

2 Topologias básicas de conversores CC-CC com isolamento

Em muitas aplicações é necessário que a saída esteja eletricamente isolada da entrada, fazendo-se uso de transformadores. Em outros casos, o uso de transformadores é conveniente para evitar, dados os valores de tensões de entrada e de saída, o emprego de ciclos de trabalho muito estreitos ou muito largos.

Em alguns casos o uso desta isolação implica na alteração do circuito para permitir um adequado funcionamento do transformador, ou seja, para evitar a saturação do núcleo magnético. Relembre-se que não é possível interromper o fluxo magnético produzido pela força magnetomotriz aplicada aos enrolamentos.

2.1 Diferenças entre um transformador e indutores acoplados

Em um elemento magnético a grandeza que não admite descontinuidade é o fluxo magnético. De acordo com a lei de Faraday, a variação do fluxo magnético produz uma força eletromotriz proporcional à taxa de variação deste fluxo: $e = -\frac{d\Phi}{dt}$. Deste modo, uma descontinuidade no fluxo produziria uma tensão infinita, o que não é possível. Na prática, a tentativa de interrupção de um fluxo magnético produzido pela circulação de uma corrente, leva ao surgimento uma tensão grande o suficiente para que a corrente (e o fluxo) não se interrompa.

Em outras palavras, a energia acumulada no campo magnético não pode desaparecer instantaneamente. No caso ilustrado na figura 2.1, o aumento da tensão produzido pela tentativa de abertura do interruptor leva ao surgimento de um arco que dá continuidade à corrente (e ao fluxo) e dissipa a energia anteriormente acumulada no campo magnético $\left(\frac{L \cdot I^2}{2}\right)$.

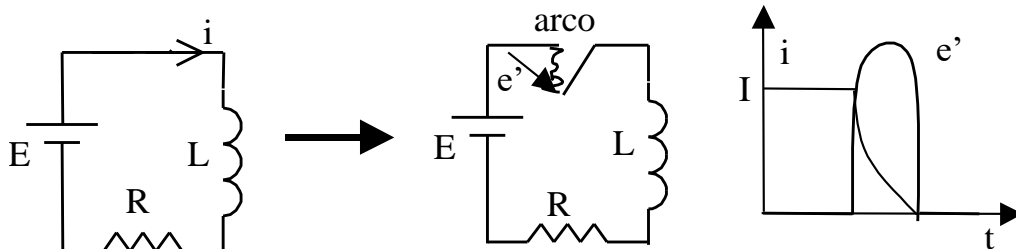


Figura 2.1 Processo de interrupção de corrente (fluxo magnético).

Quando se analisa um circuito elétrico, resulta da lei de Faraday a equação do indutor: $v_L = L \cdot \frac{di}{dt}$. No entanto, a grandeza física que não admite descontinuidade é o fluxo magnético e não a corrente. Em um indutor simples, fluxo e corrente são associados pela indutância ($\Phi = L \cdot i$).

Alguns dispositivos magnéticos, no entanto, podem dispor de mais de um enrolamento pelo qual é possível circular corrente e, desta forma, contribuir para a continuidade do fluxo magnético.

2.1.1 Funcionamento de um transformador

Considere-se a figura 2.2 que mostra um elemento magnético que possui dois enrolamentos com espiras N_1 e N_2 , colocados em um mesmo núcleo ferromagnético. Suponhamos que o acoplamento dos fluxos magnéticos produzidos por estes enrolamentos seja perfeito (dispersão nula).

A polaridade dos enrolamentos está indicada pelos “pontinhos”. Esta representação significa que uma tensão positiva e_1 produz uma tensão também positiva e_2 . Outra interpretação útil, relativa à circulação de correntes, é que correntes que entram pelos terminais marcados produzem fluxos no mesmo sentido.

