

6. CONVERSORES CC-CA COMO FONTES DE ALIMENTAÇÃO COM FREQUÊNCIA FIXA

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

Qualquer sistema no qual o fornecimento da energia elétrica não pode ser interrompido deve prever uma fonte de emergência para supri-lo. Quando a potência instalada é muito grande tem-se, em geral, um sistema de acionamento imediato, alimentado a partir de baterias, e um sistema motor-gerador que, por necessitar de alguns minutos para estar em condições ideais de operação, não pode ser usado de imediato. Tal arranjo é usado, por exemplo, em centrais telefônicas, hospitais, etc.

Quando as cargas críticas são distribuídas, como no caso de microcomputadores, pode-se usar UPSs modulares, de acionamento imediato e que sejam capazes de manter a operação do equipamento por um tempo suficiente. Com isso, operações que estavam em curso não serão perdidas.

Além disso, os sistemas mais modernos devem ter a capacidade de trocar informações com os computadores, de forma a otimizar seu funcionamento, mas isto não será tema deste curso.

Interessam aqui as topologias empregadas na realização dos conversores de potência que, a partir de uma fonte CC produzem uma saída alternada, seja ela senoidal ou não.

6.1 *Requisitos de qualidade na alimentação de equipamentos sensíveis*

Especialmente para os equipamentos de computação, são estabelecidos limites em termos da qualidade da energia a ele suprida. No entanto, graças à ação de grandes usuários (especialmente militares), a CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturer's Association) adotou as curvas mostradas na figura 6.1. Estas curvas aparecem na norma IEEE 446 como “prática recomendada para sistemas de alimentação de emergência, em aplicações industriais e comerciais”. Para equipamentos de tecnologia da informação, foi definido pelos fabricantes a curva ITIC, também mostrada na figura 6.1.

As curvas definem um envelope dentro do qual deve estar o valor da tensão suprida ao equipamento. Ou seja, quando os limites forem violados, o sistema de alimentação ininterrupta deve atuar, no sentido de manter a alimentação dentro de valores aceitáveis.

Em outras palavras, se a tensão de alimentação estiver dentro dos limites não devem ocorrer mal-funcionamentos do equipamento alimentado. Violações dos limites podem, então, provocar falhas, que devem ser evitadas.

Via de regra, quem suporta a alimentação do equipamento na ocorrência de falhas de curta duração são as capacitâncias das fontes de alimentação internas, de modo que, eventualmente, mesmo violações mais demoradas do que aquelas indicadas podem ser suportadas.

Nota-se na figura 6.1 que, em regime, a tensão deve estar limitada a uma sobretensão de 6% e uma subtensão de 13%. Quanto menor a duração da perturbação, maior a alteração admitida, uma vez que os elementos armazenadores de energia internos ao equipamento devem ser capazes de absorvê-la. Assim, por exemplo, a tensão pode ir a zero por meio ciclo, ou ainda haver um surto de tensão com 3 vezes o valor nominal (eficaz), desde que com duração inferior a 100 μ s.

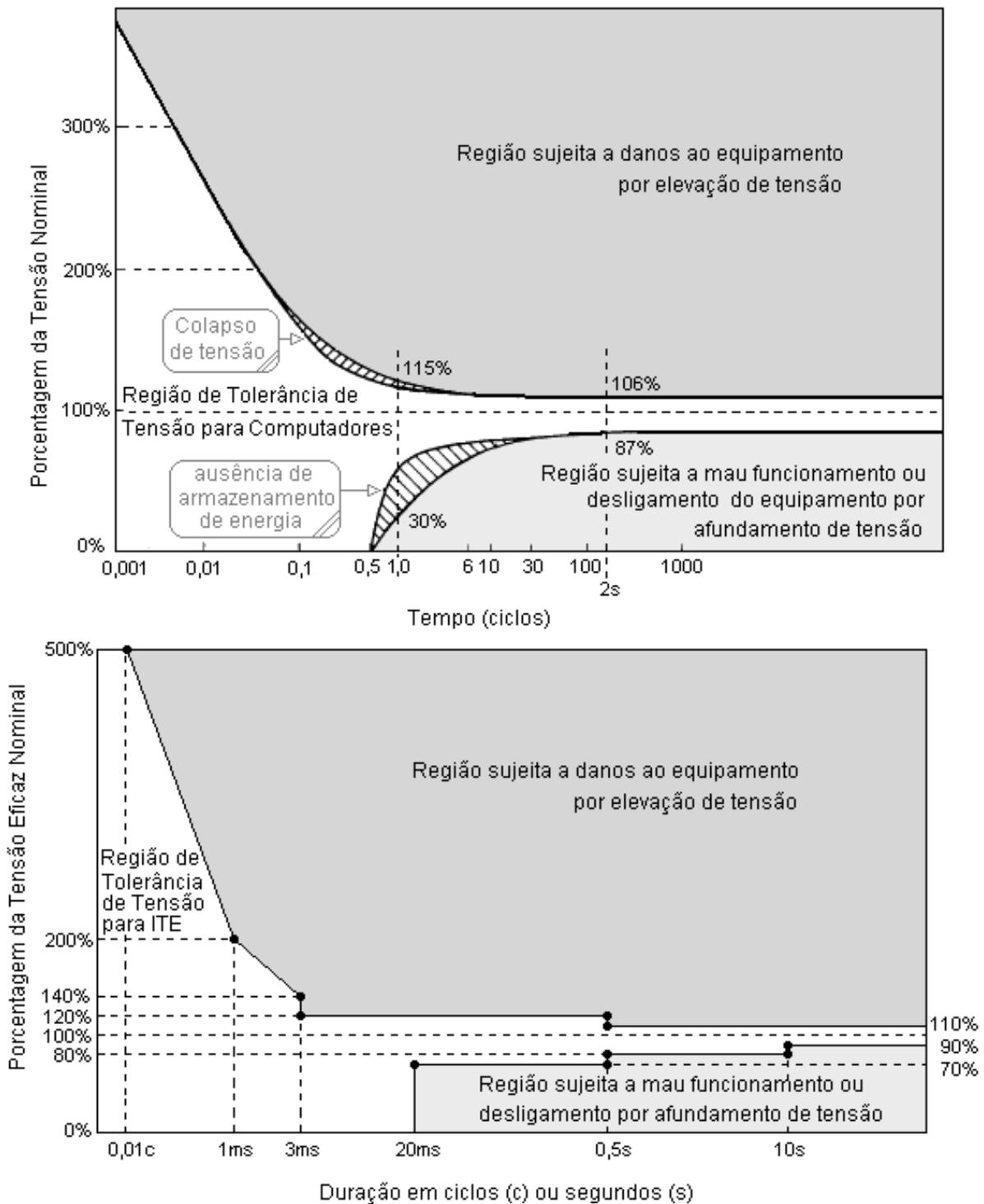


Figura 6.1 Envelope de tolerância de tensão típico para sistema computacional (adaptado da norma IEEE 466). Curva CBEMA (acima) e curva ITIC (abaixo).

Outra definição em termos da tensão suprida é a Distorção Harmônica Total (THD) que tem um limite de 5%. Além disso, para alimentação trifásica, tolera-se um desbalanceamento entre as fases de 3 a 6%. No que se refere à frequência, tem-se um desvio máximo admissível de $\pm 0,5$ Hz (em torno de 60 Hz), com uma máxima taxa de variação de 1 Hz/s.

6.2 Classificação das UPS

São definidas três configurações, indicadas, simplificada, na figura 6.2:

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

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

A configuração de linha prioritária possui um retificador, que fornece a carga para as baterias, um inversor (conversor CC-CA) e uma chave que transfere automaticamente a alimentação da carga da linha para o inversor, em caso de falha. Quando o inversor for conectado à carga deve fazê-lo de modo a que sua tensão tenha a mesma amplitude e fase da tensão esperada na linha. Como o inversor não realiza nenhuma função de regulação da tensão enquanto a alimentação provier da linha, alguns equipamentos podem possuir um estabilizador de tensão a jusante da chave. A detecção da falha e a transferência da alimentação podem ser feitas em menos de 1/4 de ciclo, o que garante a alimentação do equipamento crítico. Uma vez que este sistema não apresenta uma efetiva isolação e proteção da carga contra distúrbios na linha e dado que ele altera seu funcionamento exatamente quando ocorre uma falha, tal estrutura é utilizada principalmente para sistemas de baixos custo e potência, quando a operação não é altamente crítica. Esta estrutura é conhecida como “off-line”.

