

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

Serão estudados neste capítulo os conversores cc-ca que fornecem em sua saída 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, podem-se usar UPSs modulares, de acionamento imediato, e capazes de manter a operação do equipamento por um tempo suficiente para que não sejam perdidas operações que estavam em curso (tipicamente os tempos são da ordem de dezenas de minutos).

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. Não existem, ainda, padrões industriais reconhecidos. 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”.

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  $\mu$ s.

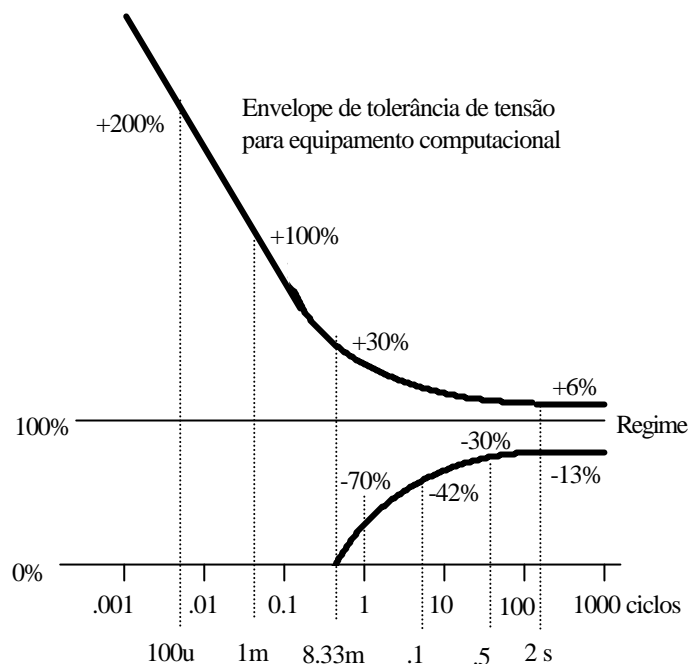


Figura 6.1 Envelope de tolerância de tensão típico para sistema computacional (adaptado da norma IEEE 466).

Uma 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  $\pm 0,5\text{Hz}$  (em torno de 60Hz), com uma máxima taxa de variação de 1Hz/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 contém 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 pode ser feita em menos de 1/4 de ciclo, o que garante a alimentação do equipamento crítico. Uma vez que este sistema não apresenta uma efetiva isolamento 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”.