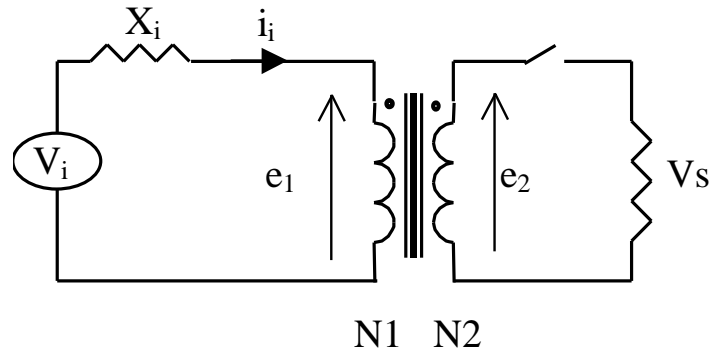


Figura 2.2 Princípio de funcionamento de transformador: secundário em aberto.

Com o secundário aberto, pelo primário circulará apenas uma pequena corrente, chamada de corrente de magnetização. Todas as tensões e correntes são supostas senoidais. O valor eficaz da tensão aplicada no primário, e_1 , é menor do que a tensão de entrada V_i . A corrente de magnetização produz um fluxo de magnetização no núcleo, Φ_m .

$$i_i = \frac{V_i - e_1}{X_i} \quad (2.1)$$

$$e_2 = e_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (2.2)$$

Quando se conecta uma carga no secundário, inicia-se uma circulação de corrente por tal enrolamento. A corrente do secundário produz um fluxo magnético que se opõe ao fluxo criado pela corrente de magnetização. Isto leva a uma redução do fluxo no núcleo. Pela lei de Faraday, ocorre uma redução na tensão e_1 . Conseqüentemente, de acordo com (2.1), há um aumento na corrente de entrada, i_i , de modo que se re-equilibre o fluxo de magnetização. Este comportamento está ilustrado na figura 2.3.

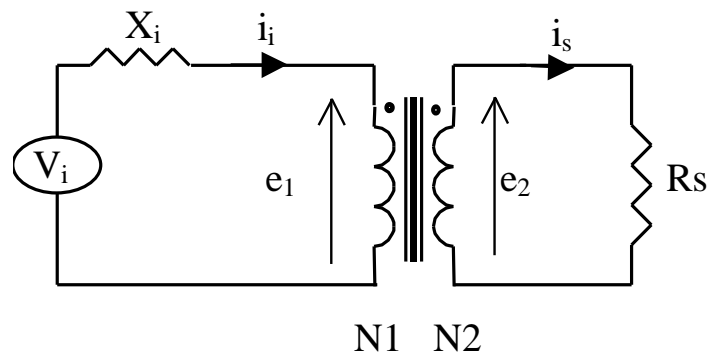


Figura 2.3 Princípio de funcionamento de transformador: secundário com carga.

Verifica-se assim o processo que leva à reflexão da corrente da carga para o lado do primário, o qual se deve à manutenção do fluxo de magnetização do núcleo do transformador.

Um dispositivo magnético comporta-se como um transformador quando existirem, ao mesmo tempo, correntes em mais de um enrolamento, de maneira que o fluxo de magnetização seja essencialmente constante.

2.1.2 Funcionamento de indutores acoplados

Outro arranjo possível para enrolamentos acoplados magneticamente é aquele em que a continuidade do fluxo é feita pela passagem de corrente ora por um enrolamento, ora por outro, garantindo-se um sentido de correntes que mantenha a continuidade do fluxo. Este é o que ocorre em um conversor fly-back, como será visto a seguir.

Para um mesmo valor de potência a ser transferido de um enrolamento para outro, o volume de um transformador será inferior ao de indutores acoplado, essencialmente devido ao melhor aproveitamento da excursão do fluxo magnético em ambos sentidos da curva $\Phi \times i$ (ou $B \times H$).

Com indutores acoplados a variação do fluxo é normalmente em um único quadrante do plano $B \times H$.

2.2 Conversor fly-back (derivado do abaixador-elevador)

O elemento magnético comporta-se como um indutor bifilar e não como um transformador. Quando T conduz, armazena-se energia na indutância do "primário" (em seu campo magnético) e o diodo fica reversamente polarizado. Quando T desliga há uma perturbação no fluxo, o que gera uma tensão que se elevará até que surja um caminho que dê surgimento à passagem de uma corrente que leve a manter a continuidade do fluxo.

