

3. TÉCNICAS DE MODULAÇÃO EM FONTES CHAVEADAS

O objetivo deste capítulo é descrever os principais métodos de comando dos conversores CC-CC, bem como identificar suas vantagens e limitações.

Tipicamente as fontes chaveadas operam a partir de uma fonte de tensão CC de valor fixo, enquanto na saída tem-se também uma tensão CC, mas de valor distinto (fixo ou não).

As chaves semicondutoras estão ou no estado bloqueado ou em plena condução. A tensão média de saída depende da relação entre o intervalo em que a chave permanece fechada e o período de chaveamento. Define-se ciclo de trabalho (largura de pulso ou razão cíclica) como a relação entre o intervalo de condução da chave e o período de chaveamento. Tomemos como exemplo a figura 3.1 na qual se mostra uma estrutura chamada abaixadora de tensão (ou “buck”).

Para este circuito, o papel do indutor e do capacitor é o de extrair o valor médio da tensão no diodo (v_o) e disponibilizar esta tensão com baixa ondulação na saída (V_o).

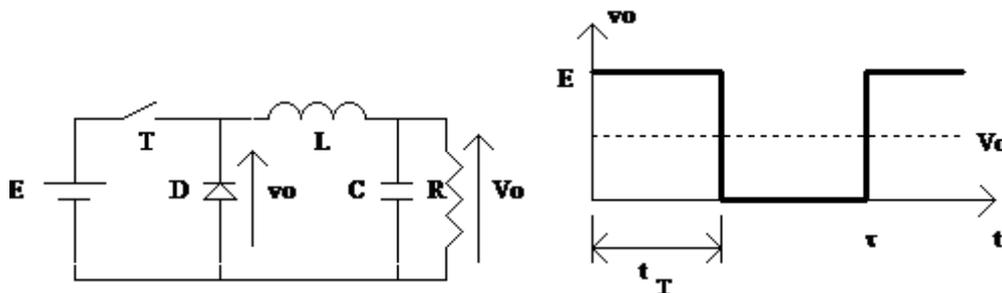


Figura 3.1 Conversor abaixador de tensão e forma de onda da tensão aplicada ao filtro de saída.

3.1 Modulação por Largura de Pulso - MLP (PWM – Pulse Width Modulation)

Em MLP opera-se com frequência constante, variando-se o tempo em que a chave permanece ligada.

O sinal de comando é obtido, de modo analógico, pela comparação de um sinal de controle (modulante) com uma onda periódica (portadora), por exemplo, uma onda "dente-de-serra". A figura 3.2 ilustra estas formas de onda. V_p é o valor de pico da onda triangular e v_c é a tensão de “controle”, ou seja, a que determina a largura de pulso na saída do comparador.

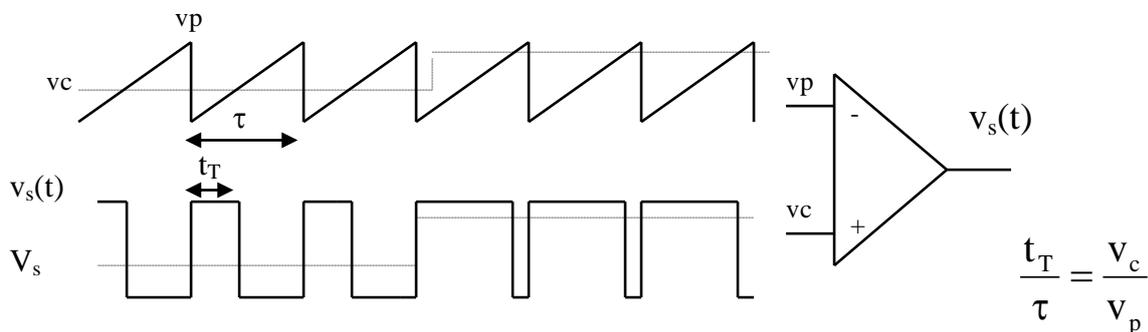


Figura 3.2 Modulação por Largura de Pulso.

