

17

Capítulo

Conversores CC-CC Integrados

Meta deste capítulo

Estudar o princípio de funcionamento dos conversores cc-cc integrados.

objetivos

- Entender o funcionamento dos conversores cc-cc integrados;
- Analisar conversores cc-cc básicos integrados;
- Simular conversores cc-cc básicos integrados;
- Implementar conversores cc-cc básicos integrados.

Pré-requisitos

Ter estudado o capítulo referente ao princípio de funcionamento dos conversores cc-cc Buck, Boost e Buck-Boost.

Continuidade

O curso continuará com o estudo dos conversores operando em malha fechada.

1 Introdução

Nos capítulos anteriores foram estudados os conversores cc-cc Buck, Boost e Buck-Boost. Aqueles conversores não possuíam transformador, ou seja, não eram isolados. Neste capítulo serão apresentados alguns circuitos integrados utilizados para o desenvolvimento de conversores cc-cc.

Os circuitos integrados para conversores cc-cc foram desenvolvidos no século passado, mais especificamente nos anos 70 e 80 [1]. O primeiro circuito integrado desenhado especificamente para conversores chaveados foi o SG1524, feito realizado pelo Engenheiro Bob Mammano, na época pela empresa Silicon General [1]. Uma imagem deste circuito integrado é mostrada na Figura 1.

Na Figura 2 mostra-se o diagrama de blocos do circuito integrado SG1524. Após o lançamento de outros modelos deste circuito integrado, foram desenvolvidos os circuitos para controle dos conversores no modo corrente, sendo o UC1846 da Unitrode, hoje Texas Instruments. O diagrama de blocos deste componente é mostrado na Figura 3.

Em [1] é contada resumidamente a história dos circuitos primeiros circuitos integrado dedicados para conversores chaveados, seja cc-cc, como ca-cc e cc-ca. Atualmente existem inúmeros modelos de circuitos para conversores, especialmente para fontes chaveadas, para acionamento de motores, para correção de fator de potência, iluminação, dentre outras aplicações.

Assim, neste capítulo serão apresentados alguns circuitos integrados tipicamente utilizados para implementação de conversores cc-cc, detalhando-se o funcionamento do CI LM2575 da National Semiconductor, atualmente Texas Instruments.

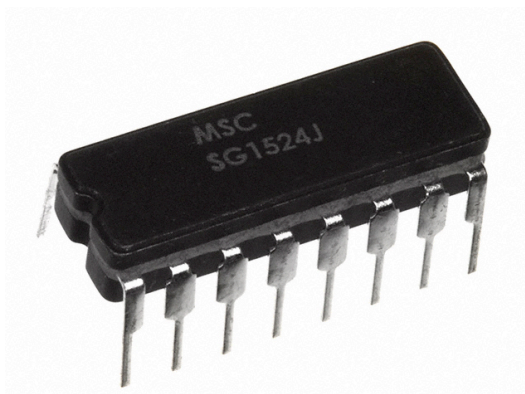


Figura 1 – Imagem do SG1524.

Fonte: www.digikey.com. Acesso em: 25/11/2014.

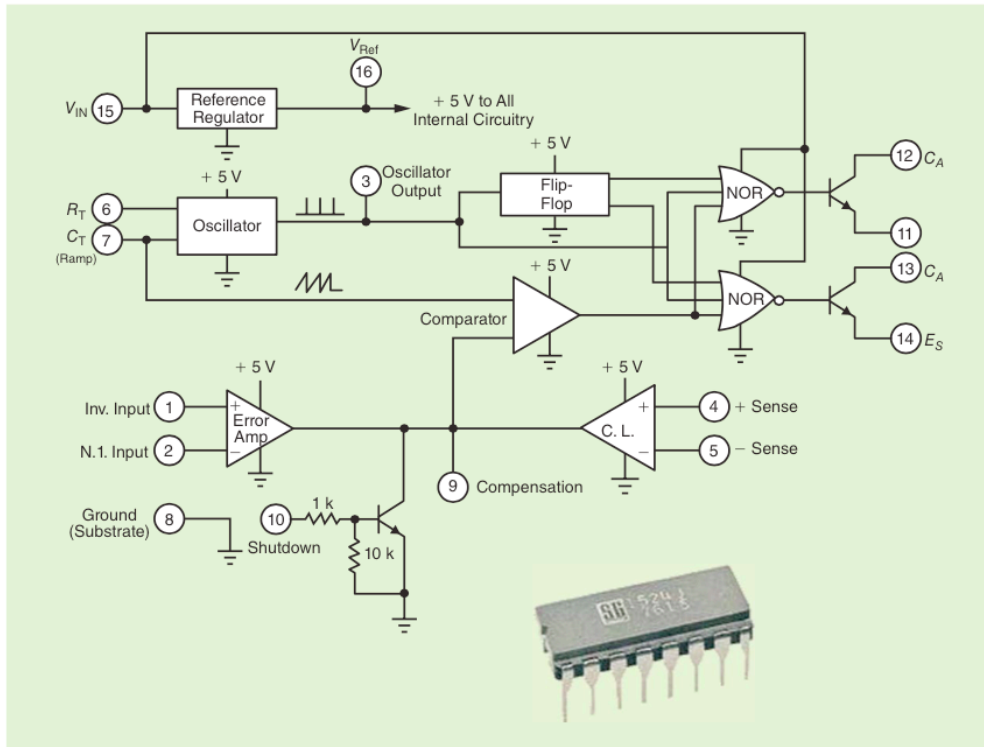


Figura 2 – Diagrama de blocos do SG1524 [1].

Fonte: www.ieee.org. Acesso em: 25/11/2014.

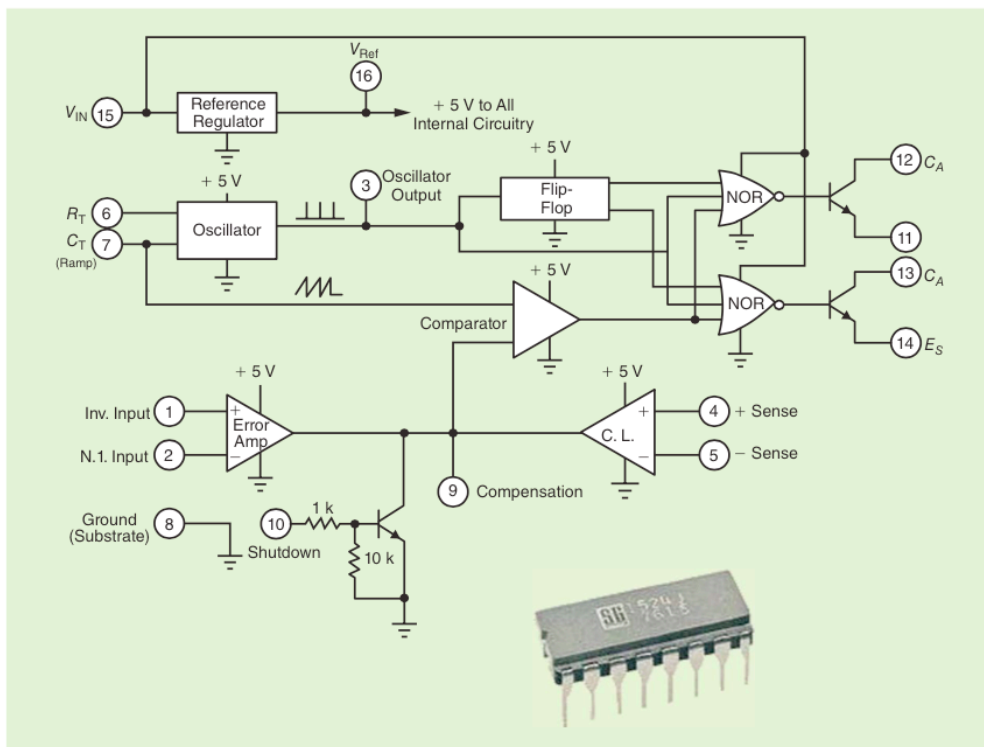


Figura 3 – Diagrama de blocos do UC1846 [1].

Fonte: www.ieee.org. Acesso em: 25/11/2014.

2 Circuito Integrado SG2524/SG3524

2.1 Introdução

O primeiro circuito integrado com modulação por largura de pulsos (PWM) para conversores cc-cc foi o SG1524. Atualmente a Texas Instruments produz o SG2524 e o SG3524, evoluções daquela primeira versão dos anos 70.

Estes circuitos integrados ainda são produzidos devido a sua versatilidade e facilidade de uso, podendo serem utilizados em conversores cc-cc isolados ou não, em ampla faixa de frequências de operação e tensão de alimentação.

2.2 Principais Características do SG2524/SG3524

As principais características ou parâmetros elétricos deste circuito integrado estão listadas a seguir:

- Tensão de alimentação: 8 a 40 V;
- Frequência de operação: até 450 kHz;
- Razão cíclica: 45% em cada saída;
- Comparador para proteção de sobrecorrente;
- Possibilidade de operação em malha aberta e em malha fechada;
- Partida suave.

2.3 Diagrama de Blocos do SG2524/SG3524

O diagrama de blocos do SG2524/SG3524 é mostrado na Figura 4. Nota-se que este circuito integrado apresenta um bloco de regulação interna de tensão, gerando uma tensão estabilizada no terminal 16. Possui a secção de conexão do resistor e capacitor para se determinar a frequência de oscilação, nos terminais 6 e 7. A partida suave é realizada pelo terminal 10, que também pode ser utilizado para habilitar e desabilitar as saídas. A limitação de corrente é realizada pelos terminais 4 e 5 do comparador, enquanto a operação em malha aberta e fechada é realizada pelos terminais 1, 2 e 9. As saídas são do tipo coletor e emissor aberto, tomadas nos terminais 11 e 12 e 13 e 14.