Podem existir diversos caminhos que permitam a circulação de tal corrente. Aquele que efetivamente se efetivará é o que surge com a menor tensão.

No caso do circuito estudado, tal caminho se dará através do diodo que entra em condução assim que o transistor desliga. Para tanto a tensão no "secundário", e_2 deverá de elevar até o nível de V_o .

A energia acumulada no campo magnético é enviada à saída. A figura 2.4 mostra o circuito.

Note-se que as correntes médias nos enrolamentos não são nulas, levando à necessidade de colocação de entreferro no "transformador".

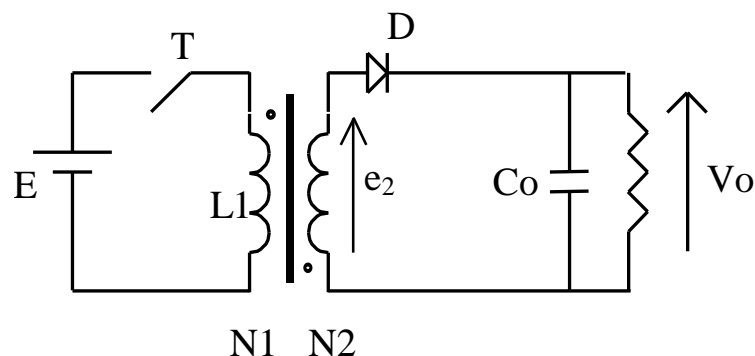


Figura 2.4 Conversor fly-back

A tensão de saída, no modo de condução contínua, é dada por:

$$V_o = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{E \cdot \delta}{(1 - \delta)} \quad (2.3)$$

2.3 Conversor Cuk

Neste circuito a isolamento se faz pela introdução de um transformador no circuito. Utilizam-se 2 capacitores para a transferência da energia da entrada para a saída. A figura 2.5 mostra o circuito. A tensão sobre o capacitor C1 é a própria tensão de entrada, enquanto sobre C2 tem-se a tensão de saída.

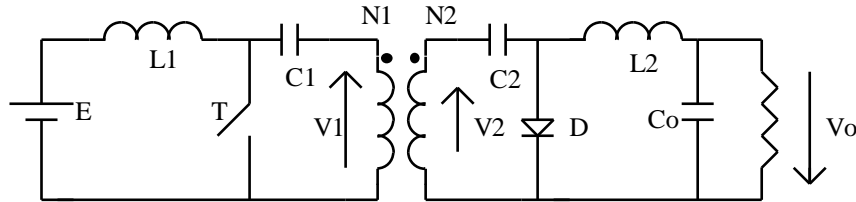


Figura 2.5 Conversor Cuk com isolamento

A tensão de saída, no modo contínuo de condução, é dada por:

$$V_o = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{E \cdot \delta}{(1 - \delta)} \quad (2.4)$$

O balanço de carga deve se verificar para C1 e C2. Com $N_1=N_2$, $C_1=C_2$, tendo o dobro do valor obtido pelo método de cálculo indicado anteriormente no circuito sem isolamento. Para outras relações de transformação deve-se obedecer a $N_1.C_1=N_2.C_2$, ou $V_1.C_1=V_2.C_2$.

Note que quando T conduz a tensão em N1 é $V_{C1}=E$ (em N2 tem-se $V_{C1}.N_2/N_1$). Quando D conduz, a tensão em N2 é $V_{C2}=V_o$ (em N1 tem-se $V_{C2}.N_1/N_2$). A corrente pelos enrolamentos não possui nível contínuo e o dispositivo comporta-se, efetivamente, como um transformador.

2.4 Conversor forward (derivado do abaixador de tensão)

O comportamento abaixador de tensão está associado ao estágio de saída, incluindo o diodo D3, indutor L e capacitor Co. Do funcionamento desta parte do circuito determina-se se o conversor deve ser analisado em condução contínua ou condução descontínua.

Quando T conduz, aplica-se E em N1. D1 fica diretamente polarizado e cresce a corrente por L. Quando T desliga, a corrente do indutor de saída tem continuidade via D3.

