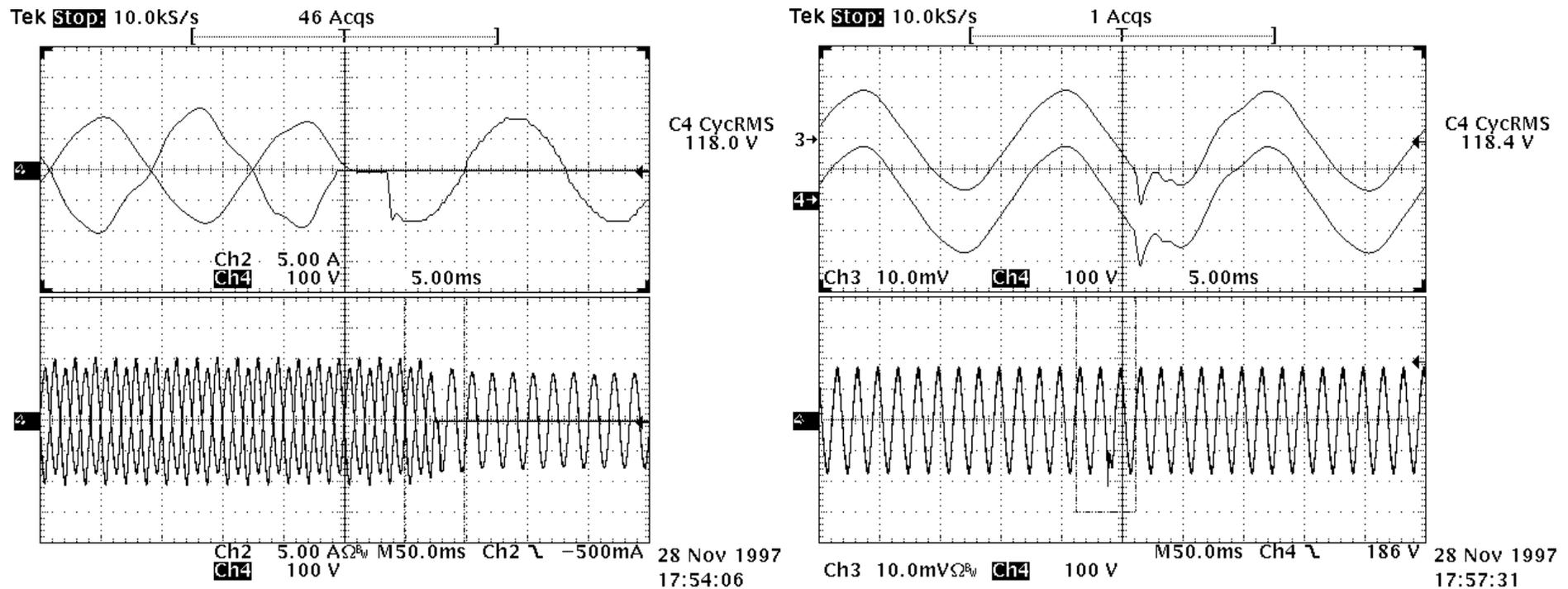


Figura 6.14 Tensão de saída e a corrente da rede com carga resistiva na transição da alimentação da rede para baterias. Ausência de rejeição de transitório na entrada.