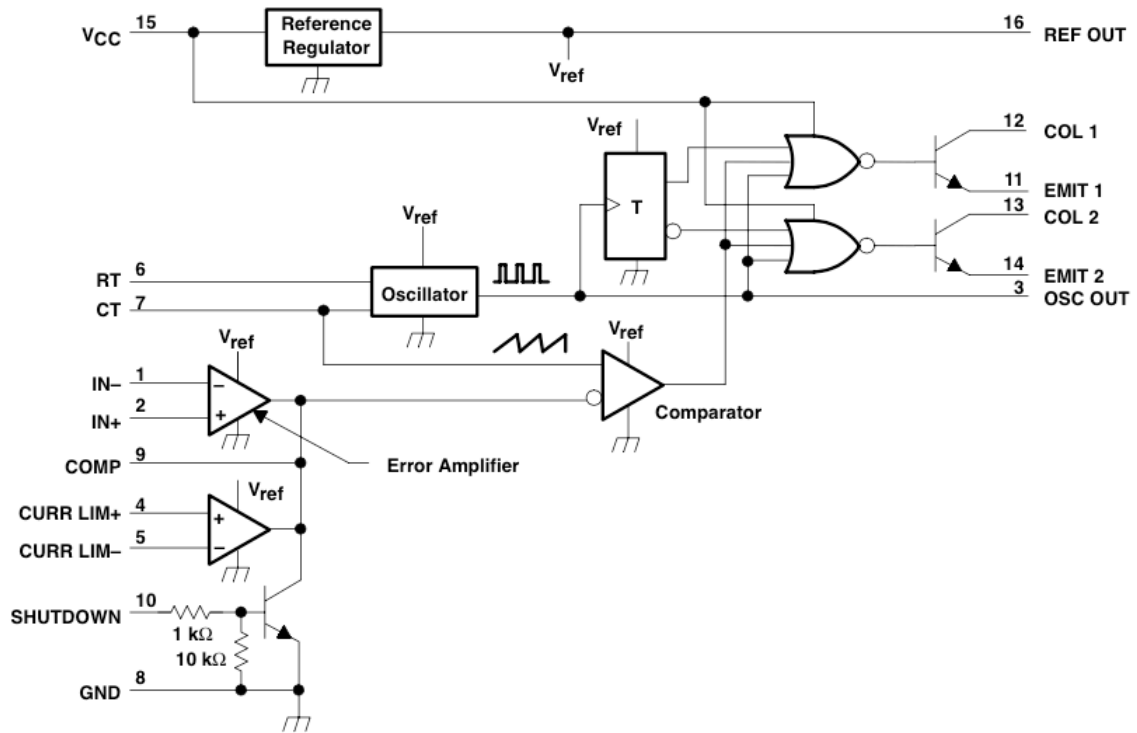


Figura 4 – Diagrama de blocos do SG2524/SG3524.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.

2.4 Detalhes de Operação do SG2524/SG3524

Em muitas aplicações, principalmente em fontes chaveadas, se opera o conversor com razão cíclica entre 0 e 50%. Assim, pode-se utilizar as duas saídas para se comandar chaves diferentes, com razão cíclica complementar, como no caso do conversor cc-cc Push-Pull, como está mostrado na Figura 5.

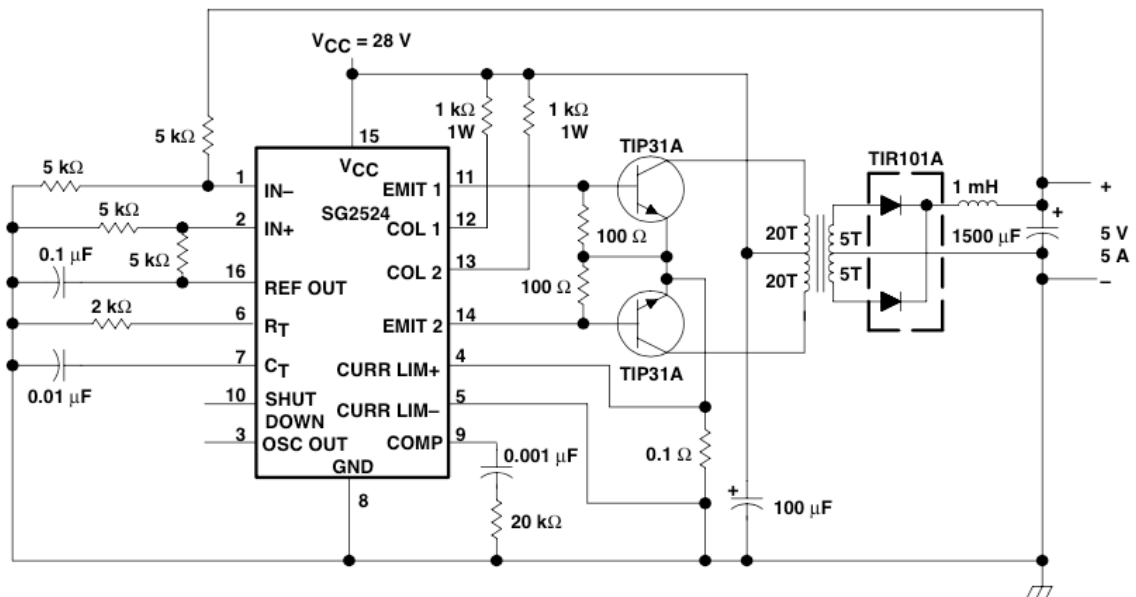


Figura 5 – Conversor Push-Pull implementado com o SG2524.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.

Em outros casos, pode ser necessário ajustar a razão cíclica de 0 até 100%. Neste caso pode-se conectar as duas saídas do CI em paralelo, como está mostrado na Figura 6.

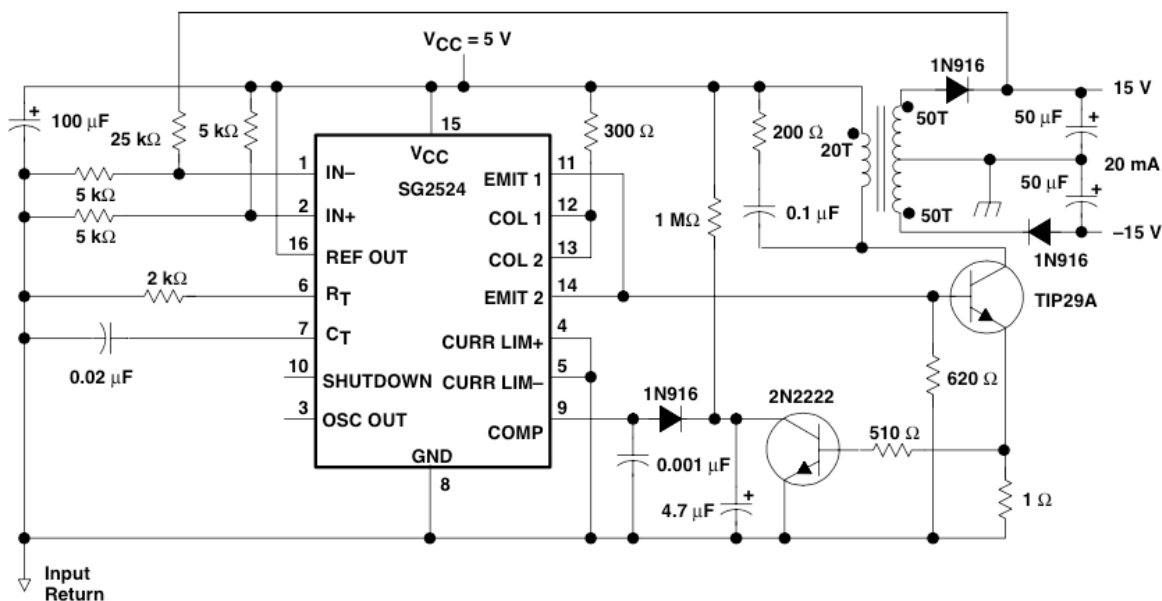


Figura 6 – Conexão das saídas do SG2524 em paralelo.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.

3 Circuito Integrado UC3527

3.1 Introdução

Os circuitos integrados UC1525A, UC1527A, UC2525A, UC2527A, UC3525A, e UC3527A são versões de melhor desempenho do que o SG3524, além de permitirem conexões diferentes em suas saídas. Possuem também conexões para sincronização, caso sejam utilizados diversos componentes em um mesmo conversor.

3.2 Principais Características do UC3525A/UC3527A

As principais características ou parâmetros elétricos deste circuito integrado estão listadas a seguir:

- Tensão de alimentação: 8 a 40 V;
- Frequência de operação: 100 a 450 kHz;
- Razão cíclica: 45% em cada saída;
- Sinais de comando: com sobreposição de sinais no UC3527;
- Comparador para proteção de sobrecorrente;
- Possibilidade de operação em malha aberta e em malha fechada;
- Partida suave.

3.3 Diagrama de Blocos do UC3525A/UC3527A

O diagrama de blocos do UC3525A/UC3527A é mostrado na Figura 7. Nota-se que este circuito integrado é semelhante ao SG3524, mas possui um terminal para descarga do capacitor do oscilador (7) e um terminal de sincronismo deste oscilador (3). Por sua vez, as saídas são com dois transistores, um para gerar o nível alto e outro para gerar o nível baixo. Deste modo, estas saídas não podem ser conectadas diretamente em paralelo, como foi feito na Figura 8. Para tal deve-se utilizar diodos de bloqueio em cada uma, como mostrado na Figura 8.