A configuração com inversor preferencial é padrão para equipamentos críticos, uma vez que a carga é alimentada por uma tensão controlada e estabilizada pelo inversor, estando isolada (não necessariamente galvanicamente) da rede. Neste caso a alimentação provém sempre do inversor, cuja alimentação CC virá da rede (através do retificador) ou da bateria, em caso de falha. O conversor não altera sua operação na ocorrência da falha e não existe nenhuma descontinuidade na tensão suprida. Como o retificador deve suprir a carga, e não apenas recarregar as baterias (como no caso anterior), ele é dimensionado para a potência do equipamento alimentado. A presença da chave (by-pass) é para, em caso de falha da UPS, passar a alimentação à rede em menos de 1/4 de ciclo. O inversor pode possuir ainda uma limitação automática de corrente contra sobrecargas. Esta estrutura é conhecida como “on-line”.

A configuração interativa com a linha possui apenas um conversor CC-CA. Este sistema possui a vantagem (sobre a configuração linha preferencial) de permitir um condicionamento da tensão aplicada à carga. Normalmente o fluxo de potência vai, através do indutor L, da rede para a carga, e o conversor mantém as baterias carregadas. Em caso de falha, a chave se abre e o inversor passa a alimentar o equipamento crítico. Quando existe tensão na linha, o inversor produz uma tensão no ponto A com a mesma frequência da linha, mas com amplitude controlada. Se as tensões nos pontos A e B forem idênticas em frequência, fase e amplitude não haverá corrente pelo indutor e toda energia da carga será fornecida pelo inversor. Alterando-se a fase da tensão no ponto A pode-se controlar o fluxo de corrente por L. Assim, controlando a fase da tensão em A pode-se fazer com que provenha da linha toda a energia ativa necessária para alimentar a carga, ficando a cargo do inversor fornecer a energia não ativa (reativos e harmônicos). Neste caso, como o inversor não fornece potência ativa, a condição de carga das baterias não se altera. Adicionalmente, tem-se que a corrente absorvida da linha é senoidal e em fase com sua tensão, ou seja, o UPS opera como um compensador de fator de potência, independente da carga. Esta análise supõe uma carga com alta impedância de entrada, o que não é verdade em situação muito usual em que a carga tem um comportamento de fonte de tensão (retificador com filtro capacitivo).

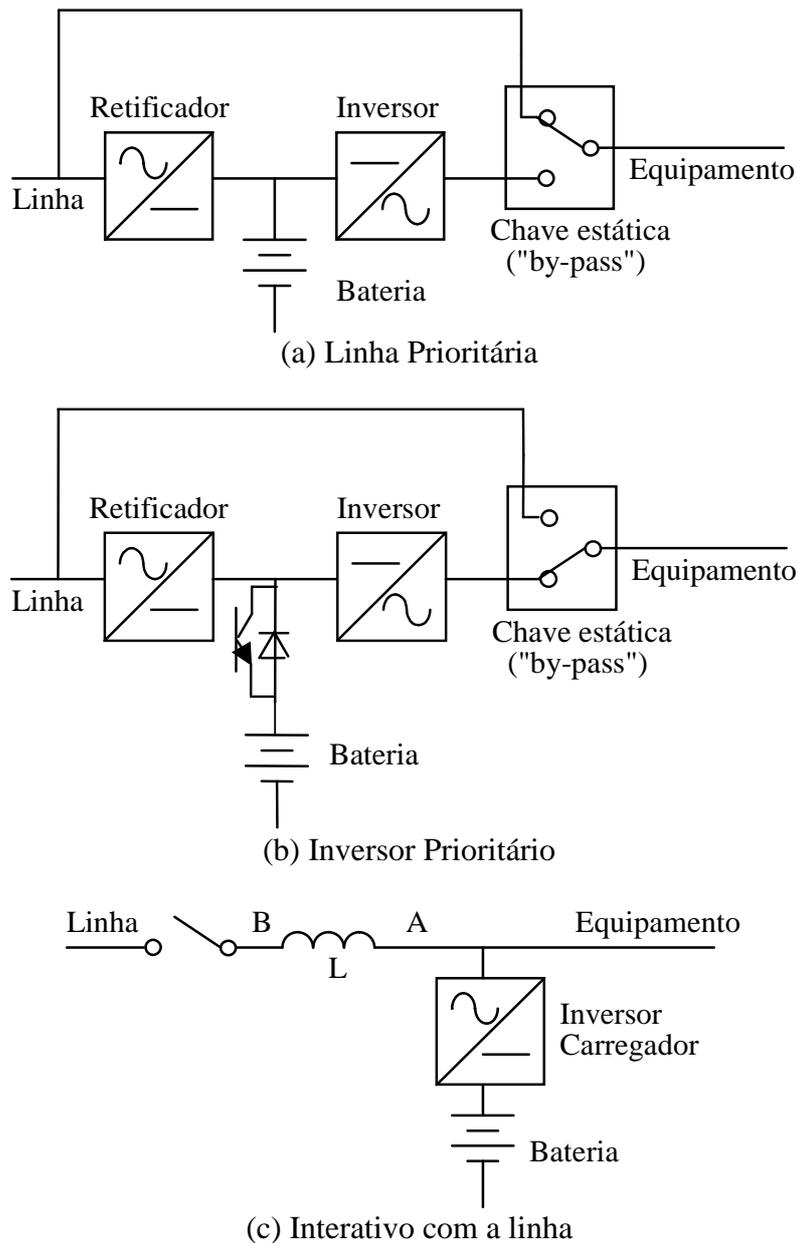


Figura 6.2 Configurações de UPS.

O fato de não fazer uso de dupla conversão, ou seja, o retificador não está inserido na alimentação da carga, faz com que o rendimento do conjunto seja superior ao da estrutura “Inversor prioritário”, de modo a ser aplicável em potências mais elevadas.

6.3 Outras Características de UPS

6.3.1 Forma de onda da saída

A obtenção de uma onda senoidal (em um conversor CC-CA) é mais complexa do que uma tensão de forma quadrada. Por este motivo, as UPS de baixa potência e para cargas não altamente críticas, podem fornecer uma tensão quadrada em sua saída e utilizam uma configuração do tipo Linha preferencial. Como, normalmente, alimentam pequenos computadores de uso pessoal, os quais tem um estágio de entrada com um retificador a diodos e filtro capacitivo, o parâmetro principal é que a tensão possua o mesmo *valor de pico* da tensão normal (rede). Comparativamente a uma onda senoidal, tal tensão apresentará um maior valor

eficaz, mas que não traz maiores conseqüências. Dado o espectro da onda produzida, haverá um maior aquecimento em transformadores e indutores eventualmente presentes, mas que, dado o curto prazo de atuação da UPS, em geral não causam maiores problemas.

Em sistemas de maior porte e criticidade são usados inversores com saída senoidal.

6.3.2 Isolação elétrica

A isolação elétrica entre entrada e saída é necessária quando, por motivo de segurança ou de norma, deve-se aterrar um dos terminais da saída.

Dois tipos de isolação podem ser utilizados: em baixa ou em alta frequência. Como se sabe, quanto maior a frequência de operação, menores as dimensões do transformador, o que tende a reduzir custo, volume e peso. No entanto, isolação em alta frequência é possível apenas em alguns pontos e para algumas topologias dos conversores CA-CC e CC-CA. Já a isolação em baixa frequência pode ser colocada na entrada (rede) ou na saída da UPS.

6.3.3 Paralelismo

Conectar em paralelo duas ou mais UPSs é necessário quando se deseja ampliar a potência instalada ou aumentar a confiabilidade do sistema.