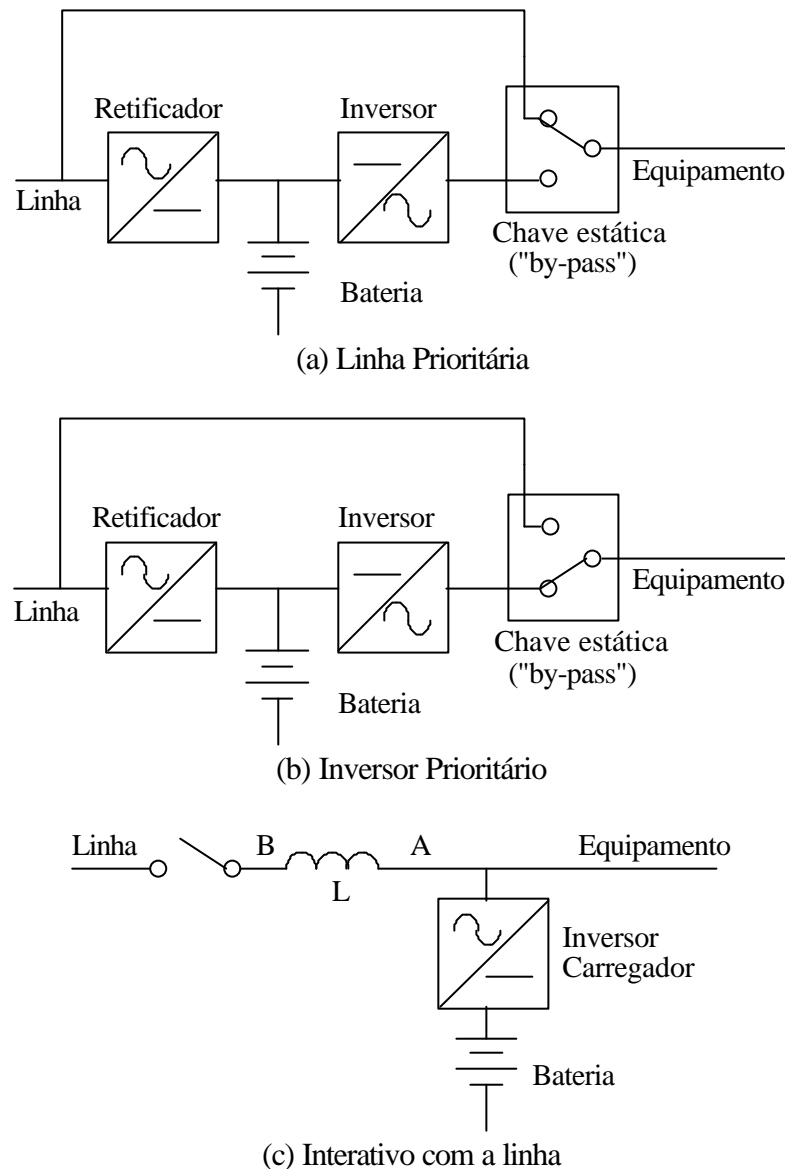


Figura 6.2 Configurações de UPS.

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 carga 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 usuais em que a carga tem um comportamento de fonte de tensão (retificador com filtro capacitivo).

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.

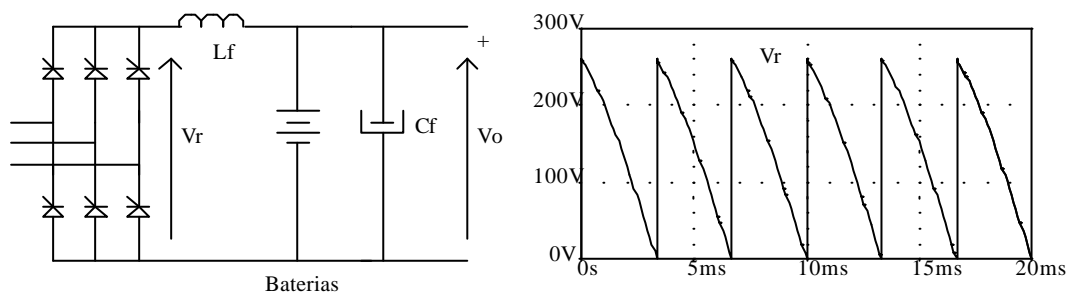


Figura 6.3 Retificador controlado a tiristores com forma de onda de tensão típica de saída.

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 afetem a tensão fornecida pela UPS.

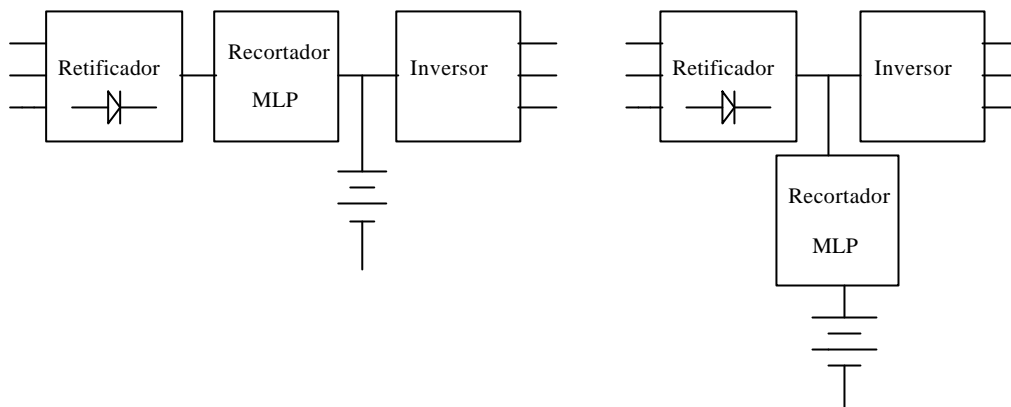


Figura 6.4 Configurações com retificador a diodos.

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. 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.

