

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - UNICAMP
EE 833 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

MÓDULO 6

**CONVERSORES CC-CA: INVERSORES OPERANDO EM
FREQUÊNCIA CONSTANTE**

ASPECTOS TEÓRICOS

6.1 Introdução

A obtenção de uma tensão alternada (senoidal ou não) a partir de uma fonte CC ou mesmo de uma fonte CA de frequência diferente é muitas vezes necessária para o acionamento de diversas cargas ou alimentação de sistemas.

Os conversores que realizam a transformação CC-CA são chamados inversores, enquanto a conversão CA-CA para distintas frequências é feita pelos cicloconversores.

Como exemplos de aplicações pode-se citar:

- Controle de velocidade de motores de corrente alternada,
- Fontes de alimentação ininterrupta,
- Sistemas de alimentação embarcados (navios, aviões, etc).

Geralmente os sistemas de alimentação operam a frequência fixa, gerando a tensão alternada a partir de fontes CC, utilizando, portanto, inversores. Por exemplo, o sistema de distribuição de energia em aviões comerciais opera a 400Hz.

Serão estudados nesta experiência 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”).

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.

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.

6.2 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) e posteriormente a ITIC (Information Technology Industry Council) 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 eficaz 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 mau-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 10% e uma subtensão de 10%. 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 um ciclo, ou ainda haver um surto de tensão com 2 vezes o valor nominal (eficaz), desde que com duração inferior a 1ms.

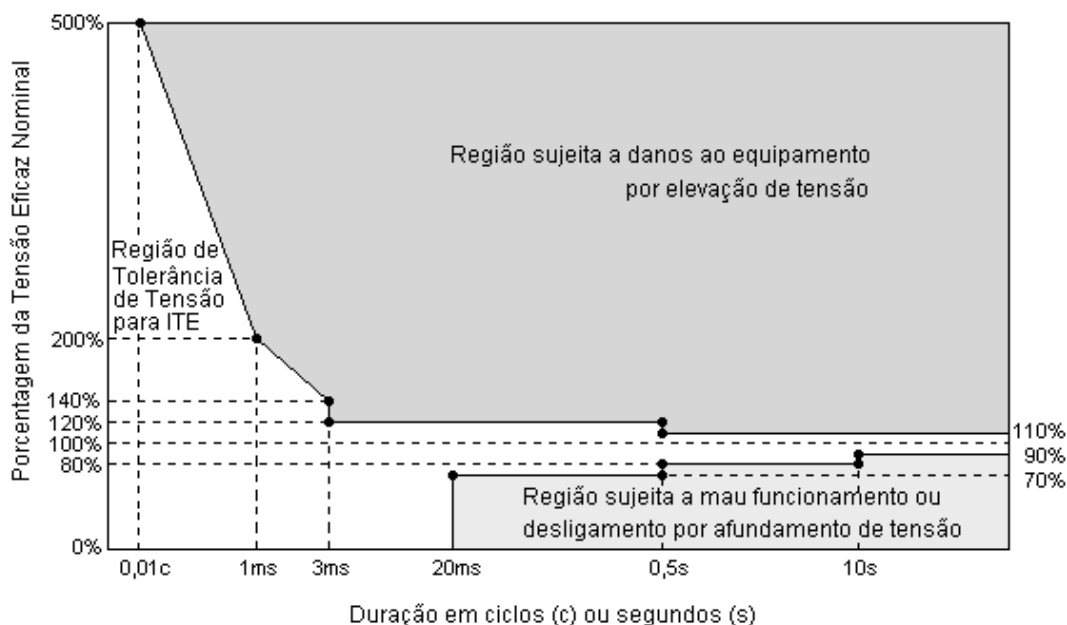


Figura 6.1 Envelope de tolerância de tensão típico para sistema computacional (adaptado da norma IEEE 466).

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 $\pm 0,5$ Hz (em torno de 60 Hz), com uma máxima taxa de variação de 1 Hz/s.

6.3 Classificação das UPS

São definidas três configurações, indicadas, simplifiadamente, 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 (também chamado de *off-line*) 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 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.