6.6.3.2 Inversor prioritário

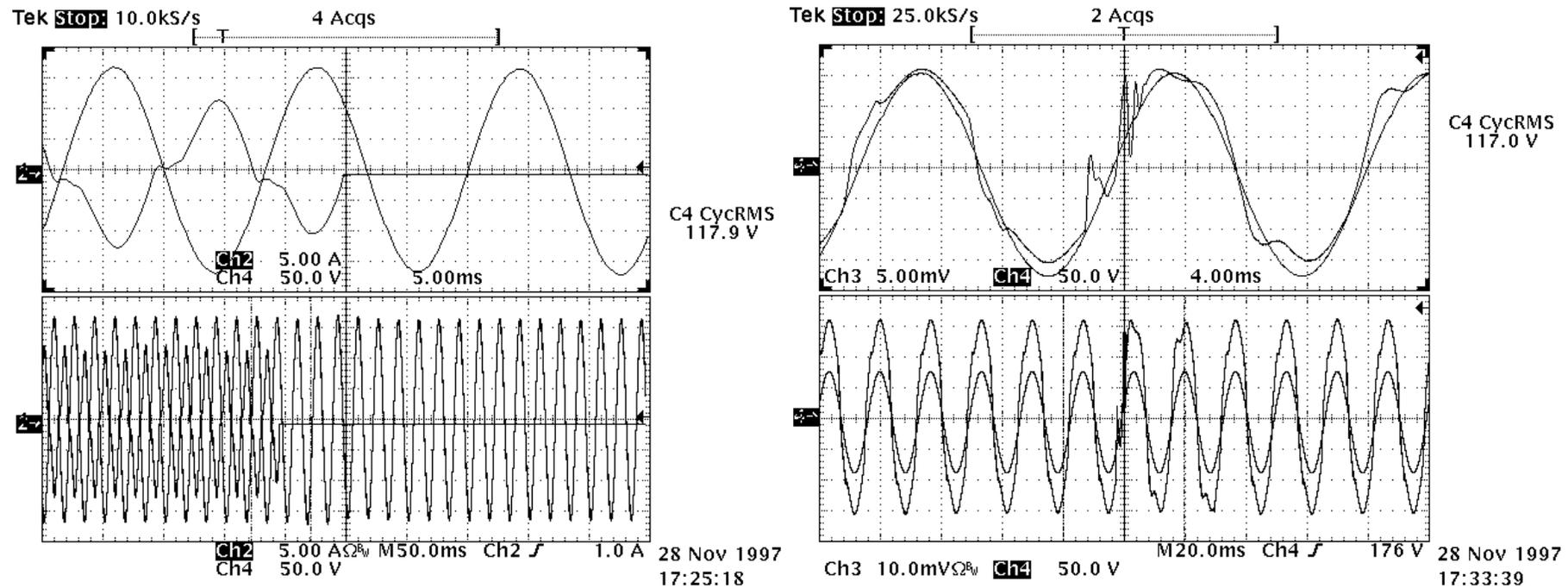


Figura 6.17. Tensão de saída e corrente da rede com carga resistiva na transição da alimentação da rede para baterias. Rejeição de transitório na entrada.

6.7 Aplicações de Inversores na rede elétrica

O principal papel dos inversores nos sistemas de geração distribuída e de acumuladores de energia é entregar energia elétrica à rede de distribuição em corrente alternada, dentro de padrões de qualidade adequados. Isso requer, principalmente, que a forma de onda da corrente resultante na rede tenha mínima distorção, ou seja, que se aproxime da forma senoidal.

Se o objetivo é ter uma corrente senoidal injetada em uma rede (com tensão senoidal), através da conexão por meio de um bipolo linear, como ilustra a figura 6.20, necessariamente a tensão produzida pelo inversor tem que ser senoidal, sincronizada com a rede.

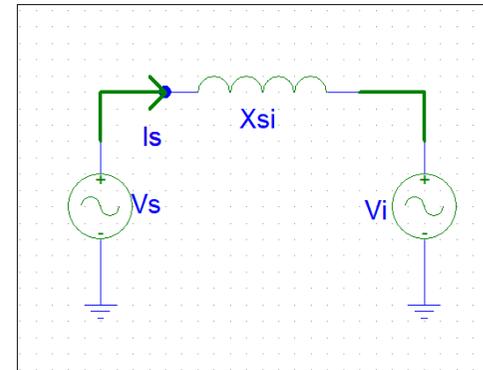
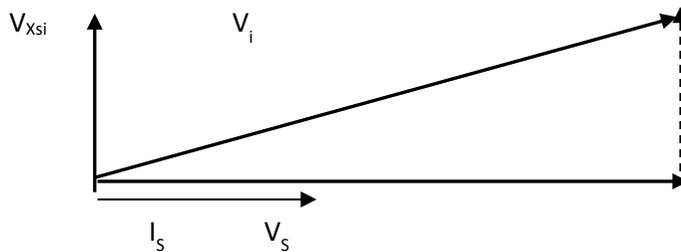