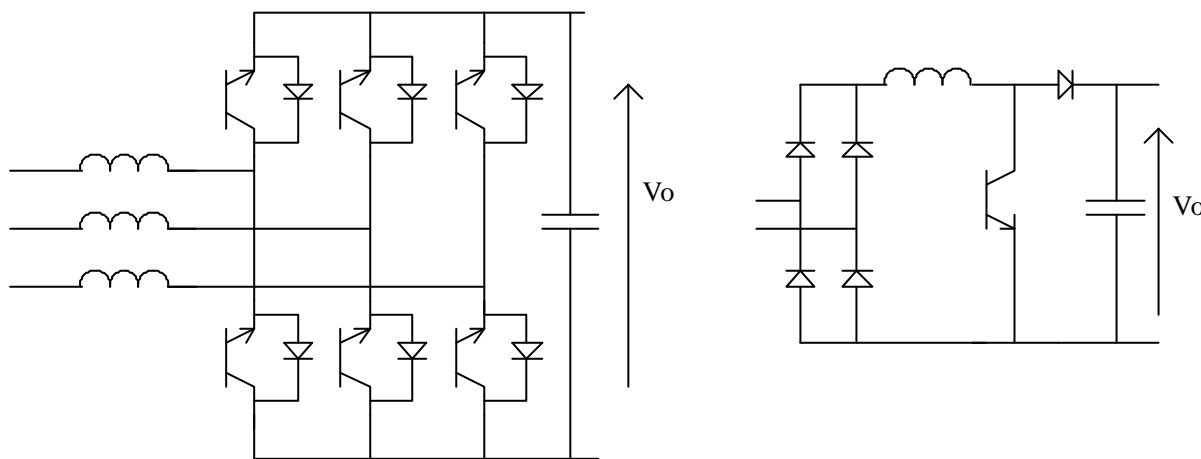


Figura 6.5 Retificador MLP e conversor elevador de tensão para correção de fator de potência.

### 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.

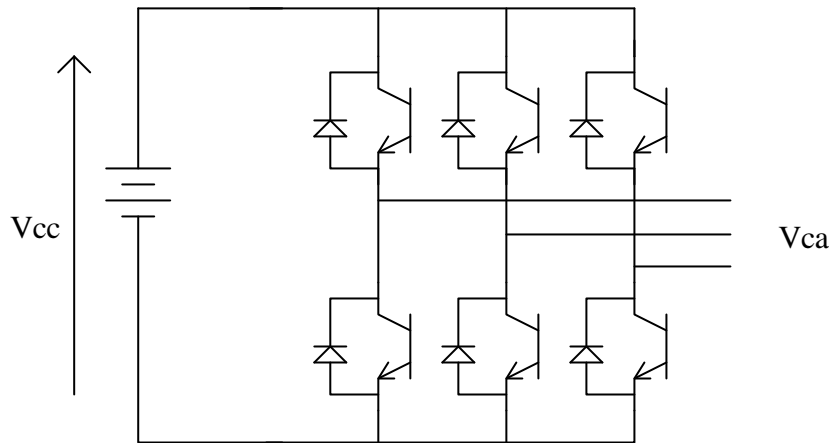


Figura 6.6 Inversor trifásico.

**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 conduzem (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.

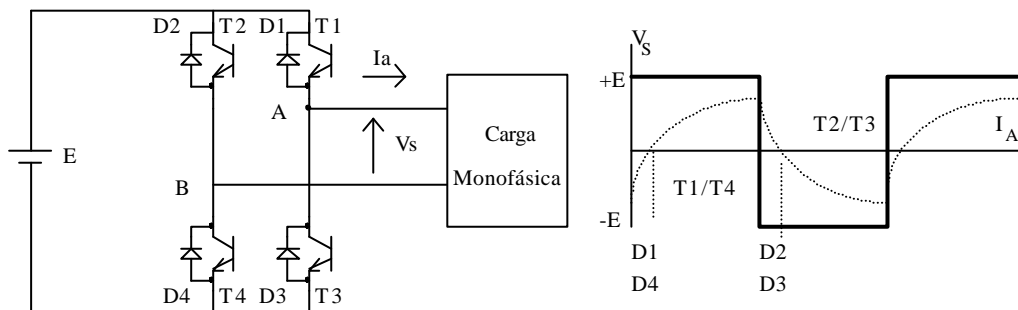


Figura 6.7. Inversor monofásico e forma de onda quadrada de saída (carga indutiva).

**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.

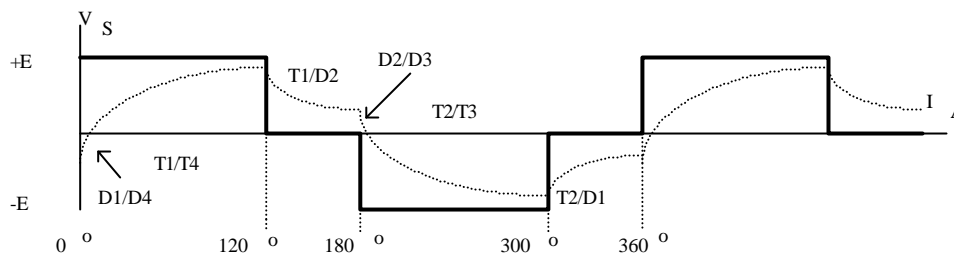


Figura 6.8 Forma de onda quase-quadrada.