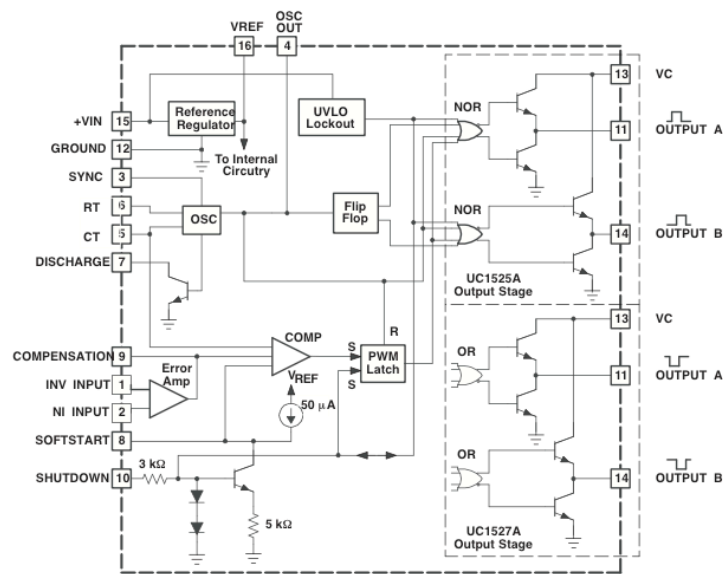


Figura 7 – Diagrama de blocos do UC3525A/UC3527A.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.

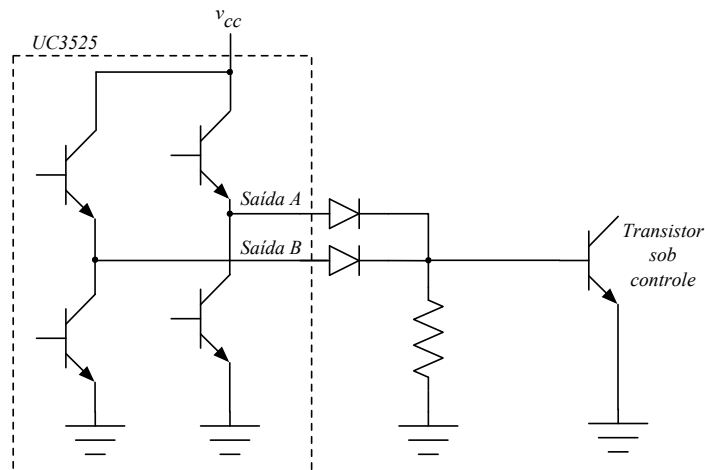


Figura 8 – Conexão das saídas do UC3525 em paralelo.

Pela Figura 9 pode-se verificar que este circuito integrado possui poucos terminais, sendo que o terminal 2 é para alimentação externa do mesmo, se for desejado. O terminal 3 é de realimentação, para o circuito de controle do conversor. Percebe-se que as funções necessárias para a geração do sinal de comando do MOSFET são realizadas internamente, facilitando o uso do circuito integrado.

5 Circuito Integrado VIPER22A

5.1 Introdução

A exemplo da série de circuitos integrados FSQ500 da Fairchild Semiconductor, o integrado VIPER22A da ST também foi desenvolvido para aplicações em fontes chaveadas. Este componente possui funcionalidades semelhantes ao FSQ500N.

5.2 Principais Características do VIPER22A

As principais características ou parâmetros elétricos deste circuito integrado estão listadas a seguir:

- Tensão de alimentação: 9 até 38 V;
- Frequência de operação: 60 kHz;
- Transistor de potência, do tipo MOSFET integrado;
- Tensão do MOSFET: 730 V;
- Resistência do MOSFET: 15 a 31 Ω ;
- Proteção de corrente;
- Proteção de temperatura.

5.3 Diagrama de Blocos do VIPER22A

O diagrama de blocos do VIPER22A é mostrado na Figura 10. Pela figura pode-se verificar que este circuito integrado possui poucos terminais, sendo que o terminal VDD é para alimentação externa do mesmo, se for desejado. O terminal FB é de realimentação, para o circuito de controle do conversor. Percebe-se que as funções necessárias para a geração do sinal de comando do MOSFET, proteção de sobrecorrente e sobretemperatura são realizadas internamente, facilitando o uso do circuito integrado.

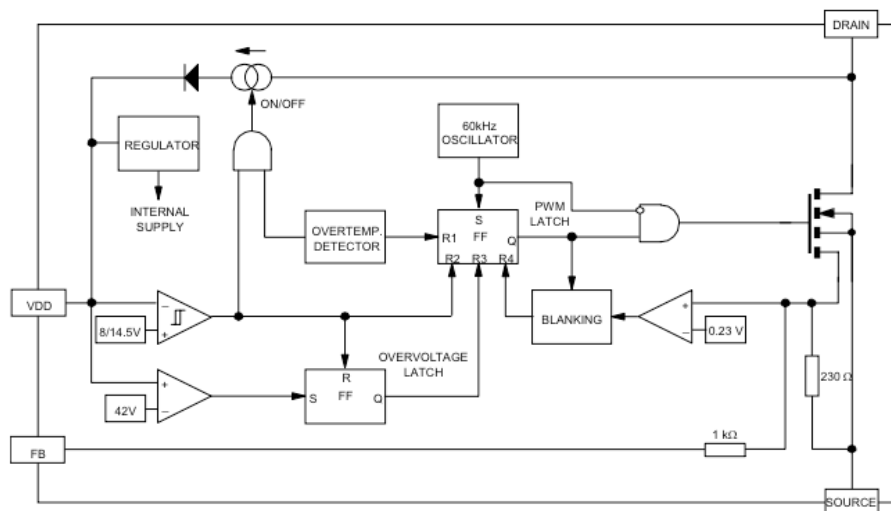


Figura 10 – Diagrama de blocos do VIPER22A.

Fonte: www.st.com. Acesso em: 25/11/2014.

6 Circuito Integrado LM2575

6.1 Introdução

O circuito integrado LM2575, inicialmente desenvolvido e produzido pela National Semiconductor, agora Texas Instruments, é um regulador chaveado, facilmente utilizado em circuitos reguladores de tensão, semelhantes aos lineares, da família LM78xx.

Por ser um componente simples de utilizar, dispensando um projeto complexo, o mesmo é amplamente utilizado para a construção de conversores cc-cc, normalmente abaixadores de tensão. Por sua vez, o circuito integrado LM2577 é utilizado para a implementação de conversores cc-cc elevadores de tensão.

6.2 Principais Características do LM2575

As principais características ou parâmetros elétricos deste circuito integrado estão listadas a seguir:

- Tensão de operação: até 40 V na versão padrão e 60 V na versão HV;
- Frequência de operação: 52 kHz;
- Transistor de potência integrado;
- Versões com tensão fixa de 3,3, 5, 12 e 15 V e versão com tensão ajustável de saída;
- Corrente de saída de 1 A;
- Proteção de corrente;
- Proteção de temperatura.

6.3 Diagrama de Blocos do LM2575

O diagrama de blocos do LM2575 é mostrado na Figura 11. Nota-se pela figura que este circuito integrado possui um terminal de habilitação e desabilitação (5), um terminal de realimentação (4), além do terminal de entrada (1) e saída (2). Percebe-se pela figura que naturalmente este circuito integrado é utilizado para se implementar conversores do tipo Buck.

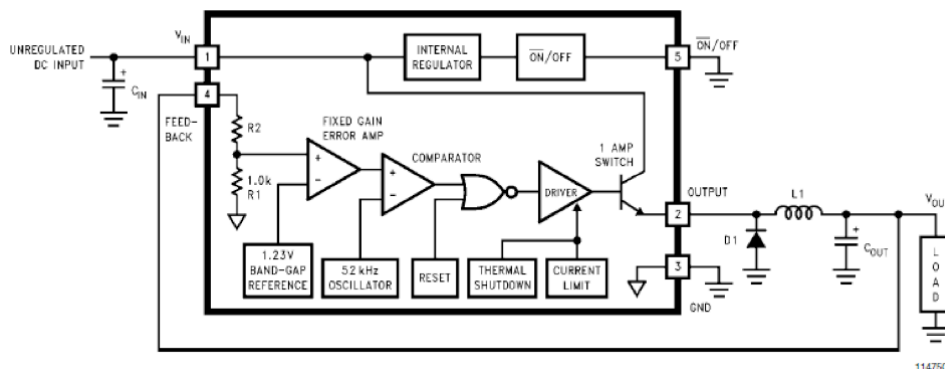


Figura 11 – Diagrama de blocos do LM2575.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.

6.4 Operação do LM2575 com Tensão de Saída Fixa

A operação do LM2575 com tensão de saída fixa é realizada com a montagem mostrada na Figura 11. Neste caso o terminal de realimentação (4) é conectado diretamente na saída, sendo que esta será determinada pelo modelo do circuito integrado utilizado.

Observe na Figura 11 que é necessário adicionar o diodo de roda-livre do conversor Buck, além do indutor e capacitor para o filtro de saída. Também é aconselhável a conexão de um capacitor na entrada, para desacoplamento de indutâncias parasitas.

Ao desenhar a placa de circuito impresso do conversor, será necessário atentar para as indutâncias parasitas das trilhas, que podem provocar sobretensões sobre os semicondutores do circuito. Assim, na Figura 12 mostram-se as conexões dos componentes externos ao LM2575, ressaltando as distâncias que devem ser minimizadas.

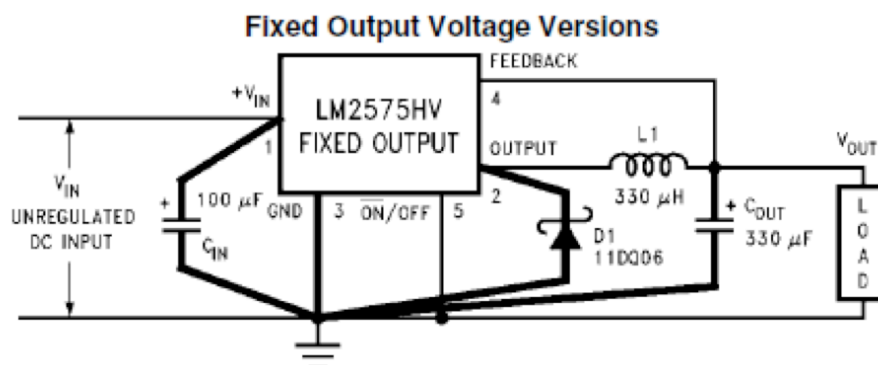


Figura 12 – Cuidados ao desenhar a placa de circuito impresso.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.