Figura 6.20. Representação fasorial e circuito simplificado indicando a conexão entre duas fontes de tensão senoidais.

O fluxo de potência ativa do inversor para a rede depende das tensões e da defasagem, sendo limitada pela reatância de acoplamento.

$$P_{si} = \frac{V_s \cdot V_i}{X_{si}} \cdot \text{sen}(\theta_s - \theta_i)$$

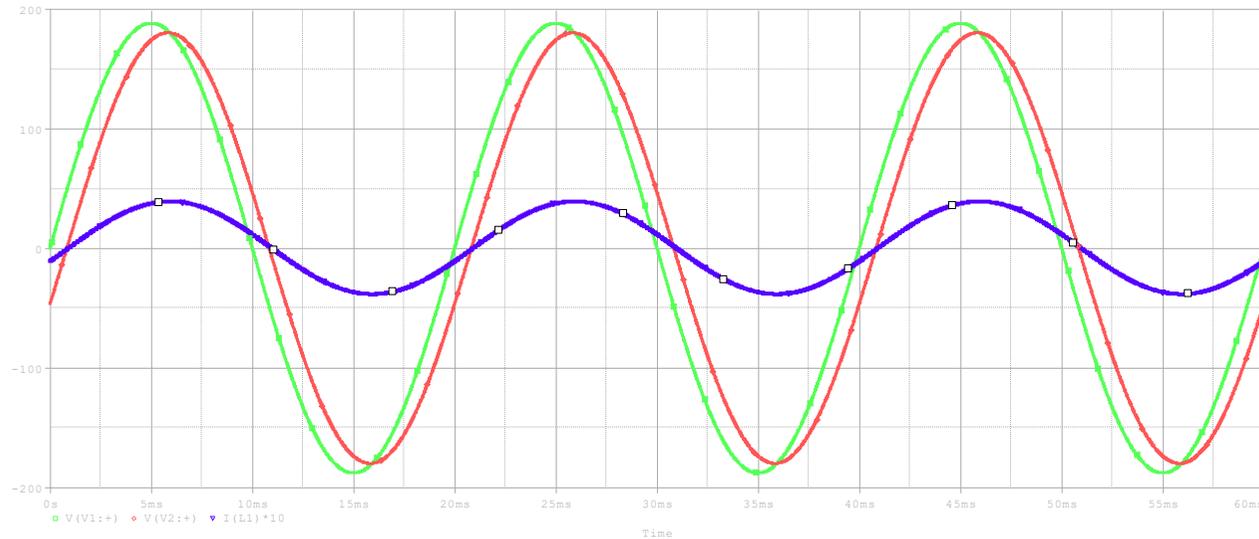


Figura 6.21. Tensões nas fontes e corrente no circuito (FP=1 na fonte emissora, V_s).