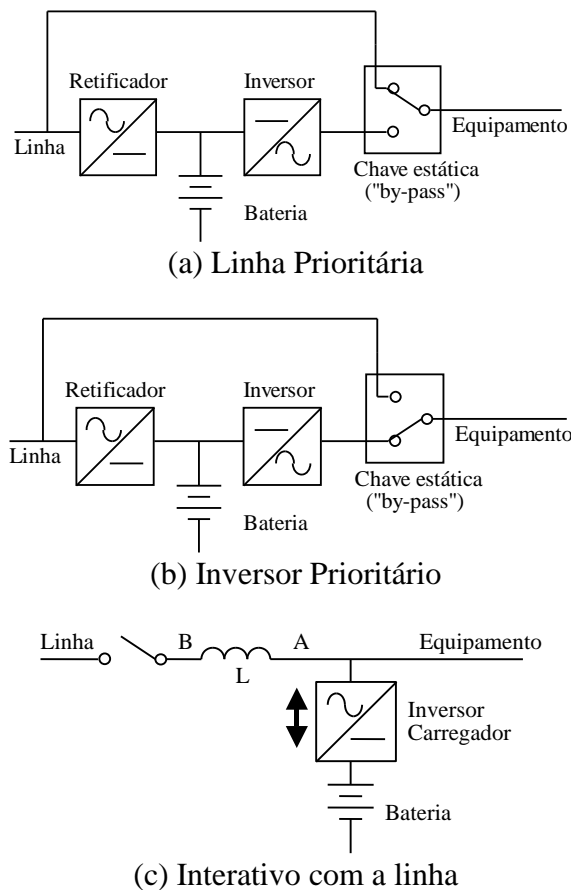


Figura 6.2 Configurações de UPS.

A configuração com inversor preferencial (também chamado de *on-line* ou dupla conversão) 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.

A configuração interativa com a linha possui apenas um conversor CC-CA e tem aplicação principal para cargas de potência elevada e que não sejam altamente críticas. Há aparelhos que operam com o inversor desligado na presença da rede (semelhante ao *off-line*). Mas a principal vantagem deste tipo de UPS é com o inversor operar em conjunto com a rede, mas sem ter que fornecer a potência ativa da carga, o que reduz significativamente as perdas no processamento da energia.

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.

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 consequências. 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 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 6.3, para um inversor trifásico. Uma saída monofásica pode ser obtida utilizando-se apenas dois ramos, ao invés de três.

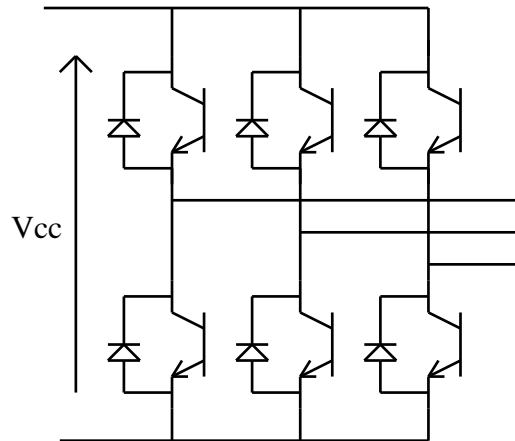


Figura 6.3 Inversor trifásico.

6.3.2.1 Inversor com saída quadrada

Consideremos o circuito de um inversor monofásico como mostrado na figura 6.4.

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 e que durante sua condução há retorno de corrente para a fonte. Este tipo de modulação não permite o controle da amplitude nem do valor eficaz da tensão de saída.

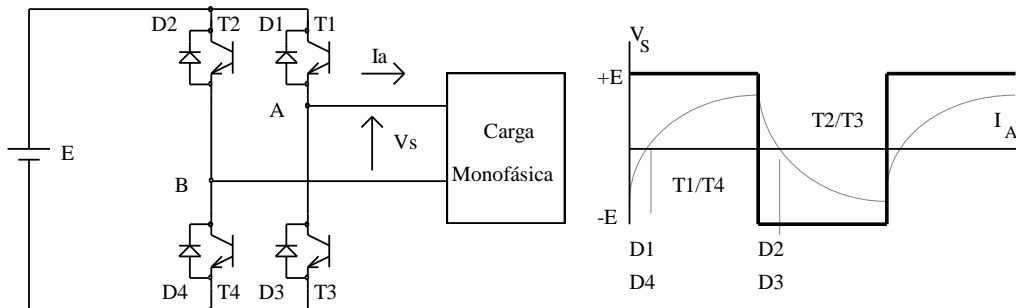


Figura 6.4. Inversor monofásico e forma de onda quadrada de saída (carga indutiva).