A frequência da portadora deve ser pelo menos 10 vezes maior do que a modulante, de modo que seja relativamente fácil filtrar o valor médio do sinal modulado (MLP), recuperando

uma tensão média que seja proporcional ao sinal de controle. Para tanto é também necessário que a onda portadora tenha uma variação linear com o tempo (onda triangular).

Do ponto de vista do comportamento dinâmico do sistema (que será analisado em capítulos posteriores), a MLP comporta-se como um elemento linear quando se analisa a resposta do sistema tomando por base os valores médios da corrente e da tensão.

3.1.1 Espectro Harmônico de Sinal MLP

A figura 3.3 mostra formas de onda relativas à modulação MLP de um sinal de referência que apresenta um nível contínuo. A saída do comparador é uma tensão com dois níveis, na frequência da onda triangular. Na figura 3.4 tem-se o espectro desta onda MLP, onde se observa a presença de uma componente contínua que reproduz o sinal modulante. As demais componentes aparecem nos múltiplos da frequência da portadora sendo, em princípio, relativamente fáceis de filtrar dada sua alta frequência.

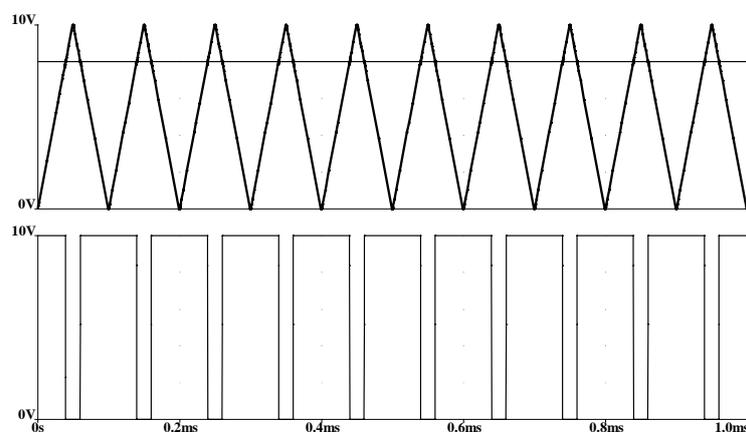


Figura 3.3 Modulação MLP de nível CC.

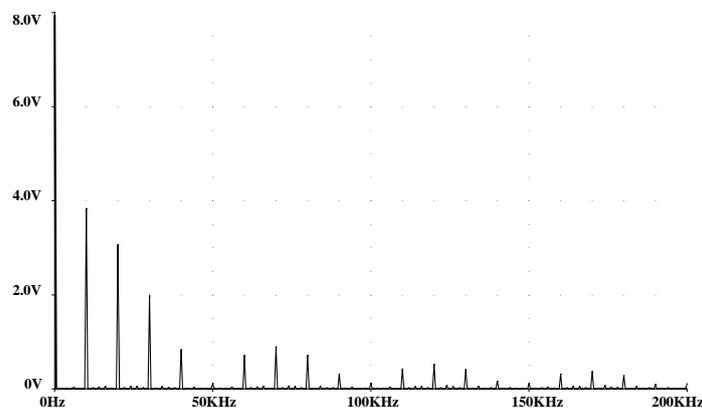


Figura 3.4 Espectro de sinal MLP.

3.2 Modulação por limites de corrente - MLC (Histerese)

Neste caso, são estabelecidos os limites máximo e/ou mínimo da corrente, fazendo-se o chaveamento em função de serem atingidos tais valores extremos. O valor instantâneo da corrente, em regime, é mantido sempre dentro dos limites estabelecidos e o conversor comporta-se como uma fonte de corrente.

Tanto a frequência como o ciclo de trabalho são variáveis, dependendo dos parâmetros do circuito e dos limites impostos. A figura 3.5 mostra as formas de onda para este tipo de controlador.