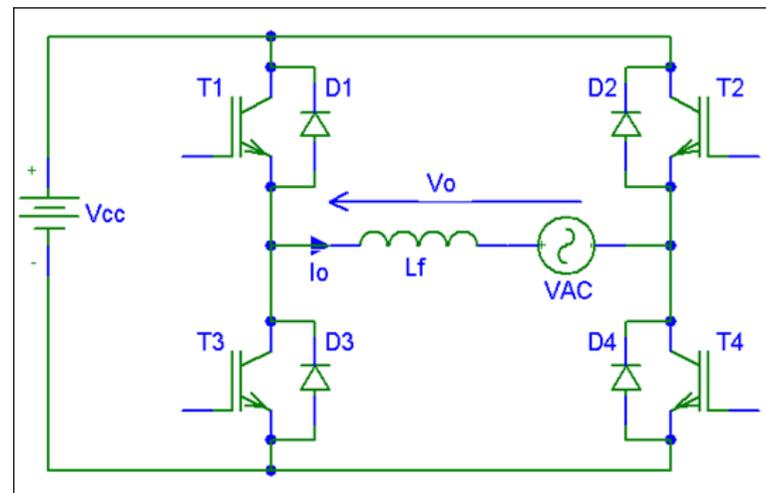
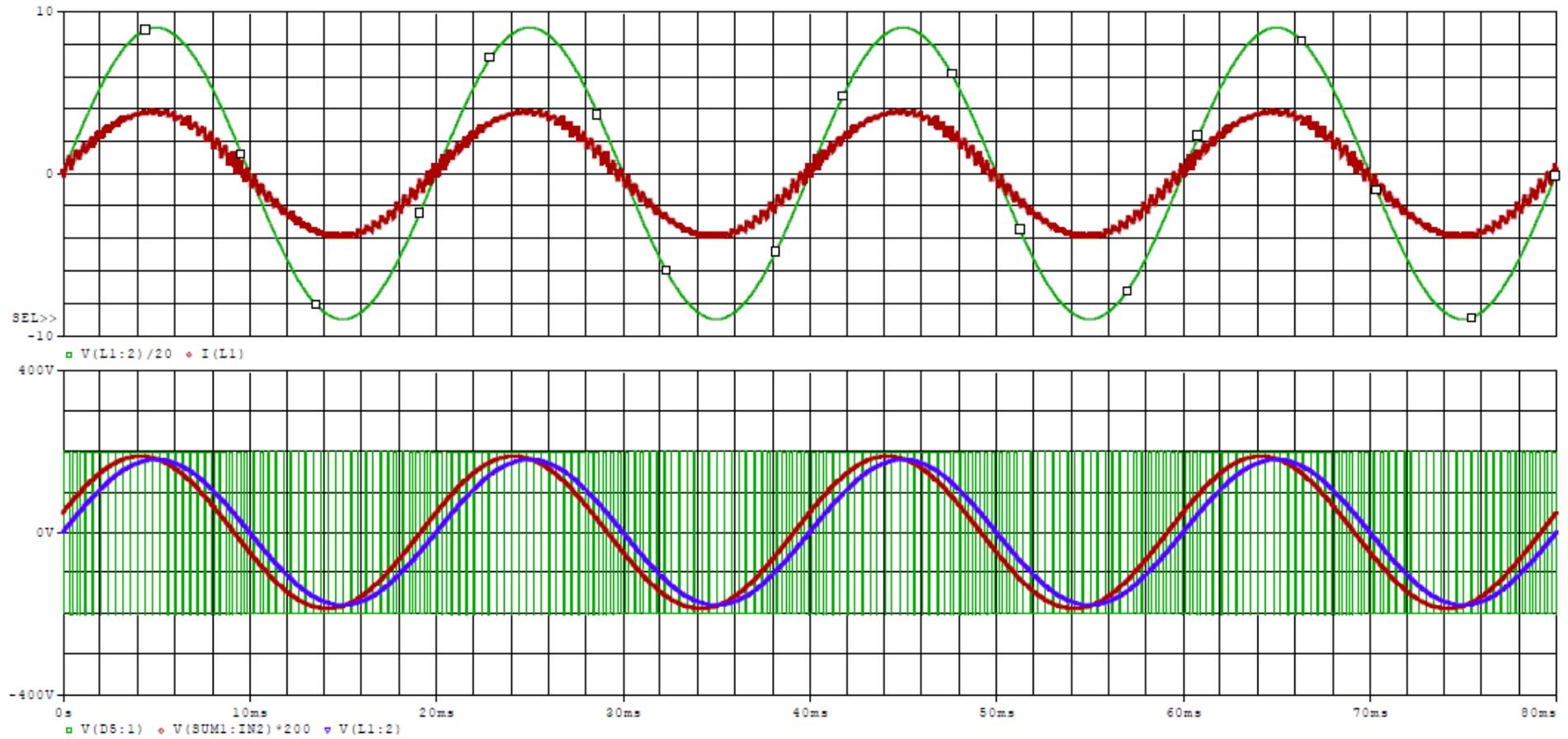