No primeiro caso, o fator determinante é o econômico, quando é mais barato utilizar uma UPS adicional para alimentar um acréscimo de carga do que trocar todo o sistema já existente.

No outro caso, para cargas muito críticas, a redundância torna-se necessária.

As questões a serem consideradas são diversas:

- deve-se garantir que as tensões de saída sejam idênticas e que as correntes sejam igualmente distribuídas;
- em caso de falha de qualquer uma das UPS, as demais devem ser capazes de manter o equipamento crítico em operação;
- para manter a identidade das tensões, uma das UPS deve produzir a referência para as demais;
- em caso de falha, uma outra deve assumir tal função.

6.4 Componentes de uma UPS estática

6.4.1 Retificador

O retificador, além de produzir a tensão CC que alimenta o inversor tem também como função manter as baterias carregadas.

As baterias serão adequadamente carregadas desde que a tensão de saída do retificador seja um pouco superior à tensão nominal das baterias, de modo a suprir as perdas devidas às quedas resistivas presentes. Tensões menores não permitirão um processo adequado de recarga, enquanto tensões muito elevadas podem produzir correntes excessivas, levando à eletrólise.

Caso as baterias estejam muito descarregadas, é possível que o retificador tenha seu limite de corrente atingido. Em tal caso, a recarga é feita a corrente constante, até que a tensão suba a níveis adequados.

Considerando adicionalmente a possibilidade de variação da tensão da linha, pode-se concluir que o retificador deve ser do tipo controlado. A solução mais simples e barata é usar um retificador a tiristores, com controle da tensão de saída através da variação do ângulo de disparo, como mostrado na figura 6.3.

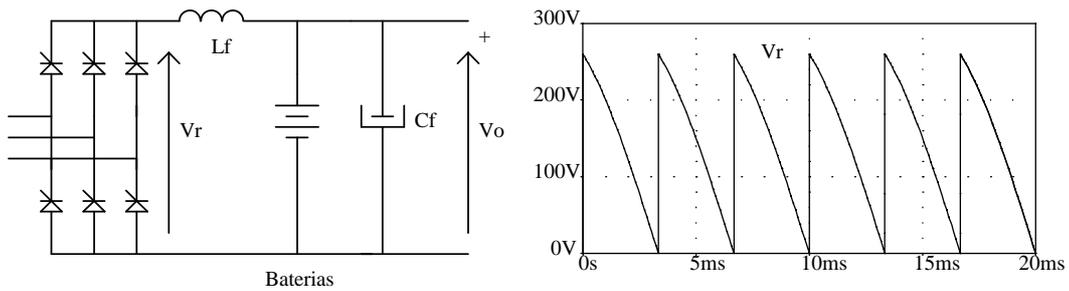


Figura 6.3 Retificador controlado a tiristores com forma de onda de tensão típica de saída.

Para sistemas de maior potência, é comum utilizar retificadores de 12 ou mesmo 24 pulsos, a fim de minimizar o conteúdo harmônico da corrente absorvida da linha. Tal implementação, no entanto, exige a presença de um transformador na entrada do retificador.

A utilização de uma ponte de diodos tem o inconveniente de não permitir ajustar o valor da tensão de saída. Isto poderia ser feito, por exemplo, adicionando um conversor CC-CC, operando em alta frequência. A figura 6.4 mostra diferentes possibilidades de implementação. No primeiro caso o recortador estabiliza também a tensão fornecida ao inversor, devendo, assim, suportar toda a potência da carga. No segundo caso ele controla apenas a recarga das baterias, sendo, portanto, de muito menor potência. O inversor deverá ser capaz de ajustar sua operação de modo que a variação na tensão CC (produzida por variações na tensão da rede) não afete a tensão fornecida pela UPS.

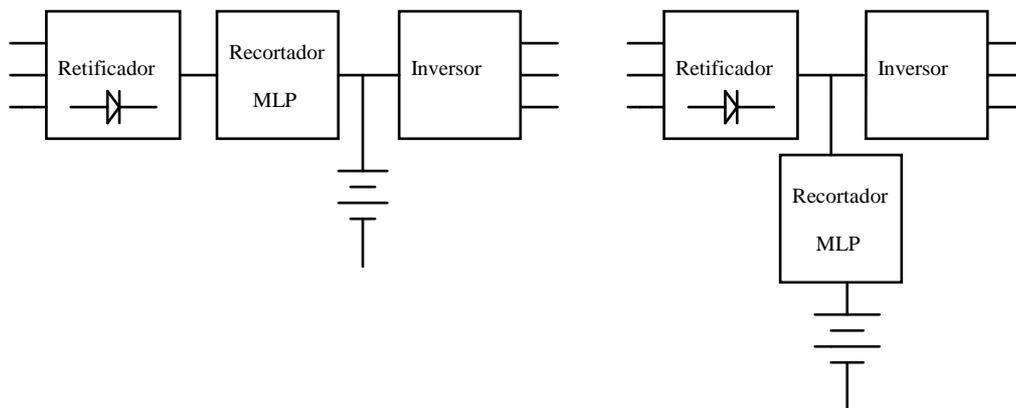


Figura 6.4 Configurações com retificador a diodos.

O recente desenvolvimento de retificadores com correção de fator de potência, sejam monofásicos ou trifásicos, vem permitir, aliado ao controle da tensão de saída, absorver uma corrente senoidal e em fase com a tensão da rede, implicando num fator de potência que tende à unidade. A figura 6.5 mostra possíveis topologias para este tipo de circuito. No primeiro caso tem-se um retificador trifásico no qual as chaves semicondutoras são transistores, permitindo a aplicação de modulação por largura de pulso, o que possibilita absorver uma corrente senoidal na rede. A tensão CC de saída é sempre maior do que o valor de pico da tensão de entrada, trata-se pois, de uma topologia elevadora de tensão. No outro caso tem-se um conversor tipo elevador de tensão, com entrada monofásica. Um controle adequado do ciclo de trabalho permite, também aqui, a absorção de uma corrente senoidal.

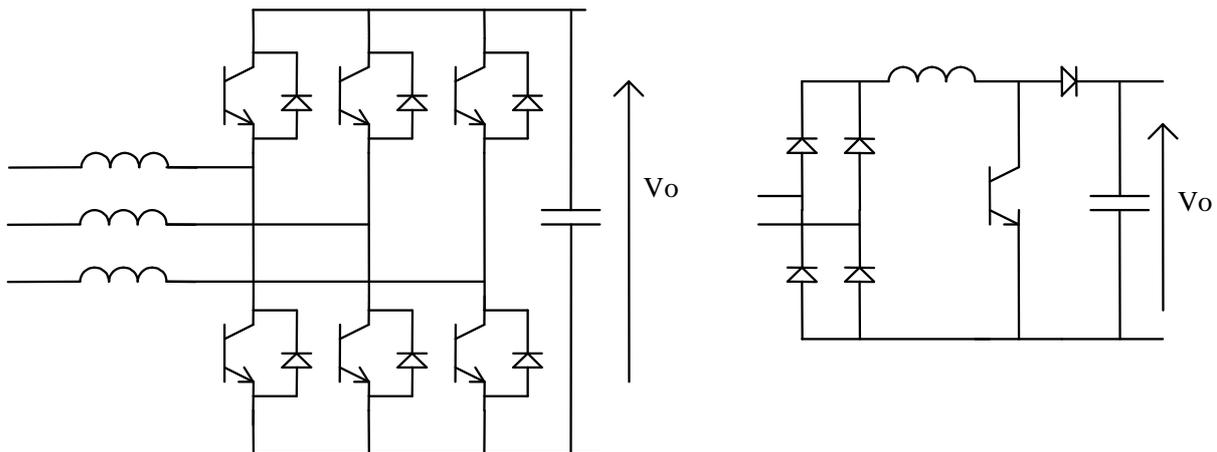


Figura 6.5 Retificador MLP e conversor elevador de tensão para correção de fator de potência.