Note que o capacitor de desacoplamento da entrada é conectado o mais próximo possível do circuito integrado, o que também é feito com o diodo de roda-livre. Por sua vez, as conexões para a referência (terra do circuito) devem ter um ponto de conexão em comum, o que pode ser conseguido usando malha de terra no layout da placa de circuito impresso.

Os elementos do circuito da Figura 11 são determinados conforme foi estudado no capítulo referente ao conversor Buck. No entanto, o fabricante do circuito integrado auxilia o usuário na escolha dos valores dos principais componentes.

Inicialmente deve ser determinado o próprio circuito integrado para a tensão de saída desejada, entre 3,3 V, 5 V, 12 V ou 15 V. A especificação para alta tensão (HV) dependerá do valor da tensão de entrada. Até 40 V será o modelo padrão e acima disto até 60 V será o modelo para alta tensão (HV).

A seguir, para o capacitor de entrada (C_{IN}) recomenda-se utilizar capacitores eletrolíticos entre 47 e 100 μF . O capacitor de saída, considerando uma ondulação de tensão da ordem 1%, poderá ter seu valor entre 100 e 470 μF .

O indutor pode ser determinado com auxílio de gráficos apresentados na folha de dados do fabricante, variando de 100 até 2200 μH .

Finalmente, o diodo deve ter capacidade de corrente e tensão compatíveis com o circuito e ser rápido, preferencialmente com recuperação suave.

6.5 Operação do LM2575 com Tensão de Saída Ajustável

A operação do LM2575 com tensão de saída ajustável é realizada com a montagem mostrada na Figura 13. Neste caso o terminal de realimentação (4) é conectado à saída por intermédio de um divisor resistivo, que, neste caso, determinará a tensão de saída pela expressão a seguir.

$$V_o = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Onde:

- V_{ref} – tensão de referência de 1,23 V;
- R_1 – resistor do divisor resistivo com valores entre 1 k Ω e 5 k Ω ;
- R_2 – determinado conforme a tensão de saída desejada.

Do mesmo modo que no conversor com tensão de saída fixa, também no conversor com saída ajustável será necessário adicionar o diodo de roda-livre e o indutor e capacitor de filtro. Na **Error! Reference source not found.** mostram-se novamente as conexões para minimizar as indutâncias parasitas das trilhas, ao se desenhar a placa de circuito impresso.

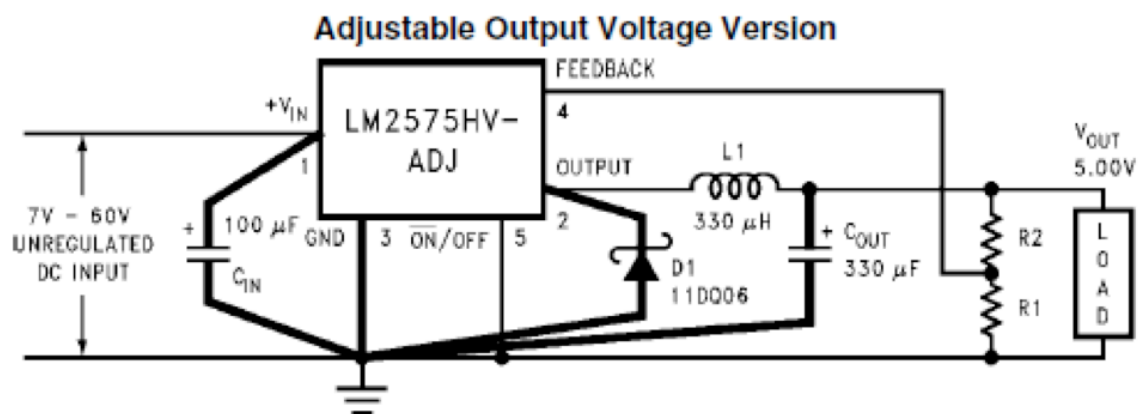


Figura 13 – Operação do LM2575 com saída ajustável.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.

O procedimento de projeto dos elementos do conversor com saída ajustável é distinto ao do conversor com saída fixa. O divisor resistivo deve ser determinado em função da tensão de saída desejada, podendo-se empregar a expressão abaixo:

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right).$$

O indutor é determinado com auxílio da expressão a seguir, consultando-se o ábaco da folha de dados do componente. A frequência deve ser inserida em kHz e as tensões em V.

$$E \cdot T = (V_{in} - V_{out}) \cdot \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \cdot \left(\frac{1000}{F_s} \right) [V \cdot \mu s].$$

Por fim, o capacitor é determinado pela expressão abaixo, onde a indutância será inserida em μH e as tensões em V.

$$C_{out} \geq 7785 \cdot \left(\frac{V_{in_max}}{V_{out} \cdot L} \right) [\mu F].$$

6.6 Conversores Comerciais com o LM2575 e LM2577

Anteriormente comentou-se que o LM2577 é similar ao LM2575, mas que é indicado para conversores elevadores de tensão, ou seja, do tipo Boost. Na Figura 14 mostra-se o diagrama de blocos do LM2575, o que possui internamente um transistor NPN com capacidade para 3 A e 65 V.

Exemplos de conversores comerciais que empregam o LM2575 e LM2577 são mostrados nas Figura 15 e Figura 16.

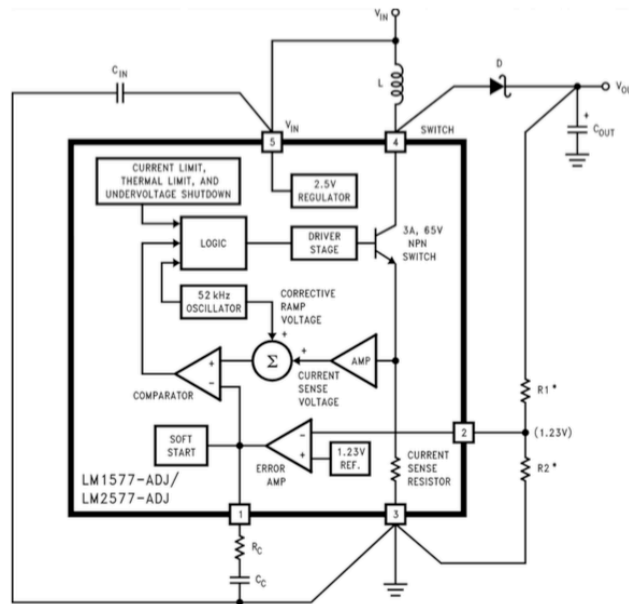


Figura 14 – Diagrama de blocos do LM2577.

Fonte: www.ti.com. Acesso em: 25/11/2014.



Figura 15 – Conversor cc-cc abaixador com LM2575.

Fonte: www.ebay.com. Acesso em: 25/11/2014.



Figura 16 – Conversor cc-cc elevador com LM2577.

Fonte: www.prodctodc.com. Acesso em: 25/11/2014.

7 Circuito Integrado BTS410

7.1 Introdução

O circuito integrado BTS410, da série PROFET, da Infineon, é definido pelo fabricante como uma chave inteligente, que pode ser empregada para ligar e desligar circuitos, além de se implementar conversores simples com a mesma.

7.2 Principais Características do BTS410

As principais características ou parâmetros elétricos deste circuito integrado estão listadas a seguir:

- Tensão de alimentação: 4,7 até 42 V;
- Frequência de operação: 60 kHz;
- Transistor de potência, do tipo MOSFET integrado;
- Tensão do MOSFET: 65 V;
- Resistência do MOSFET: 220 m Ω ;
- Proteção de sobrecorrente;
- Proteção de sobretensão;
- Proteção de temperatura.

7.3 Diagrama de Blocos do BTS410

O diagrama de blocos do BTS410 é mostrado na Figura 17. Pela figura pode-se verificar que este circuito integrado possui cinco terminais, sendo que o terminal Vbb a entrada de tensão, que também serve de alimentação ao CI. O terminal 5 é a saída do circuito, o terminal 2 é a entrada de sinal (PWM) e o terminal 4 é indica se ocorreu falha, ou seja, atuação de alguma das proteções do circuito integrado.

É importante destacar que o circuito integrado BTS410 tem tempos de comutação grandes, da ordem de 100 μ s, o que limita sua frequência máxima de operação.

Neste sentido, sugere-se utilizar este circuito integrado para fins didáticos ou em circuitos de proteção, ou para ligar e desligar outros circuitos, dentre outras aplicações compatíveis com as características deste componente.

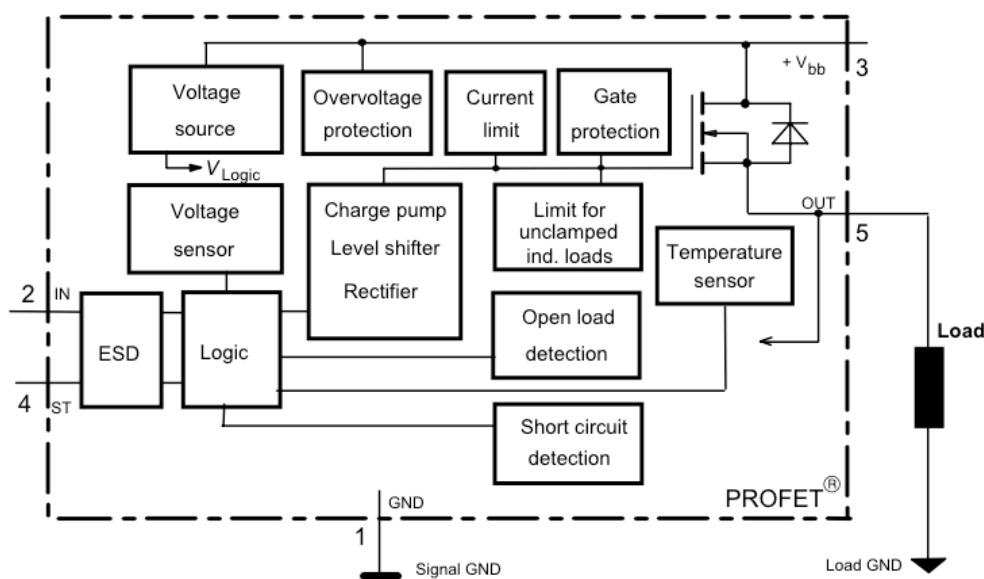


Figura 17 – Diagrama de blocos do BTS410.