MLC só é possível em malha fechada, pois é necessário medir *instantaneamente* a variável de saída. Por esta razão, a relação entre o sinal de controle e a tensão média de saída é direta. Este tipo de modulação é usado, principalmente, em fontes com controle de corrente e que tenha um elemento de filtro indutivo na saída.

É um controle não linear e que garante a resposta mais rápida a um transitório de carga, de referência ou de entrada. Conforme ilustra a figura 3.5, caso ocorra uma diminuição na tensão de entrada, automaticamente se dá um ajuste no tempo de condução do transistor de modo que não há qualquer alteração na corrente média de saída e, portanto, na tensão de saída.

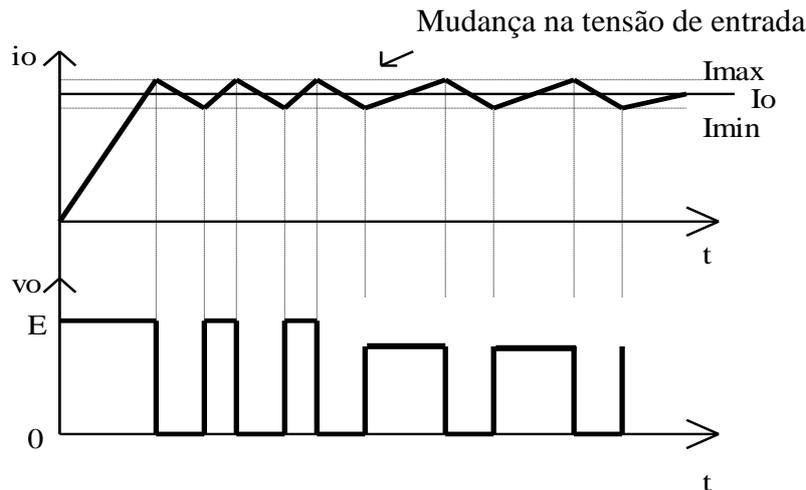


Figura 3.5 Formas de onda de corrente e da tensão instantânea na entrada do filtro de saída, com variação da tensão de entrada (ver figura 3.6).

A obtenção de um sinal MLC pode ser conseguida com o uso de um comparador com histerese, atuando a partir da realimentação do valor instantâneo da corrente. Caso a variável que se deseja controlar seja a tensão de saída, a referência de corrente é dada pelo erro desta tensão (através de um controlador tipo integral). A figura 3.6 ilustra este sistema de controle.

A frequência de comutação é variável e depende dos parâmetros do circuito. Existem algumas técnicas de estabilização da frequência, mas envolvem uma perda de precisão na corrente ou exigem um processamento digital.

A necessidade de realimentação do valor instantâneo da corrente torna o sistema sensível à presença dos ruídos de comutação presentes na corrente ou mesmo associados à interferência eletromagnética. Normalmente é preciso utilizar filtros na realimentação de corrente de modo a evitar comutações indesejadas.

Dado que a frequência de comutação é variável, o dimensionamento do filtro de saída deve ser feito para as condições de pior caso, ou seja, para o conjunto de parâmetros que leve à menor frequência de operação. Quando a frequência for superior a este valor a ondulação da tensão de saída se reduzirá.

Em princípio o controle por histerese poderia ser aplicado diretamente à tensão de saída. No entanto isto poderia causar sobre correntes excessivas em situações transitórias. Por exemplo, partindo de condições iniciais nulas, o transistor somente seria desligado quando o capacitor de saída atingisse a tensão desejada. Isto demandaria um longo intervalo de tempo, ocasionando um crescimento excessivo da corrente pelo transistor.