6.4.2 Inversor

O inversor é o principal constituinte de uma UPS, uma vez que é ele quem determina a qualidade da energia fornecida à carga.

Deve fornecer uma tensão alternada, com frequência, forma e amplitude invariantes, a despeito de eventuais alterações na alimentação CC ou na carga.

A configuração básica é mostrada na figura 6.6, para um inversor trifásico. Uma saída monofásica pode ser obtida utilizando-se apenas 2 ramos, ao invés de 3.

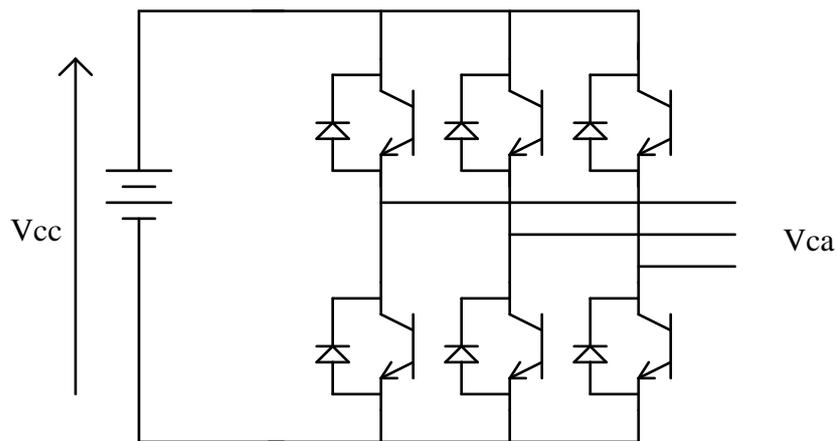


Figura 6.6 Inversor trifásico.

6.4.2.1 Inversor com saída quadrada

Consideremos o circuito de um inversor monofásico como mostrado na figura 6.7.

As leis de modulação são numerosas, a mais simples talvez seja a que produz uma onda retangular, na própria frequência de saída que se deseja. Em tal caso, uma tensão positiva é aplicada à carga quando T1 e T4 conduzirem (estando T2 e T3 desligados). A tensão negativa é obtida complementarmente. O papel dos diodos é garantir um caminho para a corrente em caso de a carga apresentar característica indutiva. Note que a condução dos diodos não afeta a forma da tensão desejada. Este tipo de modulação não permite o controle da amplitude nem do valor eficaz da tensão de saída.

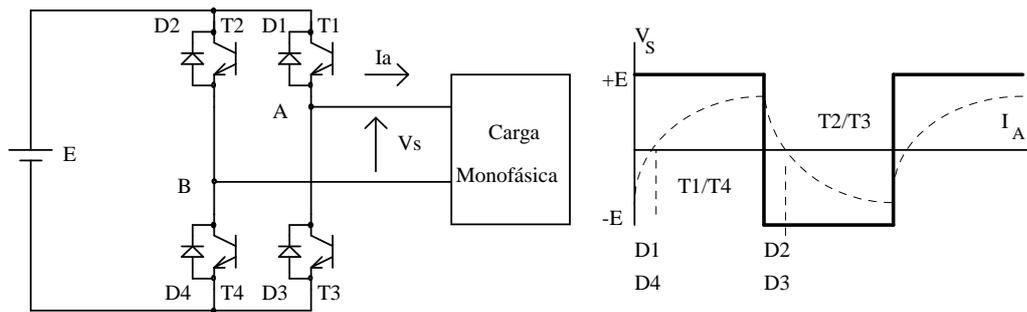


Figura 6.7. Inversor monofásico e forma de onda quadrada de saída (carga indutiva).

6.4.2.2 Inversor com saída quase-quadrada.

Uma alternativa que permite ajustar o valor eficaz da tensão de saída e eliminar algumas harmônicas é a chamada onda quase-quadrada, na qual se mantém um nível de tensão nulo sobre a carga durante parte do período, como mostrado na figura 6.8.

Para obter este tipo de onda, uma possibilidade é a seguinte: quando se deseja tensão positiva na carga mantém-se T1 e T4 conduzindo (T2 e T3 desligados). A tensão negativa é obtida complementarmente. Os intervalos de tensão nula são obtidos mantendo T1 conduzindo e desligando T4. Com corrente positiva, D2 entrará em condução. Quando T1 desligar D3 entra em condução, aguardando o momento em que T2 e T3 conduzem, o que ocorre quando a corrente se inverte. O intervalo de tensão nula seguinte é obtido com o desligamento de T3 e a continuidade de condução de T2.

Nota-se que estão presentes os múltiplos ímpares da frequência de chaveamento, o que significa que a filtragem de tal sinal para a obtenção apenas da fundamental exige um filtro com frequência de corte muito próxima da própria frequência desejada. Este espectro varia de acordo com a largura do pulso. Para este caso particular não estão presentes os múltiplos da terceira harmônica.

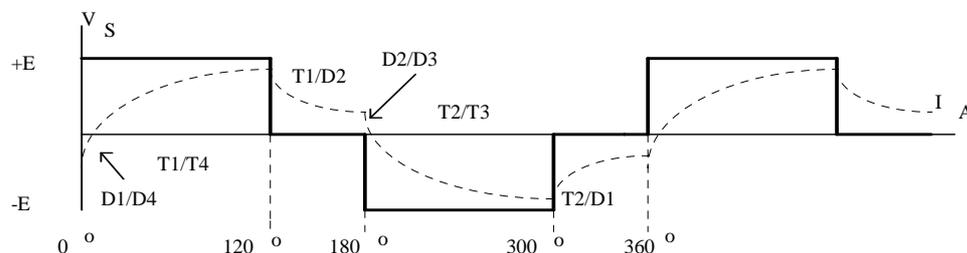


Figura 6.8 Forma de onda quase-quadrada.

6.4.2.3 Inversor ferro-ressonante

A obtenção de uma onda senoidal a partir de ondas quadradas é possível através de filtragem. O tamanho do filtro é determinado não apenas pela quantidade de harmônicas que se quer minimizar, mas também pela frequência de tais harmônicas. Quanto menores forem as frequências, maior será o filtro (maiores valores de indutância e capacitância com conseqüente maior volume e peso).

Quanto menor for o filtro (menor impedância) melhor será a regulação de tensão na saída, especialmente em situações transitórias, uma vez que valores elevados de indutância e capacitância produzem respostas lentas a perturbações. Além disso, as distorções introduzidas pela carga distorcerão menos a tensão fornecida.

O conceito básico do inversor ferro-ressonante é sintonizar um filtro na frequência desejada na saída (50 ou 60Hz), de modo a eliminar as harmônicas. Adicionalmente o conversor apresenta outras importantes características para uma UPS, quais sejam: regulação da tensão de saída e limitação da corrente.

A figura 6.9 mostra o esquema básico do conversor.

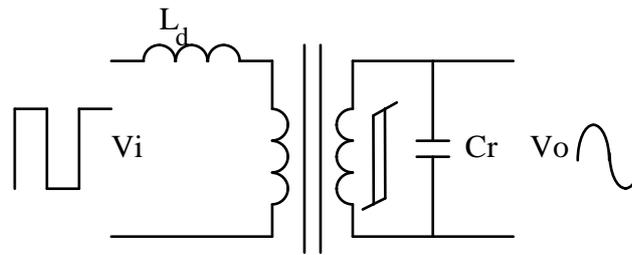


Figura 6.9 Estágio ferro-ressonante.

O capacitor C_r , associado à indutância de dispersão, L_d e, eventualmente, a uma indutância adicional, perfazem um circuito ressonante, sintonizado na frequência desejada. Mais de um caminho de fluxo magnético existe no núcleo do transformador, permitindo ao secundário saturar, enquanto o primário opera na região linear. Como resultado, o circuito de saída apresenta-se limitado em tensão (devido à saturação do secundário), enquanto o primário (que não satura) mantém a característica de limitação da corrente, devido à indutância série presente no circuito. A tensão de saída, devido à saturação, apresenta-se como uma senóide truncada. Seu conteúdo harmônico, no entanto, é menor do que o da onda quadrada presente na entrada do transformador.