### 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.

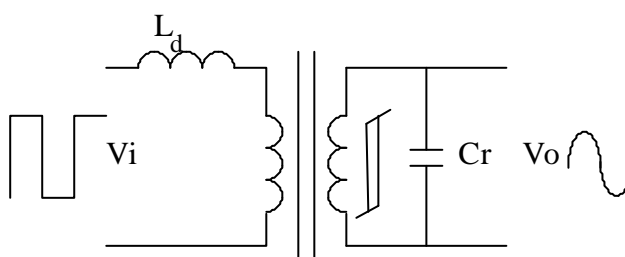


Figura 6.9 Estágio ferro-ressonante.

O capacitor Cr, 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 peso característicos de um transformador/filtro que deve operar na frequência da rede.

#### 6.4.2.4 Inversor multinível

Uma outra estratégia de modulação que produz reduzidas harmônicas é a multinível. Neste caso, a tensão de saída é produzida por diversos módulos inversores conectados em série, cada um acionado no momento adequado, de modo a tentar reproduzir uma forma de onda que se aproxime de uma senóide (ou de uma outra forma desejada).

Na figura 6.10 tem-se um diagrama esquemático do conversor e em 6.11 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.

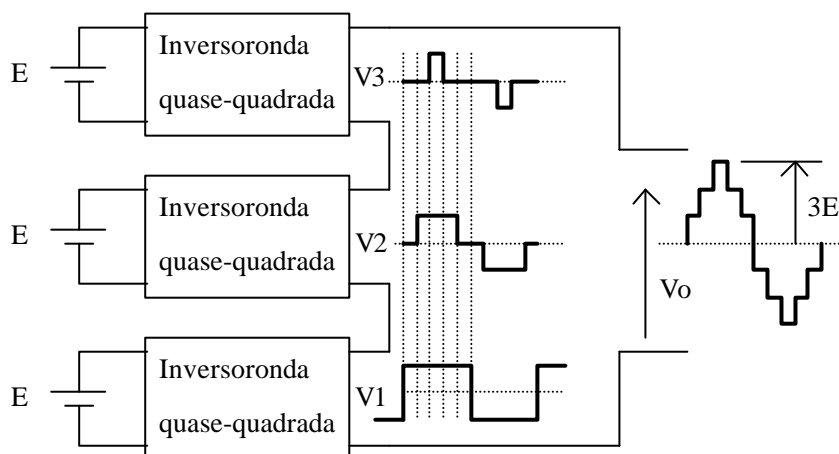


Figura 6.10 Diagrama esquemático de conversor multinível.

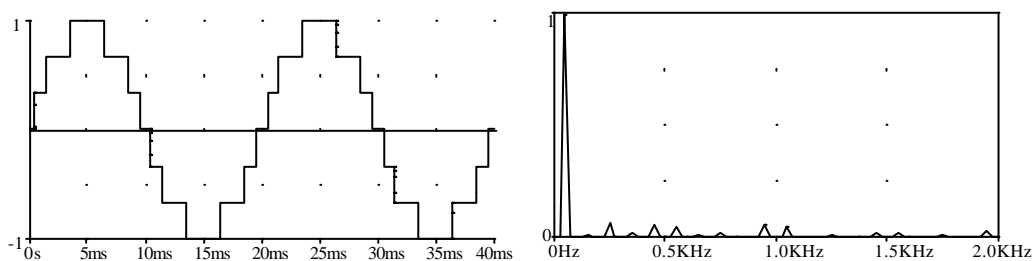


Figura 6.11. Forma de onda e espectro de sinal multinível.

#### 6.4.2.5 Inversor Modulação por Largura de Pulso - MLP

Uma 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, após 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 6.12 mostra a modulação de uma onda senoidal, produzindo na saída uma tensão com 2 níveis, na frequência da onda triangular.