Fonte: www.infineon.com. Acesso em: 25/11/2014.

8 Simulação dos Conversores em Estudo

O conversor cc-cc Flyback será simulado utilizando os softwares Psim e Multisim. Inicialmente será realizada uma simulação considerando componentes ideais, para fins de verificação das expressões teóricas apresentadas. A seguir será realizada uma simulação com componentes reais, visando a verificação das diferenças apresentadas em relação à simulação ideal.

8.1 Simulação do Circuito com Componentes Ideais

O circuito simulado no Psim está mostrado na Figura 18, com as mesmas características do problema apresentado no início deste capítulo. Note que os componentes são ideais, ou seja, genéricos, não se utilizando algum modelo específico de chave. A fonte é para 25 V (médios). A carga possui uma resistência de 5 Ω . O tempo de simulação pode ser de 5 ms e passo de cálculo de 0,0001 ms (0,1 μ s). Note que a frequência de comutação é de 40 kHz e a razão cíclica máxima é de 40%. O elemento ON1 é utilizado pelo Psim para comandar interruptores, equivalente a um driver de acionamento do interruptor. A indutância de magnetização é de 188 μ H e o capacitor é de 22 μ F.

Os dados do transformador são aqueles calculados no Exercício Resolvido 2 (ER 02) do capítulo anterior, usando-se uma queda de tensão no diodo de 1 V. A chave (S_1) é ideal.

As formas de onda das principais variáveis do circuito estão mostradas nas Figura 19 e na Figura 20. Na Figura 19 tem-se as formas de onda durante o transitório de partida do conversor. Já na Figura 20 mostram-se as formas de onda para o circuito operando em regime permanente. Mostram-se as tensões de entrada, saída, no primário e secundário do transformador e de comando

(PWM) do interruptor, além da corrente no primário e da saída. Os valores calculados e simulados são mostrados na Tabela 1, onde nota-se que os mesmos condizem entre si, com pequenas diferenças, principalmente devido a estimativa de perdas da ordem de 25%, o que na simulação ocorreu de modo diferente, ficando em torno de 31%.

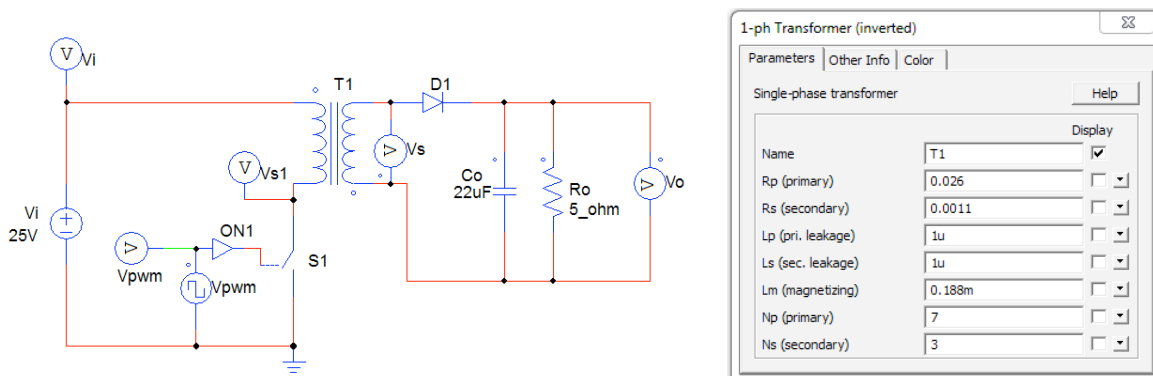


Figura 18 – Circuito simulado no Psim e parâmetros do transformador.

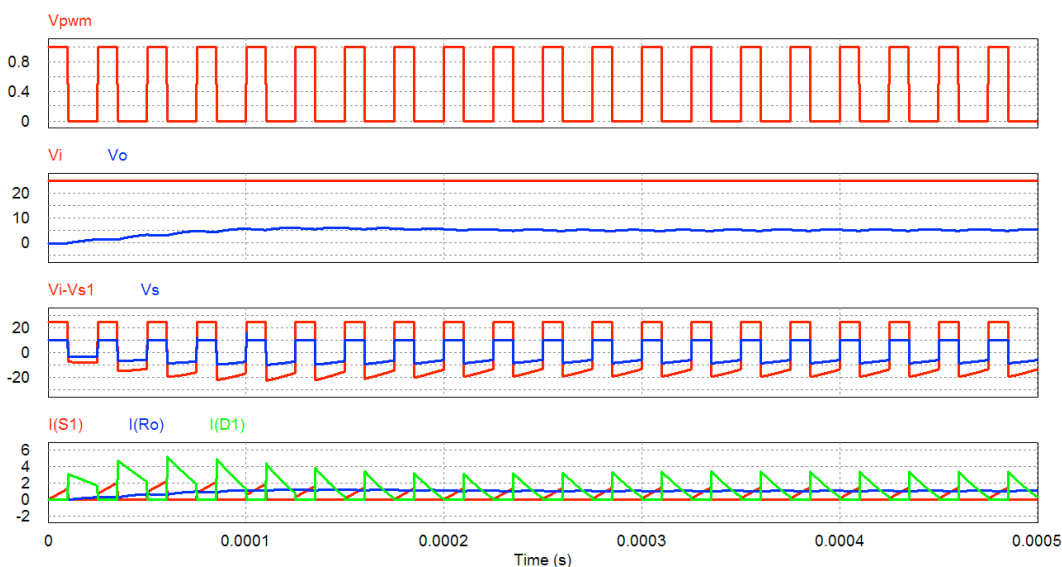


Figura 19 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Flyback com componentes ideais.

Tabela 1 – Resultados para conversor cc-cc Flyback com componentes ideais.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	5 V	5,27 V
ΔV_{Co}	Ondulação de tensão na carga	0,45 V	0,54 V
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	1 A	1,054 A
P_o	Potência na saída	5 W	5,57 W
P_i	Potência na entrada	6,7 W	8 W
η	Rendimento	$\approx 75\%$	$\approx 69\%$
$I_{i(avg)}$	Corrente média na fonte	0,27 A	0,32 A
$I_{p(max)}$	Corrente máxima no primário	1,33 A	1,46 A
$I_{p(avg)}$	Corrente média no primário	0,27 A	0,32 A
$I_{p(ef)}$	Corrente eficaz no primário	0,48 A	0,56 A
$I_{s(max)}$	Corrente máxima no secundário	3,69 A	3,37 A
$I_{s(avg)}$	Corrente média no secundário	1 A	1,047 A

$I_{s(ef)}$	Corrente eficaz no secundário	1,65 A	1,52 A
$I_{Co(max)}$	Corrente máxima no capacitor	2,69 A	2,38 A
$I_{Co(ef)}$	Corrente eficaz no capacitor	1,31 A	1,097 A
$I_{S1(max)}$	Corrente máxima na chave	1,33 A	1,46 A
$I_{S1(avg)}$	Corrente média na chave	0,27 A	0,32 A
$I_{S1(ef)}$	Corrente eficaz na chave	0,48 A	0,56 A
$I_{D1(max)}$	Corrente máxima no diodo	3,69 A	3,37 A
$I_{D1(avg)}$	Corrente média no diodo	1 A	1,047 A
$I_{D1(ef)}$	Corrente eficaz no diodo	1,65 A	1,52 A
$V_{S1(max)}$	Tensão máxima sobre a chave	38,9 V	44,3 V
$V_{D1(max)}$	Tensão máxima sobre o diodo	14 V	13,2 V

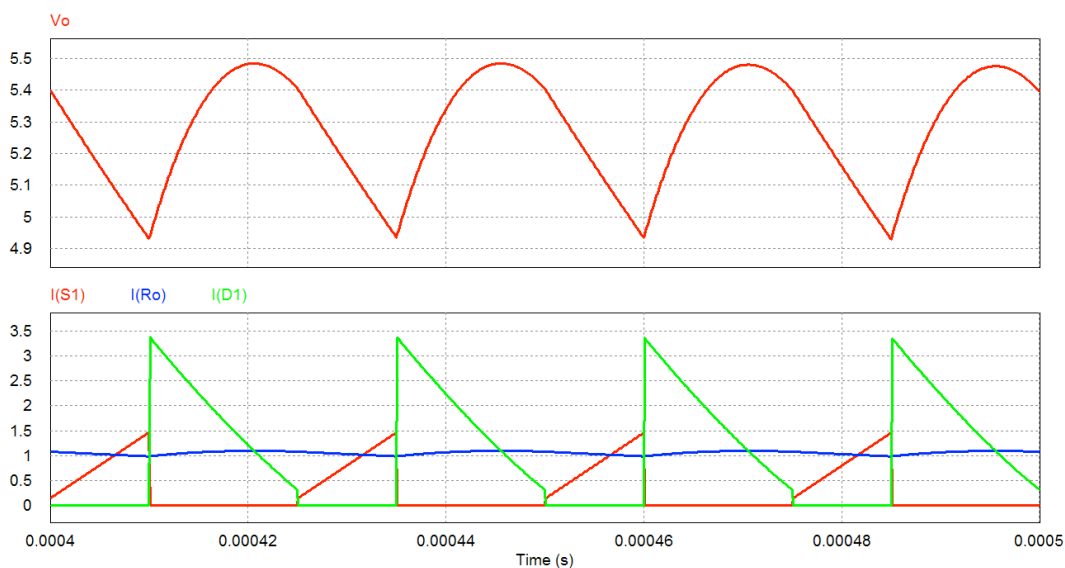


Figura 20 – Principais formas de onda do conversor cc-cc Flyback com componentes ideais.