A principal vantagem deste tipo de UPS é sua simplicidade, aliada a razoáveis características. Como desvantagem tem-se o volume e o peso característicos de um transformador/filtro que deve operar na frequência da rede.

6.4.2.4 Inversor Modulação por Largura de Pulso - MLP

Outra maneira de obter um sinal alternado de baixa frequência é através de uma modulação em alta frequência.

É possível obter este tipo de modulação ao comparar uma tensão de referência (que seja imagem da tensão de saída buscada), com um sinal triangular simétrico cuja frequência determine a frequência de chaveamento. A frequência da onda triangular (chamada portadora) deve ser, no mínimo 20 vezes superior à máxima frequência da onda de referência, para que se obtenha uma reprodução aceitável da forma de onda sobre a carga, depois de efetuada a filtragem. A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora (triangular). Tem-se, assim, uma Modulação por Largura de Pulso.

A tensão de saída, que é aplicada à carga, é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC e duração variável.

A figura 6.10 mostra a modulação de uma onda senoidal, produzindo na saída uma tensão com 2 níveis, na frequência da onda triangular.

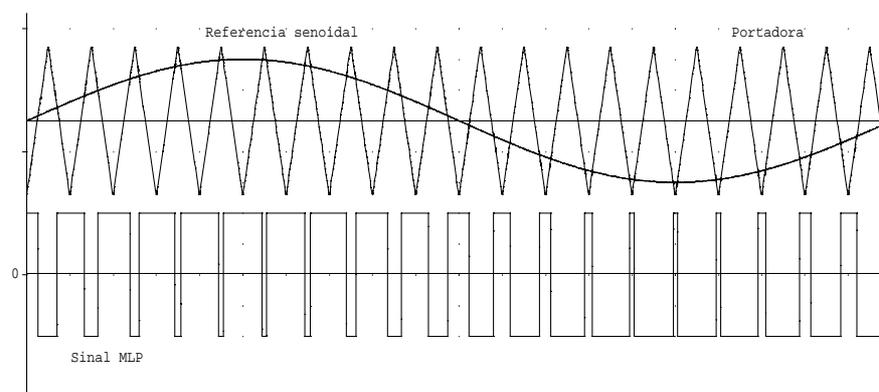


Figura 6.10. Sinal MLP de 2 níveis.

É possível ainda obter uma modulação a 3 níveis (positivo, zero e negativo). Este tipo de modulação apresenta um menor conteúdo harmônico, como mostra a figura 6.11. Um sinal de 3 níveis é ligeiramente mais complicado para ser gerado analogicamente.

Uma maneira de fazê-lo é de acordo com a seguinte seqüência:

- durante o semiciclo positivo, T1 permanece sempre ligado;
- o sinal MLP é enviado a T4 e o mesmo sinal *barrado* é enviado a T2.
- no semiciclo negativo, quem permanece conduzindo é T3,
- o sinal MLP é enviado a T2 e o sinal *barrado* vai para T4.

Desta forma, na presença de uma carga indutiva (portanto com a corrente atrasada em relação à tensão), é possível manter sobre a carga uma onda efetivamente modulada em largura de pulso, de modo que, depois de filtrada, recupere-se o sinal de referência. Deve-se prever, neste caso, um atraso nas bordas de subida em todas as comutações do sinal MLP (e não apenas na passagem de T1/T3). Estes atrasos introduzem uma pequena distorção no sinal MLP, uma vez que pulsos muito estreitos serão absorvidos pelo atraso imposto e pelos atrasos normais do circuito acionador.

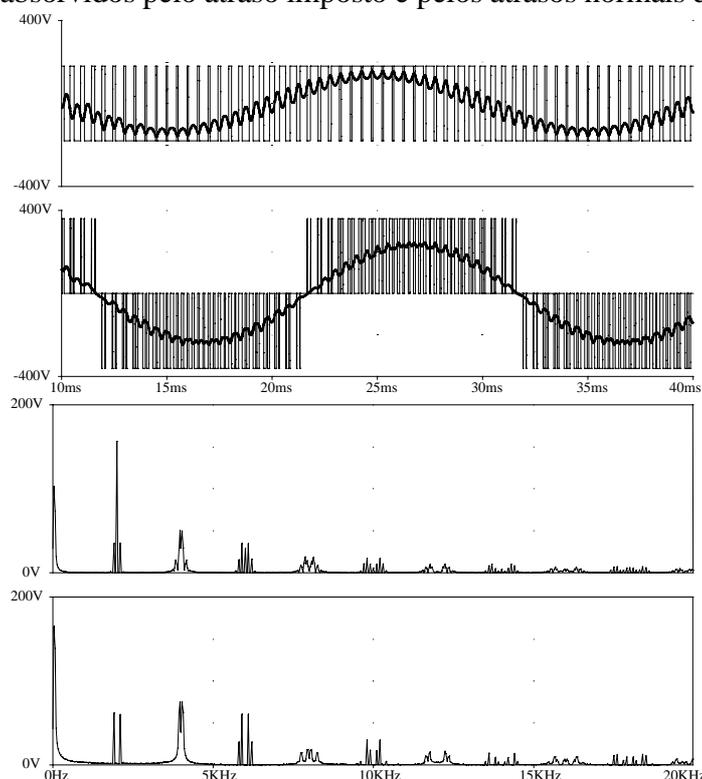


Figura 6.11. Formas de onda da tensão de fase e de linha em inversor trifásico em semi-ponte. Indicam-se ainda os respectivos sinais MLP filtrados. Espectro dos sinais MLP de 2 e 3 níveis.

A obtenção de uma saída que recupere a onda de referência é facilitada pela forma do espectro. Note-se que, após a componente espectral relativa à referência, aparecem componentes nas vizinhanças da frequência de chaveamento. Ou seja, um filtro passa baixas com frequência de corte acima e 50/60 Hz é perfeitamente capaz de produzir uma atenuação bastante efetiva em componentes na faixa dos kHz. Na figura 6.11 tem-se também as formas de onda filtradas. Uma redução ainda mais efetiva das componentes de alta frequência é obtida com o uso de filtro de ordem superior.

O uso de um filtro não amortecido pode levar ao surgimento de componentes oscilatórias na frequência de ressonância, que podem ser excitadas na ocorrência de transitórios na rede ou na carga. Em regime elas não se manifestam, uma vez que o espectro da onda MLP não as excita. Os menores valores dos elementos de filtragem tornam a resposta dinâmica deste sistema mais rápida que as anteriores.

Normalmente a obtenção de uma forma de onda adequada, principalmente quando se alimenta uma carga não-linear, somente é obtida por meios ativos, através da realimentação da tensão de saída.

A figura 6.12 mostra o resultado experimental de uma UPS monofásica alimentando uma carga não-linear. Neste caso a carga é isolada por meio de um transformador de baixa-frequência. O filtro passivo é de segunda ordem, LC, no qual a indutância de saída do inversor inclui a indutância de dispersão do transformador. Um valor de distorção harmônica compatível com a norma foi obtido com realimentação da tensão de saída.