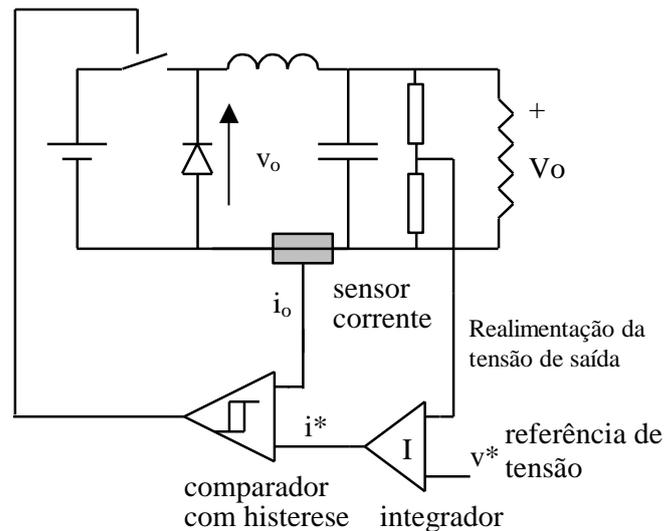


Figura 3.6 Controlador com histerese.

3.3 Outras técnicas não lineares de modulação

Outras formas de controle têm sido pesquisadas com o intuito de melhorar a resposta dinâmica do sistema, aumentar a margem de estabilidade, rejeitar mais eficientemente perturbações, etc. Estas novas técnicas utilizam, tipicamente, métodos não lineares e procuram aproveitar ao máximo as características também não lineares dos conversores.

3.3.1 Controle “One-cycle”

O controle “one-cycle” (Smedley, 1991 e Santi, 1993) permite o controle ciclo a ciclo da tensão de um conversor com saída CC, de modo que o sistema se torna praticamente imune a variações na alimentação e na carga. Opera com frequência constante e modulação da largura de pulso, mas o instante de comutação é determinado por uma integração da tensão que é aplicada ao estágio de saída do conversor.

A figura 3.7 mostra a estrutura básica para um conversor abaixador de tensão.

Uma vez que, em regime permanente, a tensão média numa indutância é nula, a tensão de saída, V_o , é igual à tensão média sobre o diodo. A tensão sobre o diodo, no entanto, variará entre praticamente zero (quando o componente conduz) e a tensão de alimentação. Seu valor médio, a cada ciclo de chaveamento, deve ser igual a V_o . Tal valor médio a cada ciclo é que é obtido pela integração de tal tensão.

O sinal integrado é comparado com a referência. Enquanto não atingi-la, a chave permanece ligada (tensão E aplicada sobre o diodo). Quando a tensão de referência é igualada, o capacitor do integrador é descarregado e o comparador muda de estado, desligando o transistor, até o início do ciclo seguinte, o qual é determinado pelo *clock*.

Observe que qualquer variação na referência, na tensão de entrada ou na carga afeta o intervalo de tempo que o transistor permanece conduzindo, mas sempre de maneira a manter a tensão média sobre o diodo igual ao valor determinado pela referência.

As limitações do método referem-se a não idealidades do circuito. Por exemplo, a queda de tensão devido à resistência do indutor aparecerá como um erro na tensão de saída, pois não pode ser compensada medindo-se a tensão instantânea no diodo. Para que a tensão de condução do diodo seja devidamente considerada, o *reset* do integrador deve ser muito rápido e o integrador deve atuar mesmo durante o intervalo em que o transistor está desligado.