6.3.2.2 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 6.5 com o respectivo espectro.

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. Durante a condução do par de diodos há retorno de energia da carga para a fonte.

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.

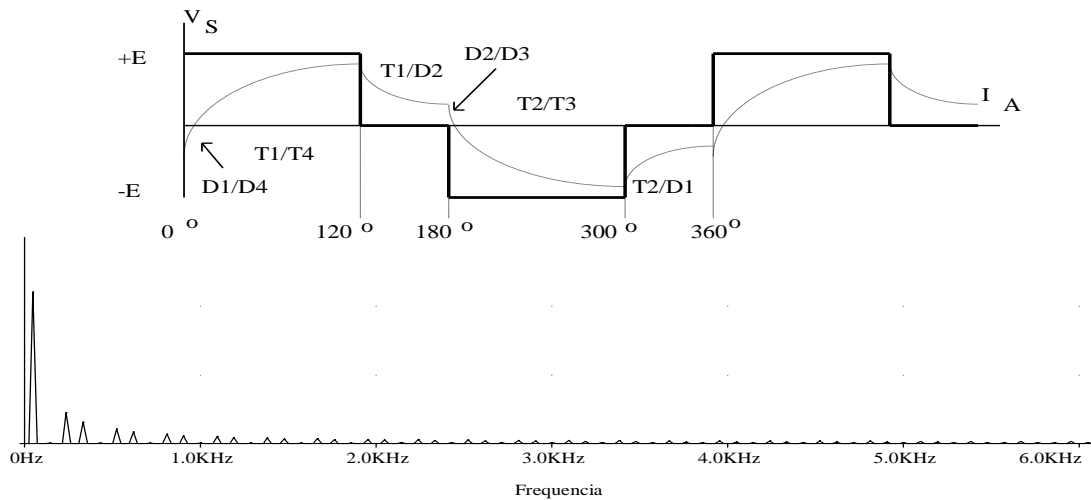


Figura 6.5 Forma de onda e espectro da onda quase-quadrada.

6.3.2.3 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. Obtém-se este comportamento 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 (portadora) deve ser, no mínimo 10 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 6.6 mostra a modulação de uma onda senoidal, produzindo na saída uma tensão com 2 níveis, na frequência da onda triangular.

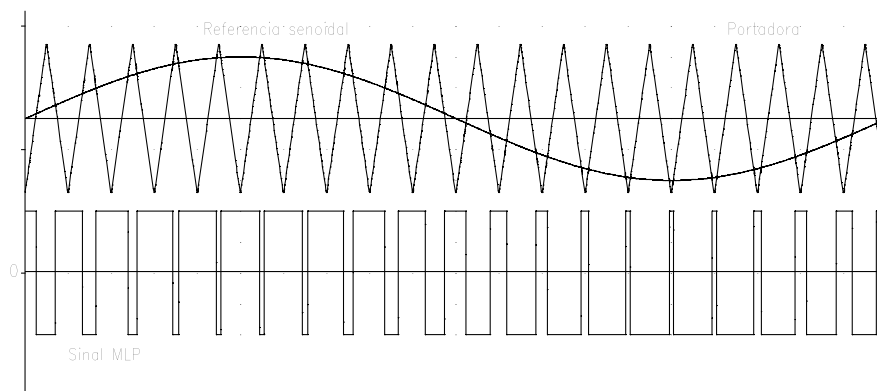


Figura 6.6. Sinal MLP de 2 níveis.

Como o processo de desligamento do transistor é sempre mais lento do que a entrada em condução, deve-se sempre prever um atraso nas bordas de subida em todas as comutações do sinal MLP. Com isso evita-se a ocorrência de um (breve) intervalo de curto-circuito aplicado no barramento CC devido à condução simultânea do transistor superior e daquele inferior, de um mesmo ramo. Estes atrasos introduzem uma pequena distorção no sinal MLP, uma vez que pulsos muito estreitos serão absorvidos pelo atraso imposto, além dos atrasos do circuito acionador.