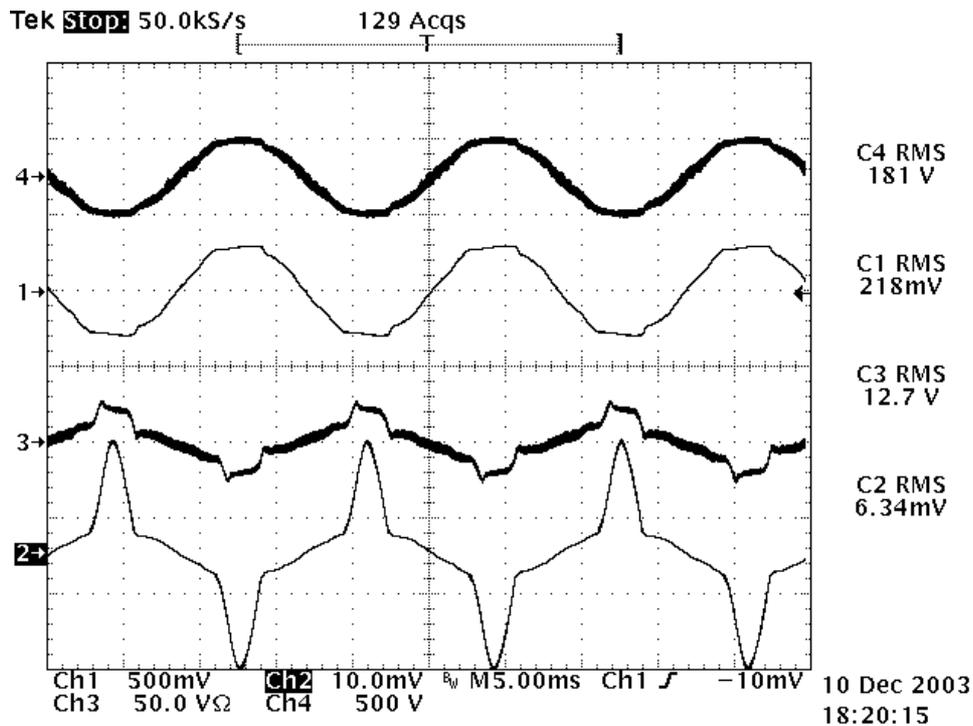


Figura 6.12. Tensões e correntes no primário e na carga (THD_v=5,5%, THD_i=50%, V_{rms}=108,9 V, FC=2,4).

Quando se trata de um inversor trifásico, 2 arranjos podem ser feitos: utilizando 3 inversores monofásicos (o que exige 12 transistores, e é chamado de ponte completa) ou um arranjo chamado de semiponte, com 6 transistores, como o mostrado na figura 6.13.

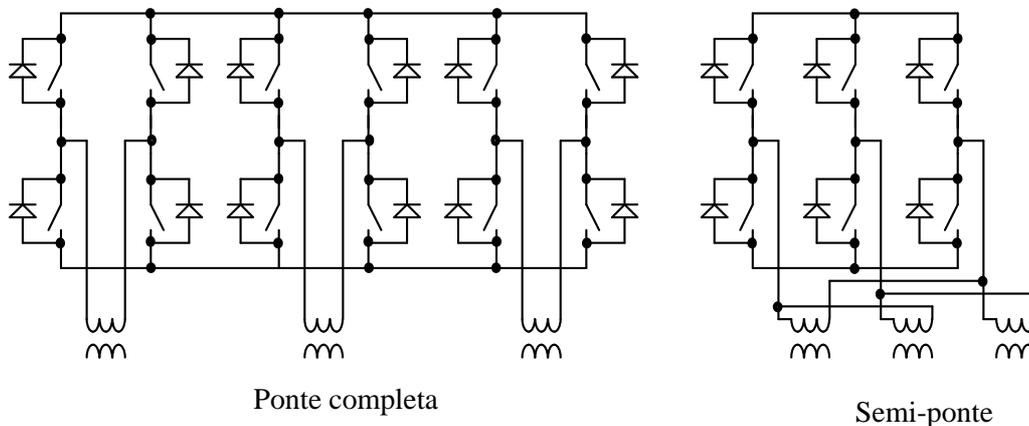


Figura 6.13. Topologias de inversor em ponte completa e em semiponte.

Em termos do conversor em semiponte, o sinal de comando enviado a cada ramo do inversor é do tipo 2 níveis (quando um transistor liga, o complementar desliga). Assim, a tensão de fase apresenta-se em 2 níveis. No entanto, a tensão de linha (entre 2 fases) apresenta-se de 3 níveis.

6.4.2.5 Inversor multinível

Os conversores multiníveis apresentam vantagens sobre conversores PWM, especialmente para aplicações de média e alta potência, tais como: possibilidade de conexão direta com a rede 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 níveis mais altos de potência sem a necessidade de associações em série e/ou paralelo de chaves, etc.

Por outro lado, há algumas desvantagens que devem ser consideradas para a escolha de uma topologia multinível como conversor CC/CA. As estratégias de modulação são mais complexas do que para conversores convencionais. Além disso, Microcontroladores (μC) e Processadores Digitais de Sinal (DSP) disponíveis no mercado não possuem *hardware* adequado para implementação das estratégias de modulação, dificultando suas implementações. Esta desvantagem pode ser superada por meio de algoritmos adequados e/ou com a inclusão de circuitos analógicos e digitais externos, os quais devem ser desenvolvidos especialmente para propósitos de modulação.

A figura 6.14 mostra o circuito e as formas de onda de um inversor trifásico de 5 níveis do tipo com grameamento por diodos. Quando se deseja um número maior de níveis, conversores deste tipo necessitam de uma quantidade muito grande de componentes, o que inviabiliza seu uso. A figura mostra a tensão de fase com 3 níveis. A tensão de linha apresenta-se com 5 níveis.

Para uma quantidade maior de níveis o Conversor Multinível em Cascata, Figura 6.15, destaca-se por seu reduzido número de interruptores. Contudo, possui a desvantagem de, para cada célula inversora monofásica composta por quatro chaves, requerer fontes de tensão CC isoladas. Esta desvantagem restringe a utilização do conversor a aplicações de potência elevada, nas quais outras topologias multiníveis de conversores não podem ser usadas devido à complexidade e ao elevado número de componentes requeridos.

A relação entre as várias fontes de tensão CC depende das especificações da aplicação, do número requerido de níveis da tensão de saída, da tensão reversa máxima suportável pelas chaves, etc. Quando fontes de tensão CC de valores diferentes são usadas, Conversor Multinível Assimétrico, um número ainda maior de níveis de saída pode ser obtido. Com isso, o tamanho do filtro de saída é minimizado e uma melhor performance dinâmica pode ser obtida. Além disso, apenas a célula de menor tensão opera em alta frequência enquanto os outros inversores operam em baixa frequência. Conseqüentemente, o rendimento do sistema deve aumentar.

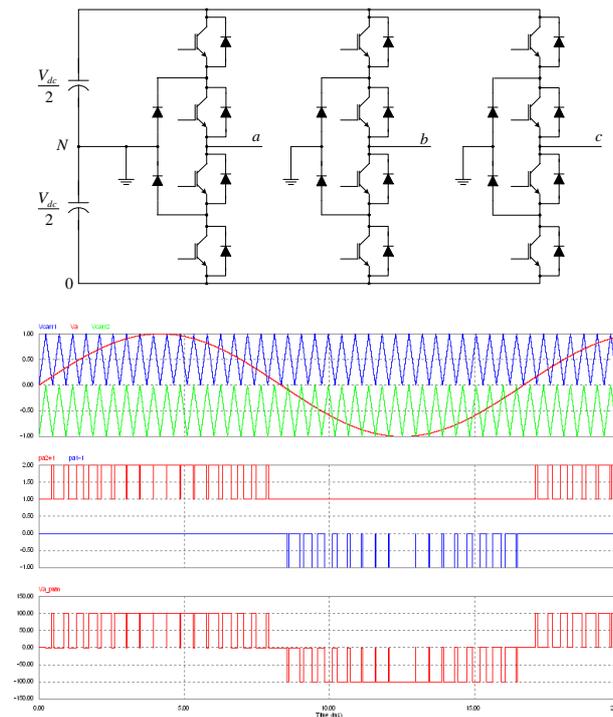


Figura 6.14 Inversor trifásico de 5 níveis com grampeamento por diodos e sinais de controle e de saída.

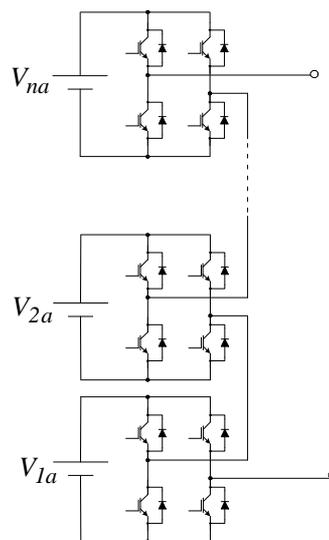


Figura 6.15. Conversor multinível monofásico composto por células inversoras monofásicas em cascata.