Figura 6.22. Circuito de inversor monofásico, injetando corrente em rede CA.



6.7.1 Compensação de reativos

A topologia do inversor é usada para realizar o chamado STATCOM (Compensador estático de Energia Reativa), cujo circuito é mostrado na figura 6.23. Nesse caso, os interruptores controlados são GTOs (*Gate Turn-off Thyristor*), mas podem ser substituídos por qualquer tipo de transistor. Se o conversor não tiver que fornecer potência ativa no PAC, é possível operá-lo apenas com um elemento de acúmulo de energia no barramento CC, no caso um capacitor, que deve ter sua tensão regulada pelo controle do conversor.

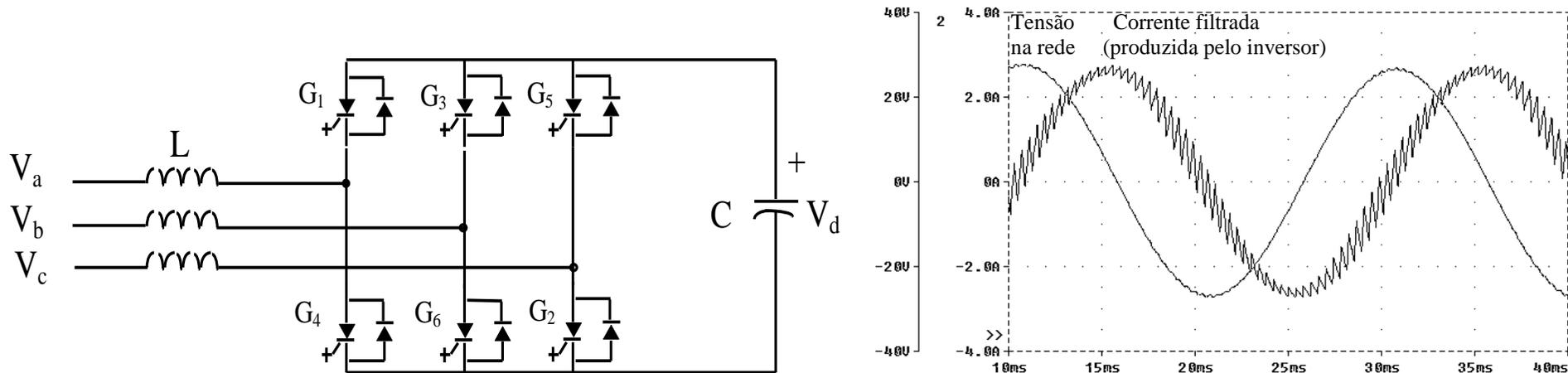


Figura 6.23. Compensador STATCOM. Formas de onda de STATCOM.

Embora o conversor esteja apresentando um comportamento indutivo, do ponto de vista da relação entre a tensão e a corrente no PAC, isso não tem relação alguma com os indutores do circuito, que estão presentes apenas com a função de filtrar a corrente. Tal funcionamento se deve, exclusivamente, à estratégia de controle, a qual define uma referência de corrente que está atrasada de 90° da tensão.