O elemento magnético possui três enrolamentos. De N1 para N3 se dá a transferência de energia da fonte para a carga. Já o enrolamento N2 tem como função desmagnetizar o núcleo a cada ciclo, no intervalo em que o transistor permanece desligado. Durante este intervalo tem-se a condução de D2 e se aplica uma tensão negativa em N2, ocorrendo um retorno de toda energia associada à corrente de magnetização para a fonte. A figura 2.6 mostra o circuito.

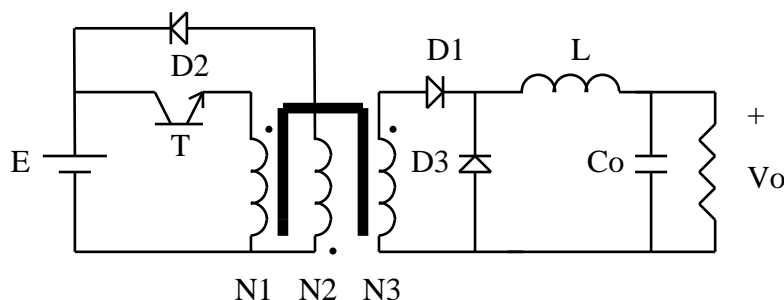


Figura 2.6 Conversor forward

Existe um máximo ciclo de trabalho que garanta a desmagnetização do transformador (tensão média nula), o qual depende da relação de espiras existente. A figura 2.7 mostra o circuito equivalente no intervalo de desmagnetização.

As tensões no enrolamento N1, respectivamente quando o transistor e o diodo D2 conduzem, são:

$$V_{N1} = E \quad 0 \leq t \leq t_T \quad \text{e} \quad V_{N1} = \frac{E \cdot N1}{N2} \quad t_T \leq t \leq t_2 \quad (2.5)$$

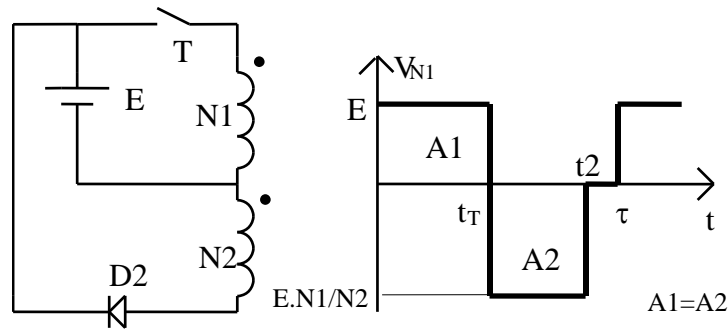


Figura 2.7 Forma de onda no enrolamento de N1.

Outra possibilidade, que prescinde do enrolamento de desmagnetização, é a introdução de um diodo zener no secundário, pelo qual circula a corrente no momento do desligamento de T. Esta solução, mostrada na figura 2.8, no entanto, provoca uma perda de energia sobre o zener, além de limitar o ciclo de trabalho em função da tensão.

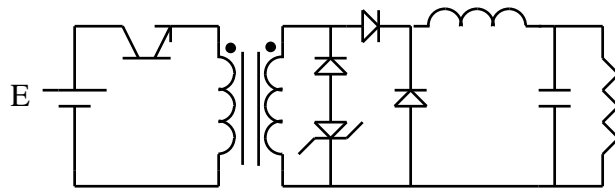


Figura 2.8 Conversor *forward* com desmagnetização por diodo zener.