Na figura 6.16 tem-se um diagrama esquemático do conversor e em 6.17 tem-se uma forma de onda deste tipo. Nota-se que a distorção harmônica é reduzida, embora existam componentes espectrais em baixa frequência. Os filtros necessários à obtenção de uma onda senoidal devem ter uma frequência de corte baixa, uma vez que as componentes harmônicas apresentam-se em múltiplos da frequência da rede. No entanto, a atenuação não precisa ser muito grande, uma vez que as amplitudes das harmônicas são pequenas.

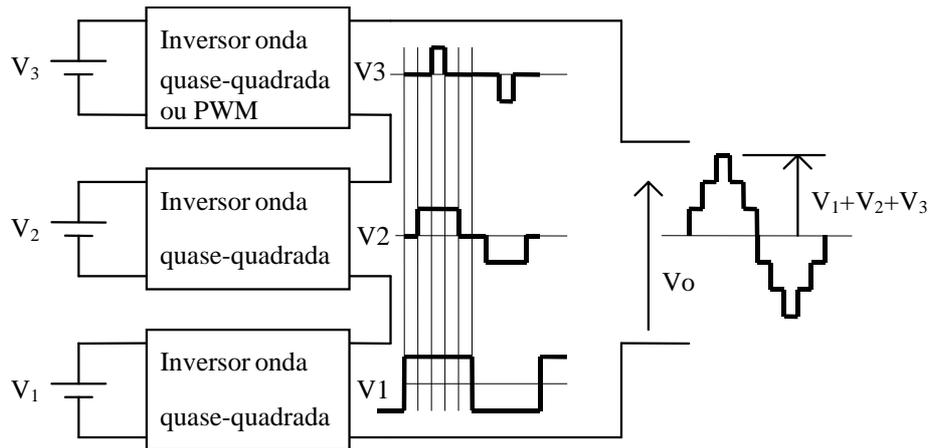


Figura 6.16 Diagrama esquemático de conversor multinível.

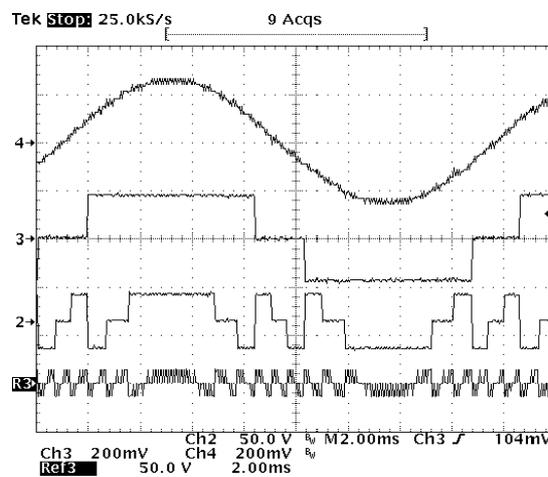


Figura 6.17. Forma de onda de sinal multinível.

6.4.3 A chave estática ou “by-pass”

Como outro elemento eletrônico (ou eletromecânico) constituinte de uma UPS tem-se a chave estática, também chamada de “by-pass”. Sua função é permitir a comutação da tensão de saída do inversor para a rede e vice-versa, em caso de falha. Pode ainda ter um papel de isolar o inversor para fins de manutenção.

Basicamente existem 2 possibilidades de implementar tal chave: usando tiristores ou relés eletromecânicos.

Soluções de baixo custo usam, em geral, relés. Sua comutação deve ser rápida, de modo a não interromper a alimentação por mais de 1/2 ciclo.

Quando a potência cresce, o emprego de tiristores é o usual. Uma preocupação, neste caso, é garantir que as tensões da UPS e da rede tenham a mesma fase e amplitude no momento da comutação, para evitar a existência de uma corrente que circule de uma fonte para outra. Como o desligamento de um tiristor se dá quando sua corrente vai a zero, este deve ser o momento de inibir os pulsos que acionam o tiristor que conecta a UPS à carga e de acionar aquele que a conecta à rede. A figura 6.18 mostra um arranjo típico.

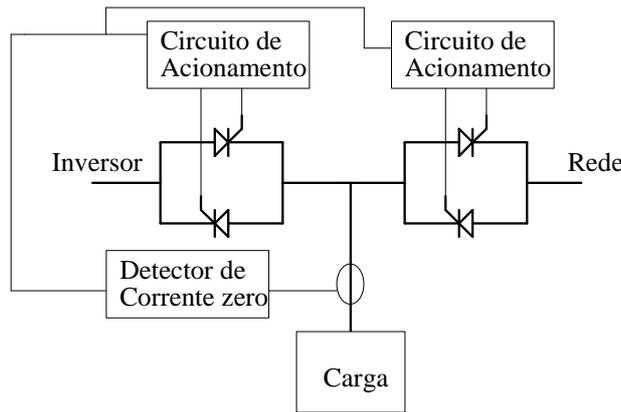


Figura 6.18. Sistema de acionamento de “by-pass”.

6.5 Resultados Experimentais

Os resultados mostrados a seguir foram obtidos em ensaios de equipamentos comerciais, testados no Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp.

6.5.1 Linha prioritária

Observe-se na figura 6.19 que há um atraso na entrada em funcionamento do inversor, e que o mesmo está dentro da especificação de operação em menos de $\frac{1}{2}$ ciclo.

A forma de onda da saída apresenta baixa distorção harmônica. O topo achatado deve-se à limitação de tensão do banco de baterias. A distorção harmônica total (THD) é de 3,6%. A carga alimentada, neste caso, é resistiva e no valor nominal.

A figura 6.20 mostra a tensão na entrada e na saída no teste de rejeição a transitório. A perturbação produzida teve variação pico-a-pico de aproximadamente 120 V e foi integralmente sentida pela saída.

A regulação da tensão de saída é feita pela variação de “taps” na entrada, como se verifica na figura 6.21. Nota-se que quando ocorre a operação via baterias (96 V) a tensão é de 111,6 V, ou seja, 7% abaixo da nominal. No intervalo em que está atuando o regulador tem-se uma variação entre -7,7% a +10%.

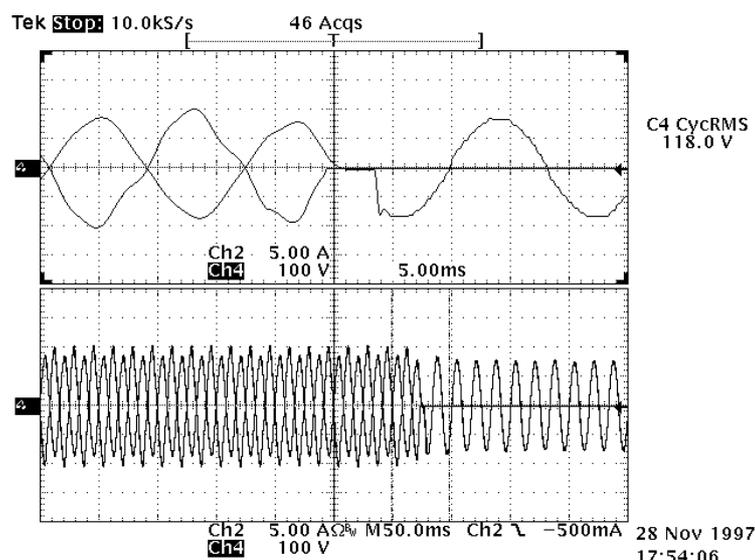


Figura 6.19 Tensão de saída e a corrente da rede com carga resistiva na transição da alimentação da rede para baterias.