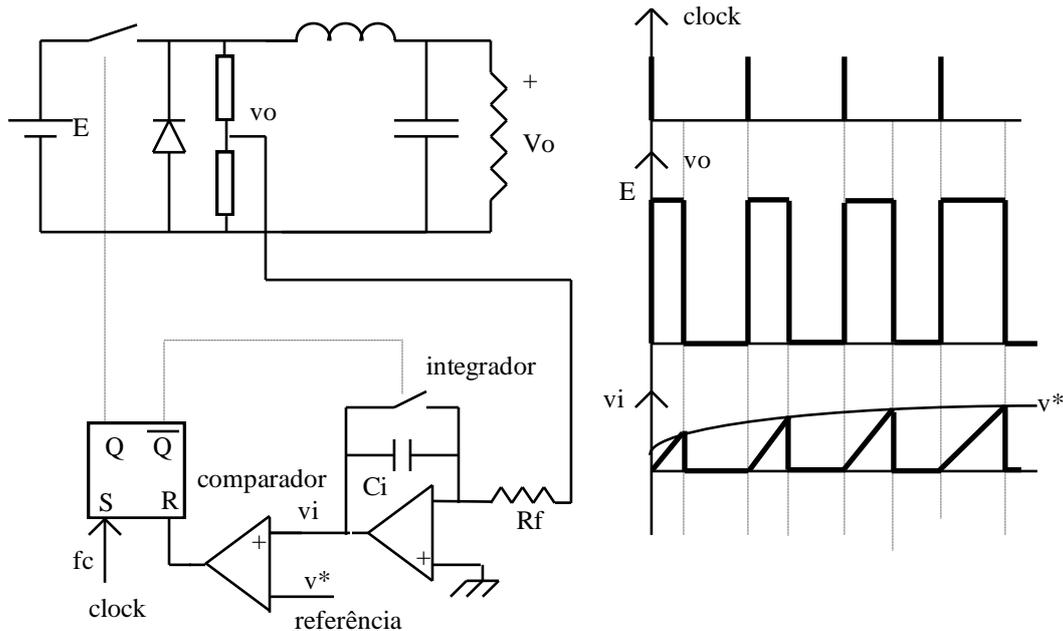


Figura 3.7 Controle “one-cycle” aplicado a conversor abaixador de tensão.

3.3.2 Controle de carga

O controle de carga (Tang, 1992) é semelhante ao controle “one-cycle”, sendo que o sinal integrado é a corrente de entrada do conversor (corrente no transistor, neste caso).

As formas de onda e o circuito são mostrados na figura 3.8.

Por realizar uma medida da carga injetada no circuito num certo intervalo de tempo, este tipo de controle equivale a um controlador de corrente, apresentando algumas vantagens adicionais, tais como: uma grande imunidade a ruído (uma vez que o sinal de corrente é integrado, e não tomado em seu valor instantâneo); não necessita de uma rampa externa para realizar a comparação (que é feita diretamente com a referência); comportamento antecipativo em relação a variações na tensão de entrada e na carga. A frequência é mantida constante pelo “clock”.

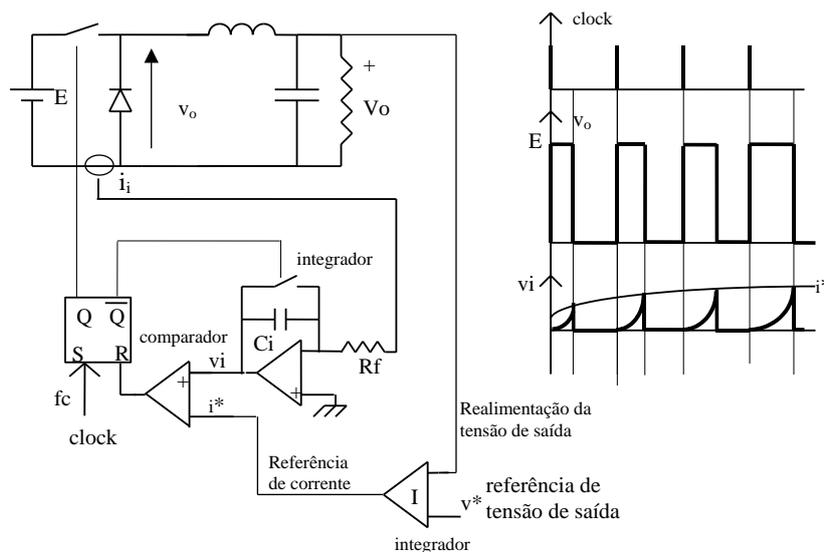


Figura 3.8 Controle de carga aplicado a conversor abaixador de tensão.