8.2 Simulação do Circuito com Componentes Reais

O circuito simulado no Multisim está mostrado na Figura 21. Note que os componentes são reais, ou seja, o interruptor possui um modelo específico para o circuito, que é o MTD6N15T4G. A fonte é para 12 V (médios). A carga possui uma resistência de 2 Ω . O tempo de simulação pode ser de 5 ms e passo de cálculo de 0,0001 ms (0,1 μ s). Note que a frequência de comutação é de 40 kHz e a razão cíclica é de 40%. A indutância do primário é de 188 μ H e o capacitor é de 22 μ F. No circuito da Figura 21 conectou-se a saída na mesma referência da tensão de entrada visando facilitar a simulação.

As formas de onda da tensão na entrada, tensão na saída e tensão sobre a chave são mostradas na Figura 22. As formas de onda das principais correntes no circuito são mostradas na Figura 23.

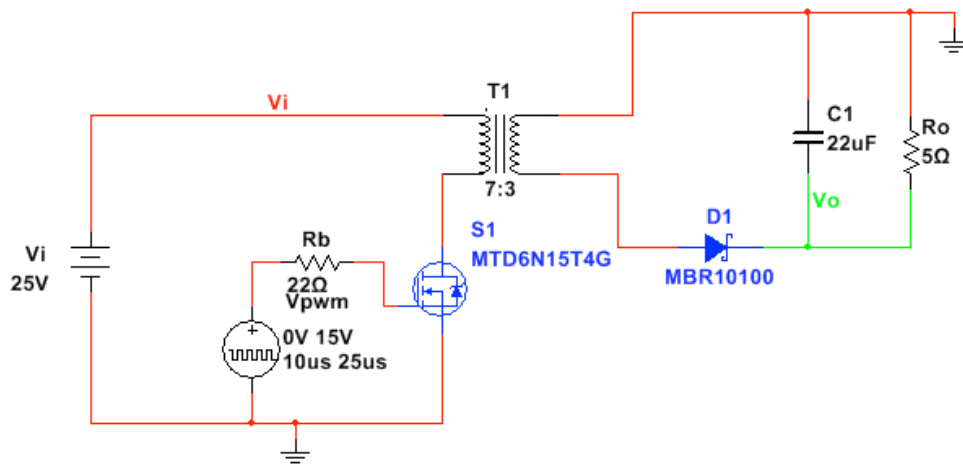


Figura 21 – Circuito simulado no Multisim.

Tabela 2 – Resultados para conversor cc-cc Flyback om componentes reais.

Variável	Descrição	Valor calculado	Valor simulado
$V_{o(avg)}$	Tensão média na carga	5 V	6,72 V
ΔV_{Co}	Ondulação de tensão na carga	0,45 V	0,65 V
$I_{o(avg)}$	Corrente média na carga	1 A	1,3 A
P_o	Potência na saída	5 W	8,74 W
P_i	Potência na entrada	6,7 W	9,75 W
η	Rendimento	$\approx 75\%$	$\approx 89,6\%$
$I_{i(avg)}$	Corrente média na fonte	0,27 A	0,39 A
$I_{p(max)}$	Corrente máxima no primário	1,33 A	1,59 A
$I_{p(avg)}$	Corrente média no primário	0,27 A	0,39 A
$I_{p(ef)}$	Corrente eficaz no primário	0,48 A	0,66 A
$I_{s(max)}$	Corrente máxima no secundário	3,69 A	3,68 A
$I_{s(avg)}$	Corrente média no secundário	1 A	1,3 A
$I_{s(ef)}$	Corrente eficaz no secundário	1,65 A	1,78 A
$I_{Co(max)}$	Corrente máxima no capacitor	2,69 A	2,47 A
$I_{Co(ef)}$	Corrente eficaz no capacitor	1,31 A	1 A
$I_{S1(max)}$	Corrente máxima na chave	1,33 A	1,59 A
$I_{S1(avg)}$	Corrente média na chave	0,27 A	0,39 A
$I_{S1(ef)}$	Corrente eficaz na chave	0,48 A	0,66 A
$I_{D1(max)}$	Corrente máxima no diodo	3,69 A	3,68 A
$I_{D1(avg)}$	Corrente média no diodo	1 A	1,3 A
$I_{D1(ef)}$	Corrente eficaz no diodo	1,65 A	1,78 A
$V_{S1(max)}$	Tensão máxima sobre a chave	38,9 V	41,77 V
$V_{D1(max)}$	Tensão máxima sobre o diodo	14 V	17,28 V

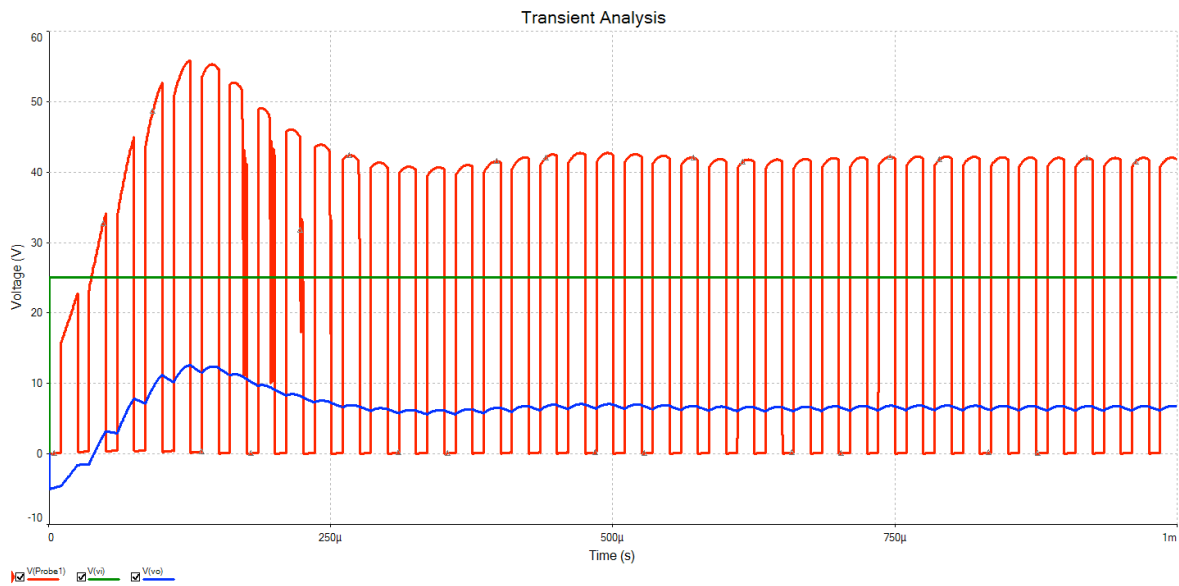


Figura 22 – Formas de onda da tensão de entrada, de saída e sobre o interruptor.

A potência dissipada nos componentes (transistor, diodo e transformador) é da ordem de 1,01 W, resultando em um rendimento de aproximadamente 89,6% para o conversor. Vale ressaltar que o circuito simulado tem apenas fins didáticos, não devendo ser implementado em laboratório nas condições apresentadas aqui.

Além disso, é importante notar nas simulações com componentes ideais e/ou reais, que a tensão máxima sobre a chave e o diodo é um pouco superior a tensão de saída nominal. Isso ocorre em função da ondulação de tensão na carga, fazendo com que a tensão máxima na carga seja também um pouco superior a escolhida.

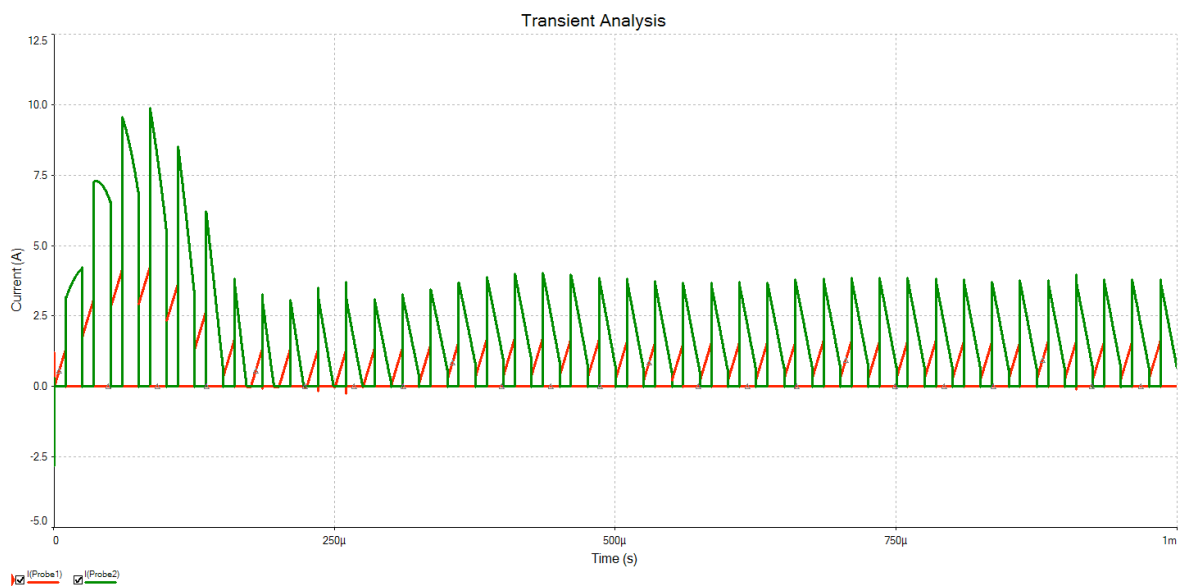


Figura 23 – Formas de onda das principais correntes do circuito.