6.7.2 Filtro ativo de potência

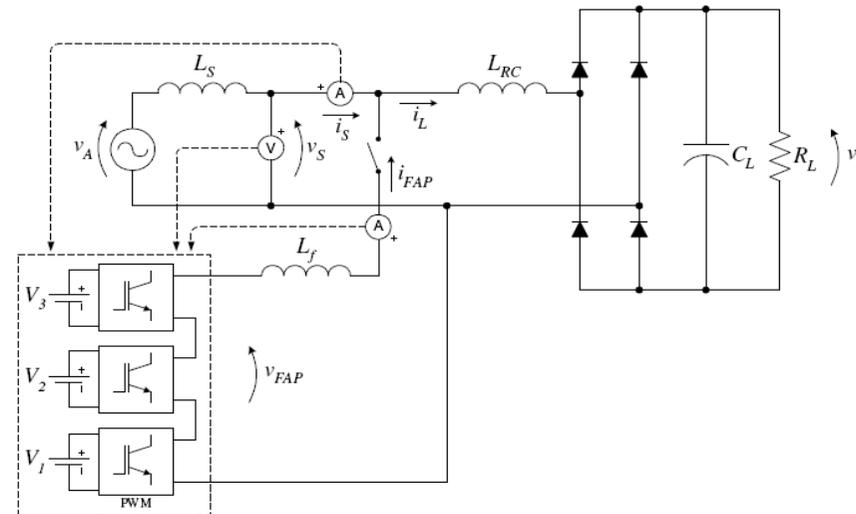


Figura 6.25. Inversor (multinível) operando como FAP monofásico.

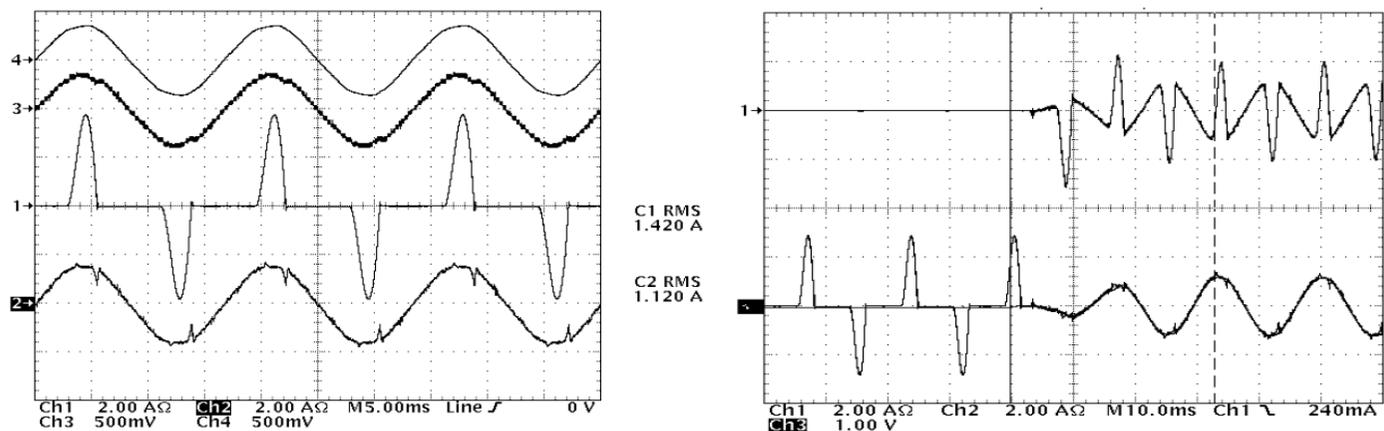


Figura 6.26. Formas de onda do FAP: Tensão da rede, tensão de saída do FAP, corrente da carga e corrente da rede, após compensação. Formas de onda do FAP. Acima, corrente do inversor. Abaixo, corrente pela fonte.

6.8 Inversores x Retificadores

Topologicamente um inversor PWM e um retificador PWM são idênticos. O que diferencia a operação é simplesmente a direção do fluxo de potência. Quando se dá no sentido CC \rightarrow CA tem-se um inversor. Quando é no sentido oposto, CA \rightarrow CC, o funcionamento do conversor é como um retificador.