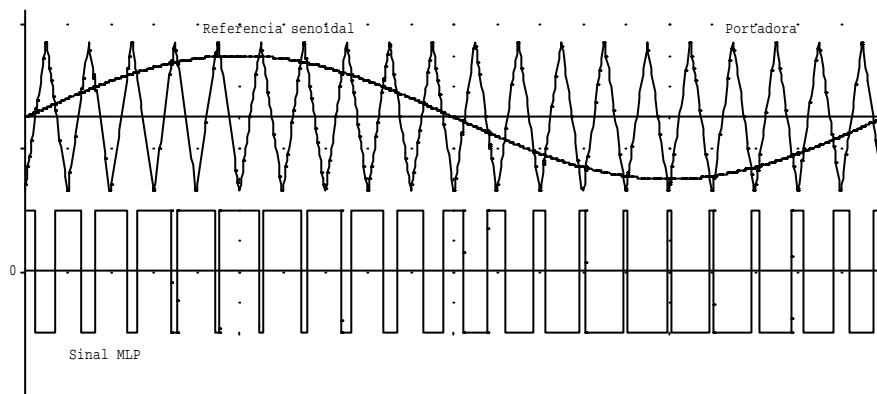


Figura 6.12. Sinal MLP de 2 níveis.

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

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 semi-ponte, com 6 transistores, como o mostrado na figura 6.13.

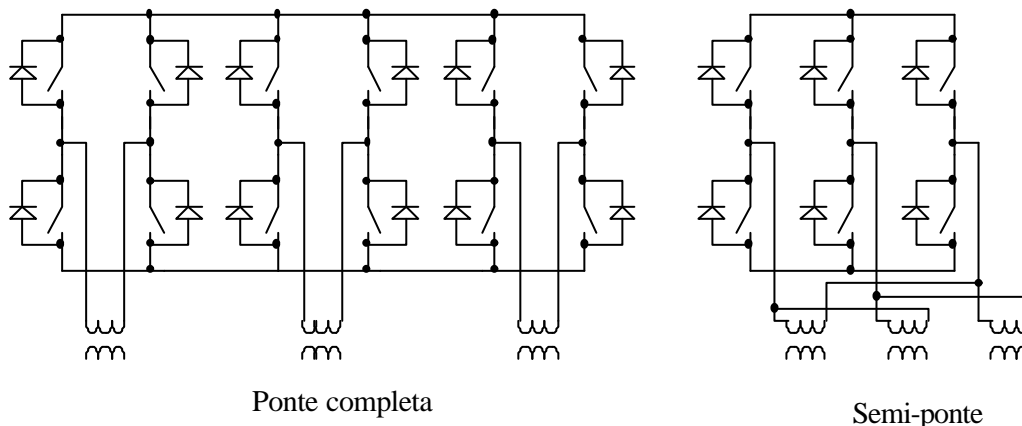


Figura 6.13. Topologias de inversor em ponte completa e em semi-ponte.

Em termos do conversor em semi-ponte, 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.

### 6.4.3 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 uso 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.

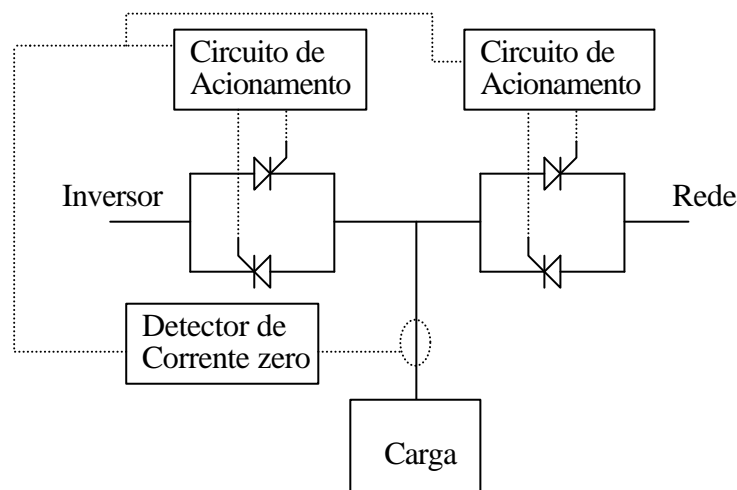


Figura 6.18. Sistema de acionamento de “by-pass”.

## 6.5 Referências Bibliográficas

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

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

6. CONVERSORES CC-CA COMO FONTES DE ALIMENTAÇÃO COM FREQUÊNCIA FIXA.....	6-1
6.1 Requisitos de qualidade na alimentação de equipamentos sensíveis .....	6-1
6.2 Classificação das UPS.....	6-2
6.3 Outras Características de UPS .....	6-4
6.3.1 Forma de onda da saída.....	6-4
6.3.2 Isolação elétrica .....	6-4
6.3.3 Paralelismo.....	6-4
6.4 Componentes de uma UPS estática .....	6-5
6.4.1 Retificador .....	6-5
6.4.2 Inversor .....	6-6
6.4.3 A chave estática ou “by-pass” .....	6-11
6.5 Referências Bibliográficas.....	6-11