9 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01) Considerando o circuito da Figura 24 e que a fonte de alimentação seja de 15 V, a chave é ideal e está operando com razão cíclica de 30%, a carga tem resistência de 5 Ω , o conversor está operando em condução descontínua, relação de transformação é de 1:1, determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes médias em todos os elementos do circuito;
- A potência média na carga.

A tensão média na carga será:

$$V_o = \frac{V_i}{n} \cdot \frac{D}{1-D} = \frac{15}{1} \cdot \frac{0,4}{1-0,4} = 10V .$$

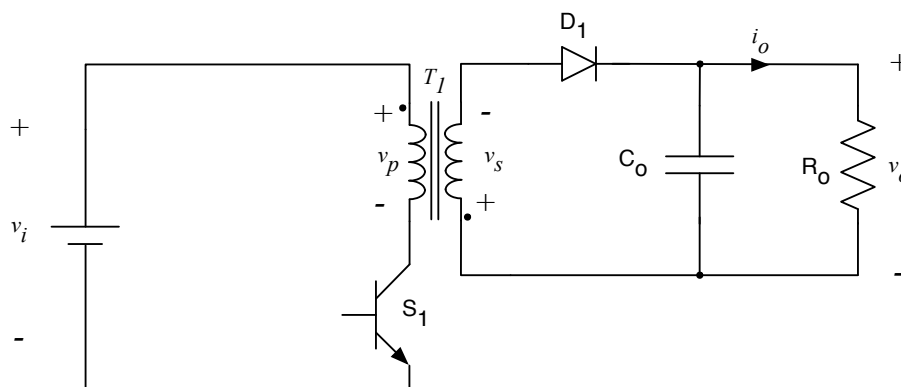


Figura 24 – Circuito para exercício resolvido 01.

As potências na saída e na entrada serão:

$$P_o = V_o \cdot I_o = \frac{V_o^2}{R_o} = \frac{10^2}{5} = 20W .$$

$$\eta = 100\% .$$

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = \frac{20}{1} = 20W .$$

As correntes médias nos elementos do circuito serão:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} = \frac{10}{5} = 2,0 A .$$

$$I_{C_o} = 0 A .$$

$$I_i = \frac{P_i}{V_i} = \frac{20}{15} = 1,33 A .$$

$$I_{S_1} = I_i = 1,33 A .$$

$$I_{D_1} = I_o = 2,0 A .$$

ER 02) Considere que no circuito da Figura 25 a tensão de entrada seja de 24 V, a tensão de saída deve ser de 3,3 V com corrente de 1 A. O indutor tem uma indutância de 500 μH e o capacitor tem capacitância de 10 μF . A frequência de operação do circuito é de 50 kHz. Os semicondutores são ideais. Relação de transformação do transformador é de 2:1. Determine:

- A razão cíclica de operação do conversor;
- As correntes de pico e média nos componentes do circuito;
- A potência média na carga;
- As tensões máximas nos semicondutores;
- As ondulações de corrente e tensão.

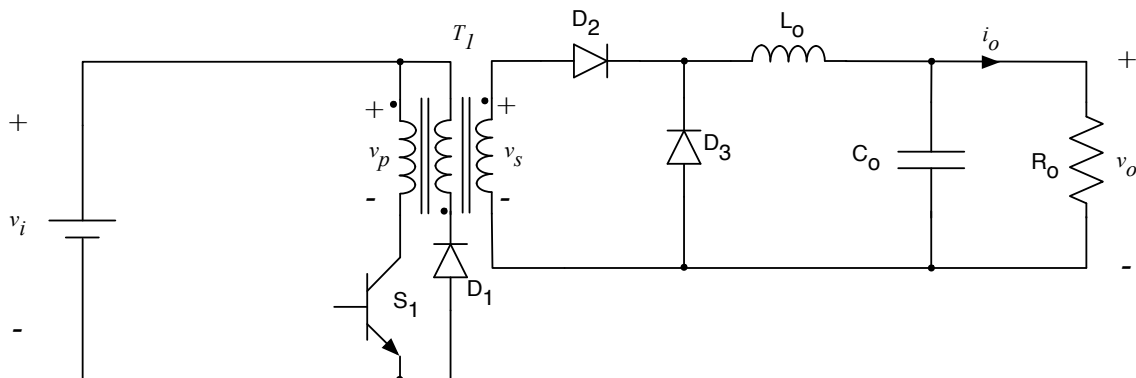


Figura 25 – Circuito para exercício resolvido 02.

A razão cíclica de operação será:

$$D = \frac{n \cdot V_o}{V_i} = \frac{2 \cdot 3,3}{24} = 0,275 .$$

As potências na carga e na entrada, considerando rendimento de 100% serão:

$$P_o = V_o \cdot I_o = 3,3 \cdot 0,5 = 1,65 W .$$

$$\eta = 100\% .$$

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = \frac{1,65}{1} = 1,65 W .$$

A corrente na carga já está determinada e vale 500 mA. Deste modo, as correntes médias nos elementos do circuito serão:

$$I_{L_o} = I_o = 0,5 A.$$

$$I_{S_1} = \frac{P_i}{V_i} = \frac{1,65}{24} = 0,07 A.$$

$$I_{D_1} = 0,2 \cdot I_i = 0,2 \cdot 0,07 = 0,014 A.$$

$$I_{D_2} = D \cdot I_{L_o} = 0,275 \cdot 0,5 = 0,1375 A.$$

$$I_{D_3} = (1 - D) \cdot I_{L_o} = (1 - 0,275) \cdot 0,5 = 0,3625 A.$$

Para determinar as correntes máximas, deve-se determinar inicialmente a ondulação de corrente no indutor, que será:

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{D_3}}{L_o \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D) = \frac{V_i}{n \cdot L_o \cdot F_s} \cdot D \cdot (1 - D) = \frac{24}{2 \cdot 500 \mu \cdot 50k} \cdot 0,275 \cdot (1 - 0,275) \cong 0,1 A.$$

Assim, a corrente máxima nos elementos do circuito será:

$$I_{L_o(\max)} = I_{D_3(\max)} = I_{D_1(\max)} = I_o + \frac{\Delta I_{L_o}}{2} = 0,5 + \frac{0,1}{2} = 0,55 A.$$

As correntes no lado primário serão:

$$I_{p(\max)} = I_{S_1(\max)} = I_{D_1(\max)} = n \cdot \left(I_o + \frac{\Delta I_{L_o}}{2} \right) = 2 \cdot \left(0,5 + \frac{0,1}{2} \right) = 1,1 A.$$

As tensões máximas sobre os semicondutores serão:

$$V_{S_1(\max)} = V_{D_1(\max)} = V_i = 24 V.$$

$$V_{D_2(\max)} = V_{D_3(\max)} = \frac{V_i}{n} = \frac{24}{2} = 12 V.$$

A ondulação de tensão na carga será:

$$\Delta V_{C_o} = \frac{V_{D_3}}{31 \cdot L_o \cdot C_o \cdot F_s^2} = \frac{V_i}{n \cdot 31 \cdot L_o \cdot C_o \cdot F_s^2} = \frac{24}{2 \cdot 31 \cdot 500 \mu \cdot 10 \mu \cdot 50k^2} = 0,031 V.$$

ER 01) Considerando o circuito simulado no item 5.1, com componentes ideais, determine os valores calculados da Tabela 1:

A tensão média na carga, considerando componentes ideais, será:

$$V_o = \frac{V_i}{n} \cdot \frac{D}{1-D} = \frac{25}{7} \cdot \frac{0,4}{1-0,4} = 7,14V.$$

Os valores referentes ao transformador foram determinados no capítulo anterior, no exemplo resolvido 02.

As potências na saída e na entrada serão:

$$P_o = 5W.$$

$$\eta = 100\%.$$

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} = \frac{5}{1} = 5W.$$

As correntes médias nos elementos do circuito serão:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{5}{7,14} = 0,7A.$$

$$I_{Co} = 0A.$$

$$I_i = \frac{P_i}{V_i} = \frac{5}{25} = 0,2A.$$

$$I_{S1} = I_i = 0,2A.$$

$$I_{D1} = I_o = 0,7A.$$

As correntes de pico serão:

$$I_{p(pk)} = \frac{2 \cdot P_o}{\eta \cdot V_i \cdot D_{max}} = \frac{2 \cdot 5}{1 \cdot 25 \cdot 0,4} = 1,04A.$$

$$I_{S1(pk)} = I_{p(pk)} = 1,04A.$$

$$I_{D1(pk)} = n \cdot I_{p(pk)} = \frac{7}{3} \cdot 1,04 = 2,43A.$$

$$I_{Co(pk)} = I_{D1(pk)} - I_o = 2,43 - 0,7 = 1,73A.$$

Por sua vez, as correntes eficazes serão:

$$I_{p(ef)} = I_{p(pk)} \cdot \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} = I_{p(pk)} \cdot \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} = 1,04 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{3}} = 0,38A.$$

$$I_{S1(ef)} = I_{p(ef)} = 0,38 A.$$

$$I_{s(ef)} = I_{s(pk)} \cdot \sqrt{\frac{1-D_{max}}{3}} = 2,43 \cdot \sqrt{\frac{1-0,4}{3}} = 1,09 A.$$

$$I_{D1(ef)} = I_{s(ef)} = 1,09 A.$$

$$I_{Co(ef)} = \sqrt{\left(I_{D1(ef)}\right)^2 - \left(I_o\right)^2} = \sqrt{(1,09)^2 - (0,7)^2} = 0,83 A.$$

A ondulação de tensão no capacitor de saída será:

$$\Delta V_{Co} = \frac{D \cdot I_o}{C_o \cdot F_s} = \frac{0,4 \cdot 0,7}{22 \cdot 10^{-6} \cdot 50k} = 0,25 V.$$

As tensões máximas nos componentes semicondutores serão:

$$V_{S_1} = V_i + n \cdot V_o = 24 + \frac{7}{3} \cdot 7,14 = 40,66 V.$$

$$V_{D_1} = n \cdot V_i + V_o = \frac{3}{7} \cdot 24 + 7,14 = 17,42 V.$$

Exercícios Propostos

EP 01) Considerando o circuito da Figura 24 e que a fonte de alimentação seja de 18 V, a chave é ideal e será comandada com uma razão cíclica de 35% e a carga tem resistência de 5 Ω , o diodo também é ideal. A relação de transformação é de 2:1. Determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes médias nos elementos do circuito;
- A potência média na carga;
- A tensão máxima sobre os semicondutores;
- O rendimento do circuito.