É possível ainda obter uma modulação a três níveis (positivo, zero e negativo). Este tipo de modulação tem como vantagem apresentar um menor conteúdo espectral, como ilustra a figura 6.7.

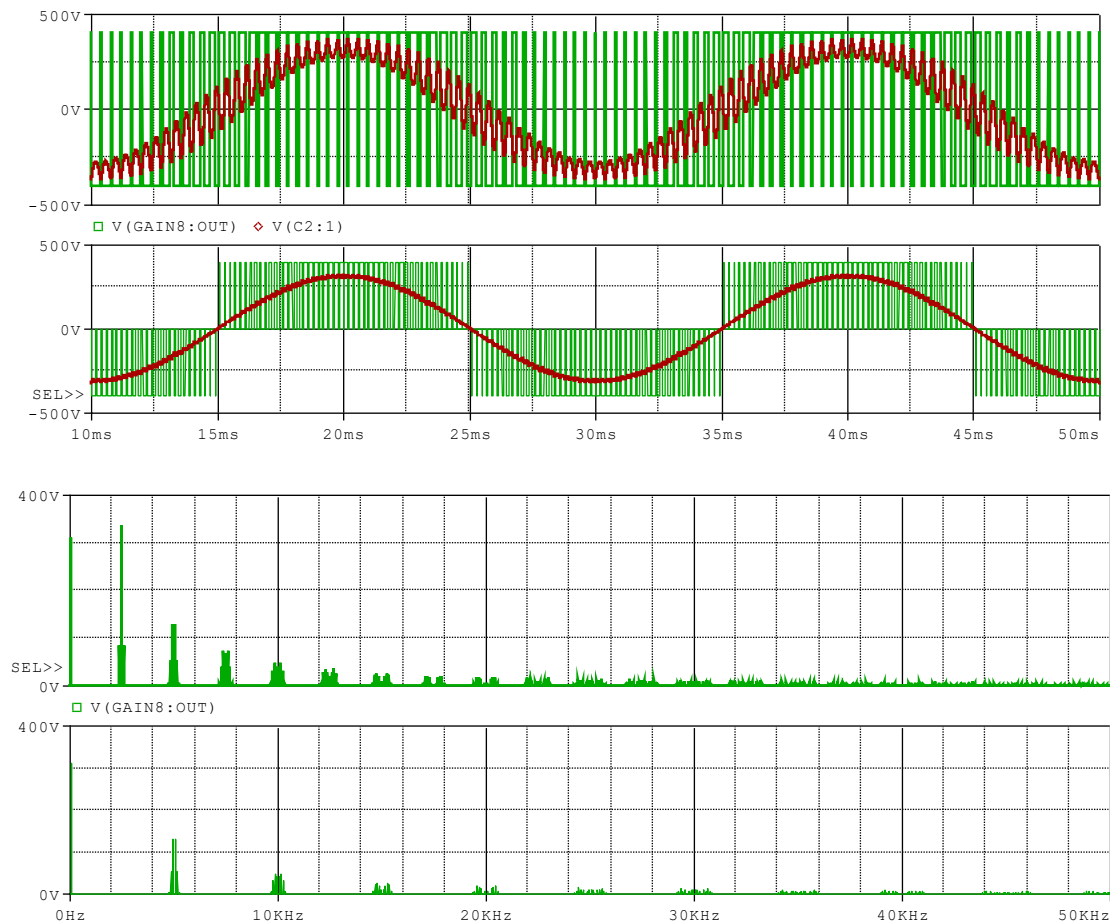


Figura 6.7 Comparação de modulação de dois e de três níveis. Formas de onda e espectros dos sinais MLP.

A recuperação da 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 6.7 tem-se também as formas de onda filtradas (filtro LC, 2mH, 10 μ F). Uma redução ainda mais efetiva das componentes de alta frequência é obtida com o uso de filtro de ordem superior.

Em relação ao comportamento do filtro passivo na saída do inversor, seu projeto deve ser cuidadoso. 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.

Há diferentes maneiras de se obter uma modulação de três níveis. Duas maneiras de fazê-lo são apresentadas a seguir.