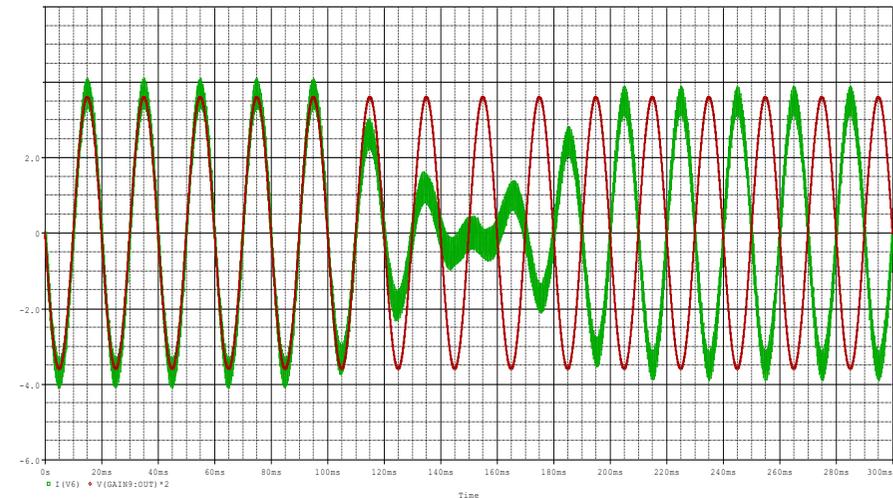
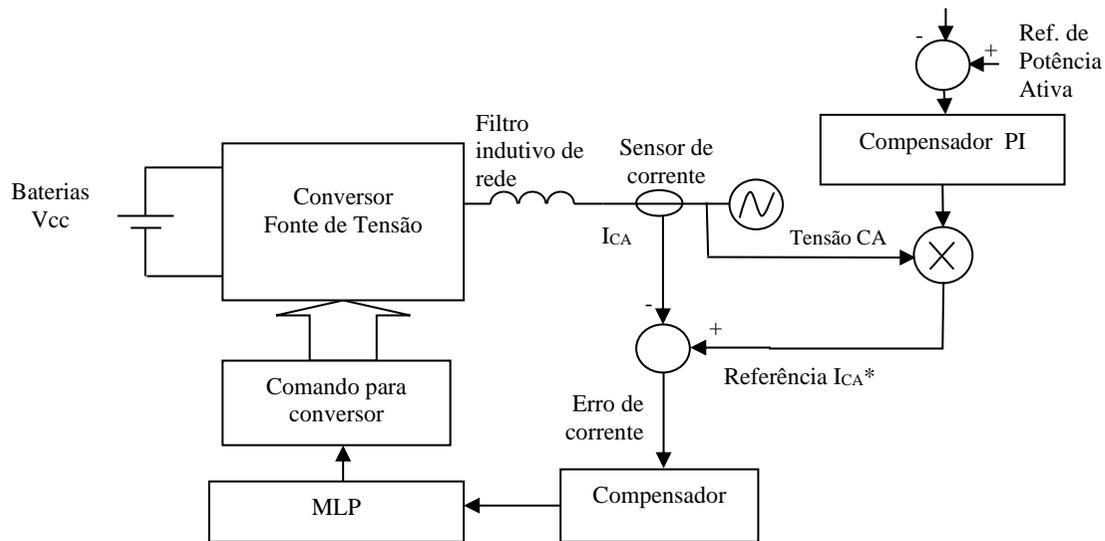


Figura 6.28. Estrutura de controle e comando de inversor/retificador com conversor tipo fonte de tensão.
 Figura 6.29. Inversão de fluxo de potência alterando a referência de potência ativa. Tensão da rede (vermelha) e corrente (verde).