EP 02) Considerando o circuito da Figura 26 operando com um transistor 2N2222, razão cíclica de 40%, frequência de chaveamento de 20 kHz, a tensão de entrada é 12 V, a carga tem resistência de 50 Ω , o diodo será o MUR105. Indutância de magnetização de 1 mH e o capacitor tem capacitância de 10 μ F. Relação de transformação de 2,5:1. Considere operação em condução descontínua. Determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes de pico, média e eficaz nos elementos do circuito;
- A potência média na carga;

- A tensão máxima sobre os semicondutores;
- A ondulação de corrente e tensão;
- O rendimento do circuito.

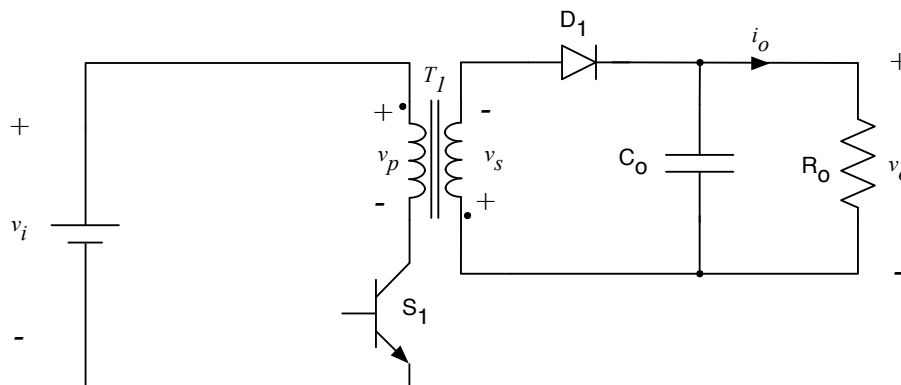


Figura 26 – Circuito para exercício proposto 02.

EP 03) Desenhe as principais formas de onda para o exemplo resolvido 01 (ER 01).

EP 04) Desenhe as principais formas de onda para o exemplo resolvido 02 (ER 02).

EP 05) Simule o circuito do exemplo resolvido 01 (ER 01) no *software* Psim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 06) Simule o circuito do exemplo resolvido 02 (ER 02) no *software* Multisim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 07) Simule o circuito do exercício proposto 02 (EP 02) no *software* Multisim e compare os resultados obtidos no simulador com os calculados.

EP 08) Considere que no circuito da Figura 27 a tensão de entrada seja de 24 V, a tensão de saída deve ser de 10 V com corrente de 500 mA. A ondulação de corrente desejada é de 10% e a ondulação de tensão deve ser de 1%. A frequência de operação do circuito é de 50 kHz. Os semicondutores são ideais. Determine, considerando condução descontinua:

- A razão cíclica de operação do conversor;
- A relação de transformação do transformador;
- Os valores do indutor e do capacitor de filtro;
- As correntes de pico, média e eficaz nos componentes do circuito;
- A potência média na carga;
- As tensões máximas nos semicondutores;
- As ondulações de corrente e tensão.

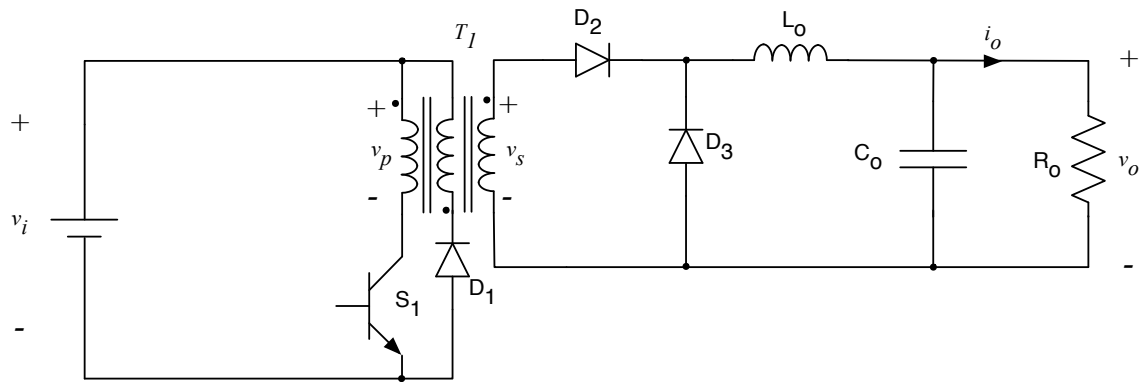


Figura 27 – Circuito para exercício proposto 08.

EP 09) Repita o exercício proposto 08 considerando condução contínua, ou seja, determine a razão cíclica e a relação de transformação para que isso aconteça.

EP 10) Considerando o circuito da Figura 24 e que a fonte de alimentação seja de 12 V, a chave é ideal e está operando com razão cíclica de 42%, a carga tem resistência de 5 Ω , o conversor está operando em condução descontínua, a relação de transformação é de 1:1, determine:

- A tensão média na carga;
- As correntes médias em todos os elementos do circuito;
- A potência média na carga.

EP 11) Refaça o exercício resolvido 02 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 12) Refaça o exercício resolvido 01 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 13) Refaça o exercício proposto 01 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 14) Refaça o exercício proposto 02 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

EP 15) Refaça o exercício proposto 10 considerando que o conversor esteja operando sem carga.

10 Laboratório

10.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o estudo de conversores cc-cc isolados.

Em síntese, objetiva-se:

- Identificar os principais parâmetros da fonte chaveada;
- Verificar o funcionamento da fonte chaveada;
- Identificar o esquemático e as principais partes de uma fonte chaveada.

10.2 Identificação dos Dados da Placa da Fonte Chaveada

A partir das informações contidas na placa de identificação, faça as anotações conforme solicitado na tabela 1.

Tabela 3 – Dados de placa da fonte chaveada.

Característica	Anotação do dado
Fabricante	
Modelo	
Tensão de entrada	
Tensão nominal de saída	
Corrente de saída	
Outras informações	

10.3 Funcionamento da Fonte Chaveada

Conecte a fonte chaveada na rede de energia elétrica por intermédio de um variavolt (variador de tensão).

Meça a tensão de saída com a fonte sem carga, variando a tensão de entrada da mesma.

Tabela 4 – Limites de operação da fonte chaveada.

Ajuste variavolt [V]	Tensão na saída [V]
85	
90	
95	
100	
105	
110	
115	
120	
125	
130	
135	
140	

Ajuste variavolt [V]	Tensão na saída [V]
175	
180	
185	
190	
195	
200	
205	

210	
215	
220	
225	
230	
235	
240	

Para a fonte operando com 220 V, meça a ondulação na tensão de saída sem carga e com carga.

Tabela 5 – Ondulação na tensão de saída.

Variável do circuito	Condição	Valores medidos
Tensão média de saída	Sem carga	
Ondulação na tensão de saída		
Tensão média de saída	Com ±50% de carga	
Ondulação na tensão de saída		
Tensão média de saída	Com ±100% de carga	
Ondulação na tensão de saída		

10.4 Questões

Considerando o esquemático mostrado na figura abaixo, determine.

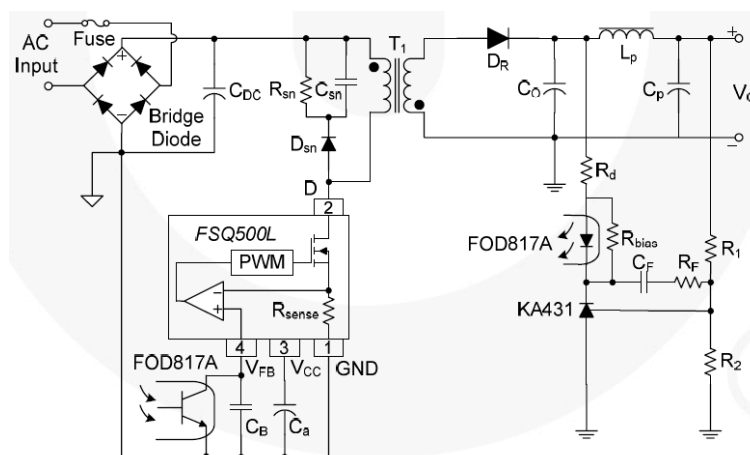


Figura 28 – Esquemático típico de uma fonte chaveada de baixa potência.

- 1) Um técnico realizou medições com o multímetro, verificando que não há tensão alguma sobre o capacitor CDC. Qual a conclusão que pode ser obtida com este ensaio?
- 2) Em outra fonte, o técnico verificou com o uso de um osciloscópio que a tensão no pino 2 do FSQ500L é pulsada, mas não há tensão na saída (V_o). Qual a conclusão que pode ser obtida com este ensaio?

11 Referências

- [1] IEEE, Pulsewidth Modulated Controller Integrated Circuit: Four Decades of Progress. IEEE Power Electronics Magazine, September, 2014.
- [2] BARBI, I. Eletrônica de potência. Florianópolis: Edição do Autor, 2005.
- [3] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [4] IEEE, Pulsewidth Modulated Controller Integrated Circuit: Four Decades of Progress. IEEE Power Electronics Magazine, September, 2014.