3.3.3 Modulação Delta

O sinal de referência é comparado diretamente com a saída modulada (e não a filtrada). O sinal de erro é integrado e a saída do integrador é comparada com zero. A saída do comparador é amostrada a uma dada frequência, f_c , e o sinal de saída do amostrador/segurador comanda a chave. A figura 3.9 mostra o sistema.

O estado da chave em cada intervalo entre 2 amostragens é determinado pelo sinal da integral do erro de tensão (no instante da amostragem). Deste modo os mínimos tempos de abertura e de fechamento são iguais ao período de amostragem. A robustez do controlador é seu ponto forte. O problema é que esta técnica de controle é intrinsecamente assíncrona, dificultando o projeto dos filtros.

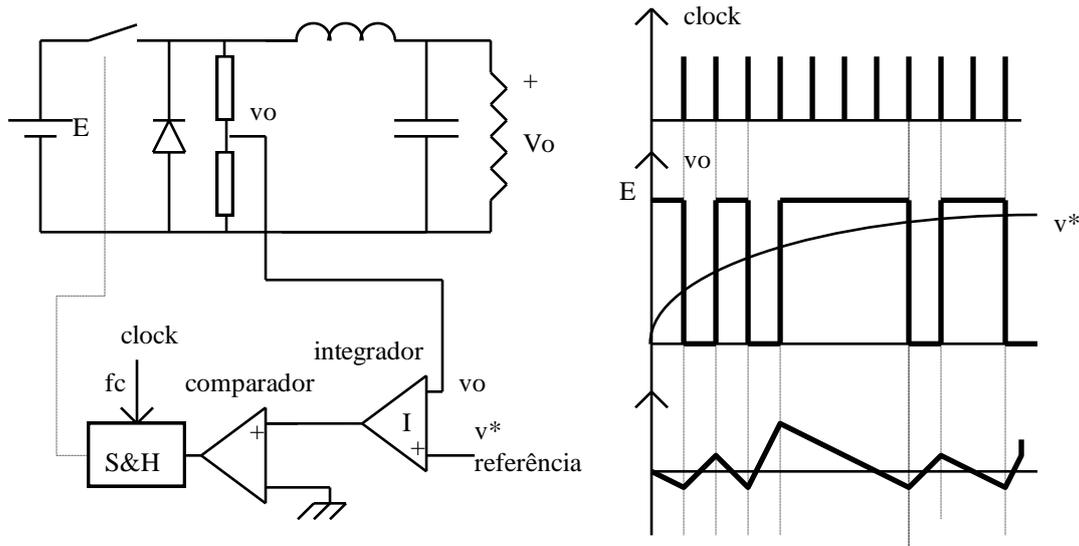


Figura 3.9. Controlador Delta.

3.4 Modulação em frequência - MF

Neste caso opera-se a partir de um pulso de largura fixa, cuja taxa de repetição é variável. A relação entre o sinal de controle e a tensão de saída é, em geral, não linear. Este tipo de modulação é utilizado, principalmente em conversores ressonantes. A figura 3.10 mostra um pulso de largura fixa modulado em frequência.

Um pulso modulado em frequência pode ser obtido, por exemplo, pelo uso de um monoestável acionado por meio de um VCO, cuja frequência seja determinada pelo sinal de controle.

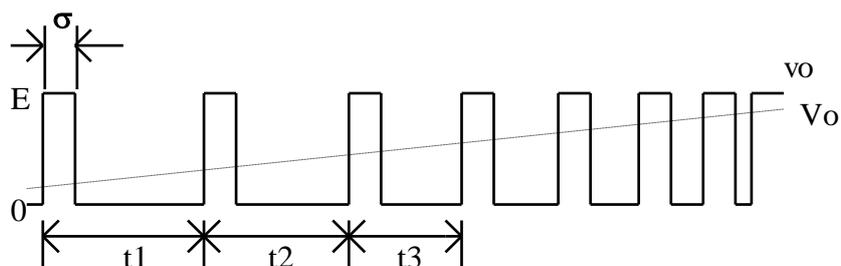


Figura 3.10 Pulso de largura σ modulado em frequência.