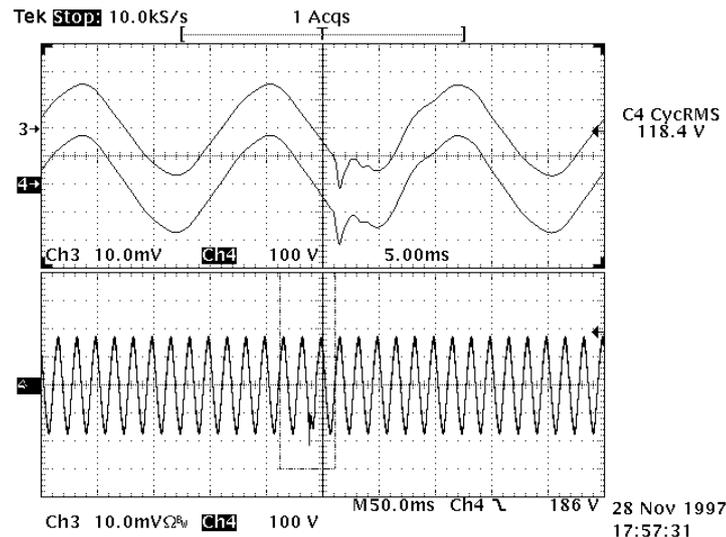


Figura 6.20. Rejeição de transitório na entrada.

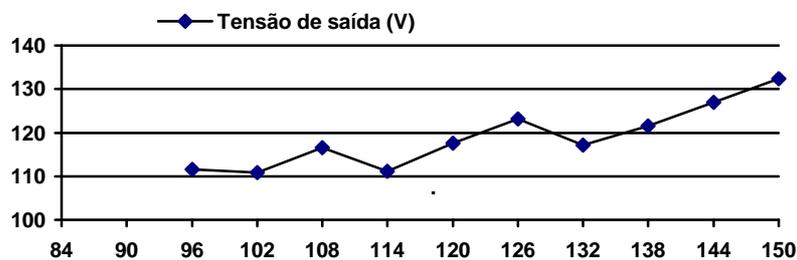


Figura 6.21. Regulação de tensão de saída em função da tensão de entrada, com carga resistiva.

6.5.2 Inversor prioritário

A figura 6.22 mostra que não existe transitório na passagem da alimentação da rede para as baterias. Note-se que a corrente de entrada se anula quando há falha na alimentação.

A figura 6.23 mostra a tensão na entrada e na saída no teste de rejeição a transitório. A perturbação produzida teve variação pico-a-pico de aproximadamente 150 V e não foi sentida pela saída.

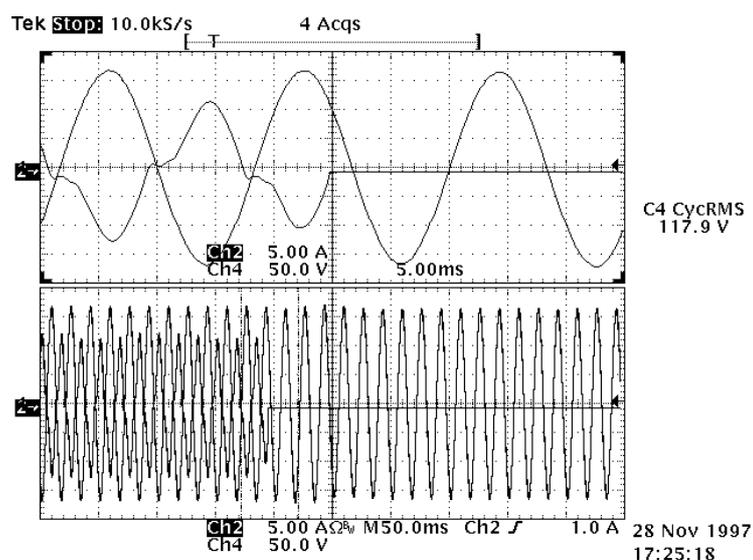


Figura 6.22. Tensão de saída e corrente da rede com carga resistiva na transição da alimentação da rede para baterias.

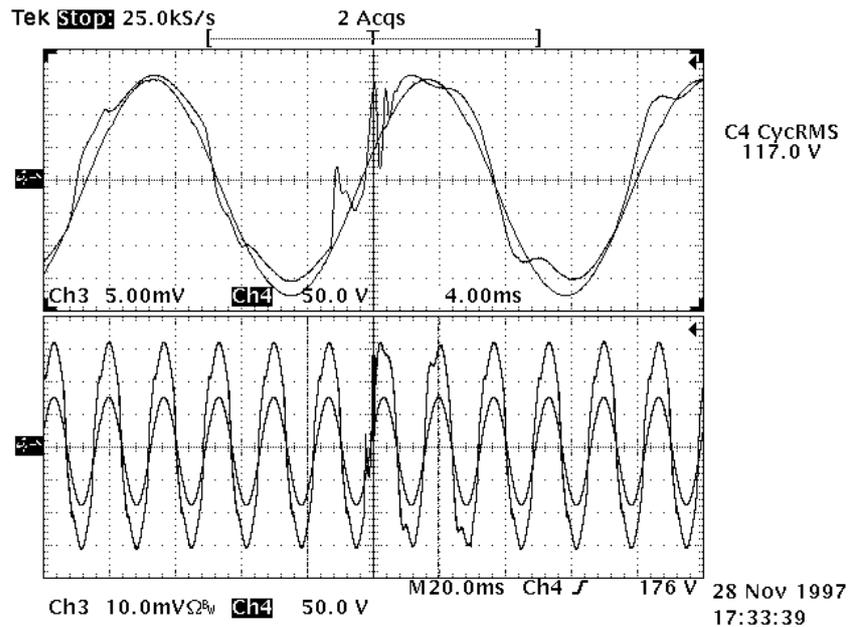


Figura 6.23. Rejeição de transitório na entrada.

A regulação se mantém em toda faixa de experimentação, sem que o equipamento tenha recorrido ao uso das baterias. A operação com baterias ocorre para tensão inferior a 92 V.

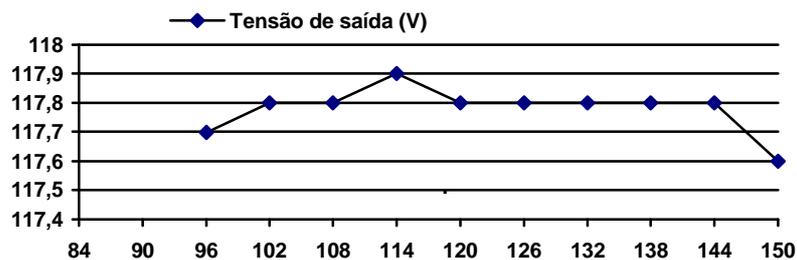


Figura 6.24. Regulação de tensão de saída em função da tensão de entrada, com carga resistiva.

6.6 Referências Bibliográficas

David C. Griffith: “Uninterruptible Power Supplies”, Marcel Dekker, Inc., NY, USA

R. Fratta ed I. Toigo: “Sistemi di Continuitá: Problematiche ed Applicazioni”, in 11° Corso Componenti e Sistemi Elettronici di Potenza, Tecnopolis, 21-25 Settembre 1992, Italia.

P. C. Loh, M. J. Newman, D.N. Zmood and D. G. Holmes, “A Comparative Analysis of Multiloop Voltage Regulation Strategies for Single and Three-Phase UPS Systems”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 18, n. 5, pp. 1176-1185, September 2003.

IEEE Recommended Practice for the Application and Testing of Uninterruptible Power Supplies for Power Generating Stations. ANSI/IEEE Std. 944/1986.

J. Rodriguez, J. S. Lai; F. Z. Peng, “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, volume 49, N°4, pp. 724-738, August 2002.

Edson A. Vendrusculo, Fernando P. Marafao, Jose A. Pomilio, Ricardo Q. Machado, “Digital Control of Single-phase VSI in Transformer-based UPS”, 8° Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP 2005, Recife – PE, 14 a 17 de junho de 2005.

L. A. Silva S. P. Pimentel J. A. Pomilio, “Analysis and Proposal of Capacitor Voltage Control for an Asymmetric Cascaded Inverter”, IEEE Power Electronics Specialists Conference – PESC 2005, Recife, Brasil, June 12-16, 2005.