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 6.8. Cada um dos sinais PWM é usado para comandar o par de transistores de cada braço. A tensão resultante sobre a carga se apresenta com os três níveis esperados. Todos os transistores comutam na frequência da portadora.

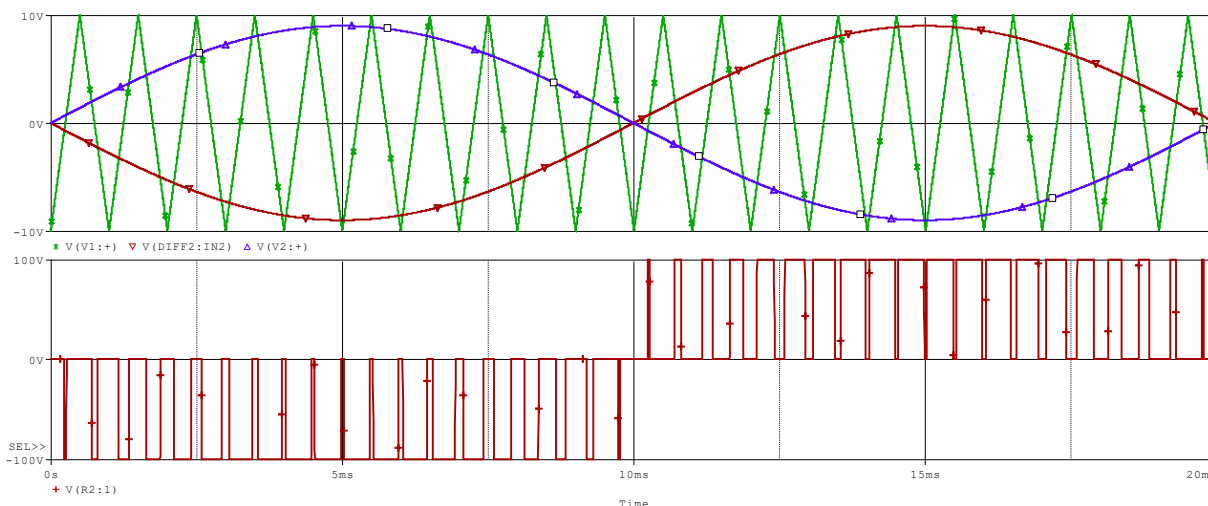


Figura 6.8 Produção de modulação PWM de 3 níveis, para inversor monofásico.

6.3.2.4 Inversor Trifásico PWM

Considerando o inversor trifásico mostrado na figura 6.3, são necessárias três referências, uma para cada fase. Para uma saída senoidal, serão três senoides na frequência desejada, com defasagem de 120° . Como em um sistema trifásico a soma das tensões é, a todo instante, nula, basta ter duas referências pois a terceira é calculada algebricamente. Cada referência é usada como na figura 6.6 para produzir sinais de comando complementares para os transistores de cada ramo. Quando se observa a tensão de linha, ou seja aquela que se tem entre duas fases, a forma de onda resultante é, “naturalmente” de três níveis, como mostra a figura 6.7.

6.3.3 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 6.9 mostra um arranjo típico.

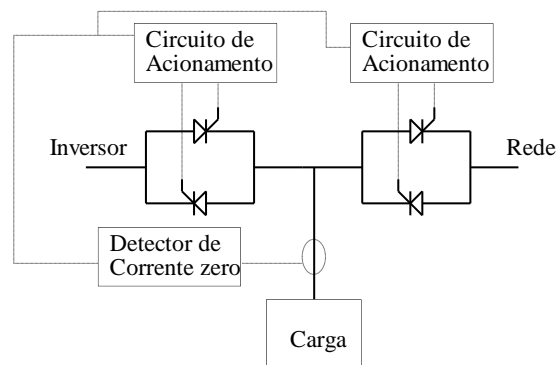


Figura 6.9. Sistema de acionamento de “by-pass”.

6.4 Referências Bibliográficas

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

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

J. A. Pomilio, “Conversores CC-CA Como Fontes de Alimentação com Frequência Fixa”, Apostila da disciplina IT302 – Eletrônica de Potência I, Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eltpot/cap6.pdf>

J. A. Pomilio, “Conversores CC/CA – Inversores”, Apostila da disciplina IT744, Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica”, Disponível em <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap5.pdf>