3.5 Modulação MLP com frequência de portadora variável

Uma alternativa que apresenta como vantagem o espalhamento do espectro é o uso de uma frequência de chaveamento não fixa, mas que varie, dentro de limites aceitáveis, de uma forma, idealmente, aleatória. Isto faz com que as componentes de alta frequência do espectro não estejam concentradas, mas apareçam em torno da frequência base, como se observa na figura 3.11. Note-se que o nível contínuo não sofre alteração, uma vez que ele independe da frequência de chaveamento.

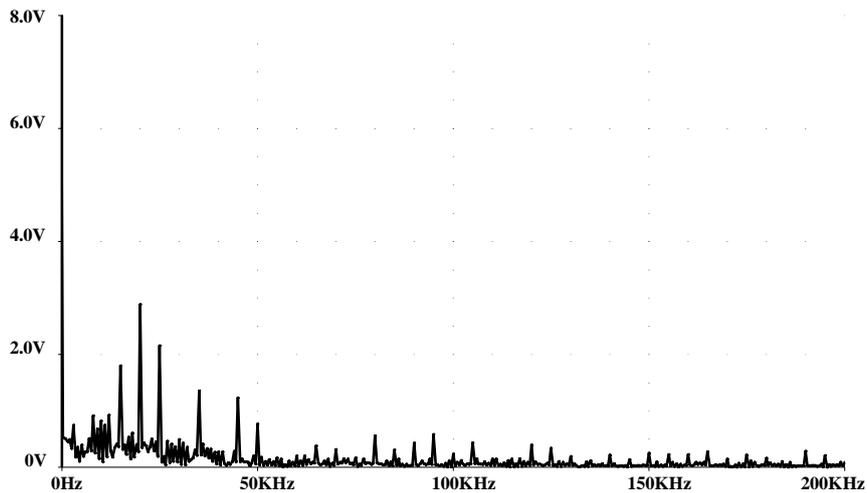


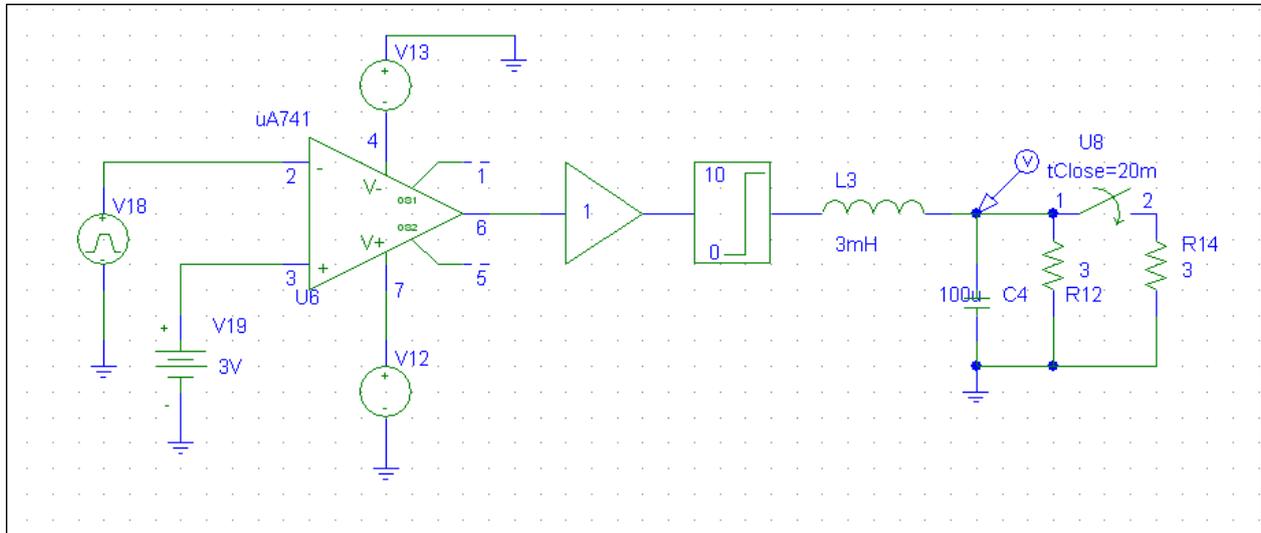
Figura 3.11. Espectro de sinal MLP com portadora de frequência variável.

3.6 Referências

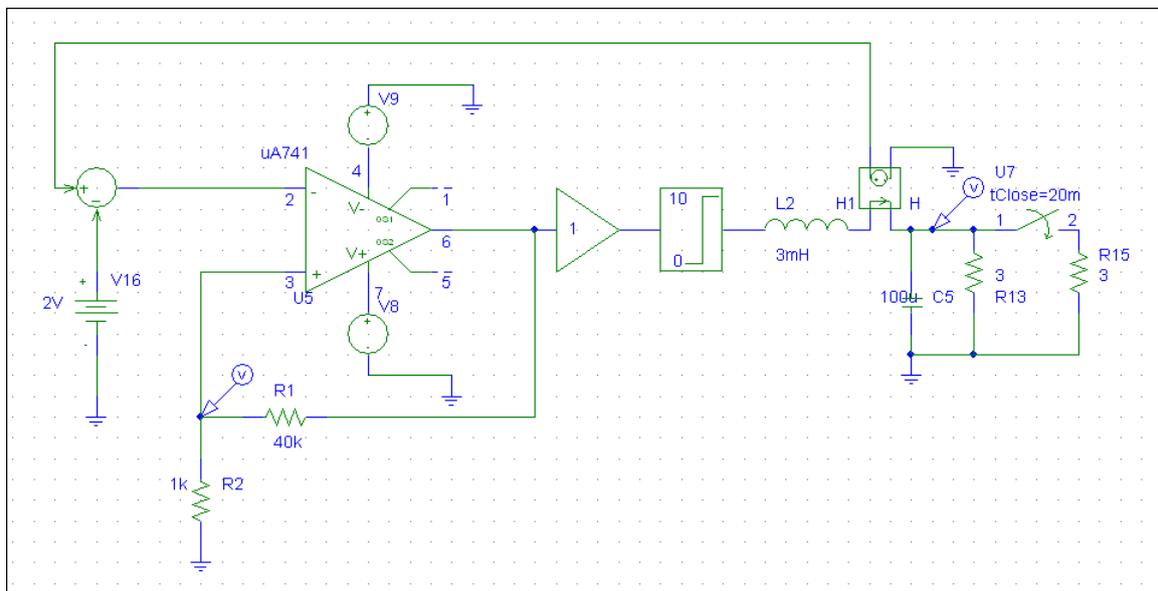
- K. M. Smedley and S. Cuk: "One-Cycle Control of Switching Converters". Proc. of PESC '91, pp. 888-896.
- E. Santi and S. Cuk: "Modeling of One-Cycle Controlled Switching Converters". Proc. of INTELEC '92, Washington, D.C., USA, Oct. 1993.
- W. Tang and F. C. Lee: "Charge Control: Modeling, Analysis and Design". Proc. of VPEC Seminar, 1992, Blacksbourg, USA.

3.7 Exercícios

1. Simule o circuito abaixo que se refere à aplicação de um sinal MLP a um filtro LC e carga resistiva. Observe o comportamento da corrente no indutor e da tensão de saída no transitório de partida (condições iniciais nulas) e quando ocorre a alteração na carga. A tensão de alimentação do operacional é de +/- 15V. A onda portadora é de 1 kHz, variando entre 0 e 5V.



2. Faça a simulação do circuito abaixo que realiza modulação por limites de corrente (histerese). Verifique o comportamento da corrente no indutor e da tensão de saída no transitório inicial (condições iniciais nulas) e quando ocorre a alteração na carga. Compare e comente as diferenças com os resultados MLP.



3. Analise comparativamente os espectros da tensão na saída do bloco limitador e da corrente no indutor.