2.5 Conversor *push-pull*

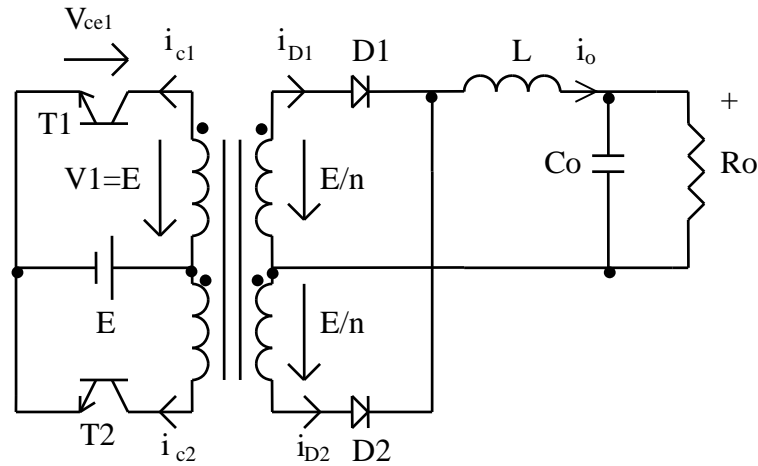
O conversor *push-pull* é, na verdade, um arranjo de 2 conversores *forward*, trabalhando em contra-fase, conforme mostrado na figura 2.9.

Quando T1 conduz (considerando as polaridades dos enrolamentos), nos secundários aparecem tensões como as indicadas na figura 2.10. D2 conduz simultaneamente, mantendo nulo o fluxo no transformador (desconsiderando a magnetização).

Note que no intervalo entre as conduções dos transistores, os diodos D1 e D2 conduzem simultaneamente (no instante em que T1 é desligado, o fluxo nulo é garantido pela condução de ambos os diodos, cada um conduzindo metade da corrente), atuando como diodos de livre-circulação e curto-circuitando o secundário do transformador.

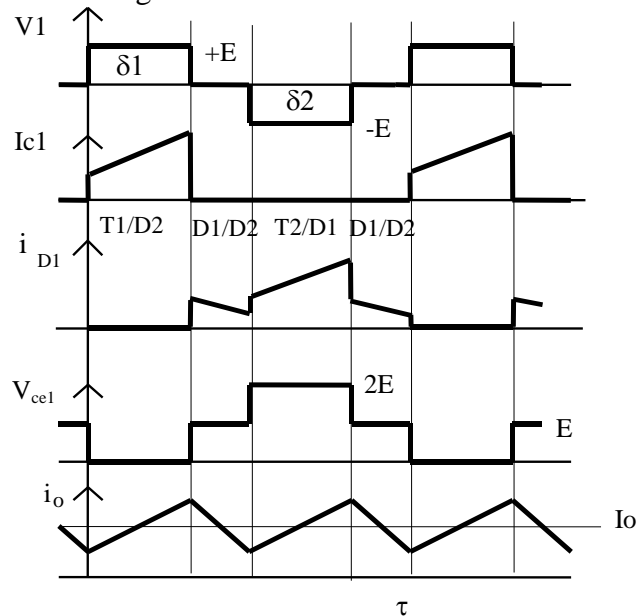
A tensão de saída é dada por:

$$V_o = \frac{2 \cdot E \cdot \delta_1}{n} \quad \text{e} \quad \delta_1 = \delta_2 \quad (2.6)$$

Figura 2.9 Conversor *push-pull*.

O ciclo de trabalho deve ser menor que 0,5 de modo a evitar a condução simultânea dos transistores. n é a relação de espiras do transformador.

Os transistores devem suportar uma tensão com o dobro do valor da tensão de entrada. Outro problema deste circuito refere-se à possibilidade de saturação do transformador caso a condução dos transistores não seja idêntica (o que garante uma tensão média nula aplicada ao primário). A figura 2.10 mostra algumas formas de onda do conversor.

Figura 2.10 Formas de onda do conversor *push-pull*.

2.6 Conversor em meia-ponte

Uma alteração no circuito que permite contornar ambos inconvenientes do conversor *push-pull* leva ao conversor com topologia em meia ponte, mostrado na figura 2.11. Neste caso é preciso ter um ponto médio na alimentação, o que faz com que os transistores tenham que suportar 50% da tensão do caso anterior, embora a corrente seja o dobro.

O uso de um capacitor de desacoplamento garante uma tensão média nula no primário do transformador. Este capacitor deve ser escolhido de modo a evitar ressonância com o indutor de saída e, ainda, para que sobre ele não recaia uma tensão maior que alguns por cento da tensão de alimentação (durante a condução de cada transistor).

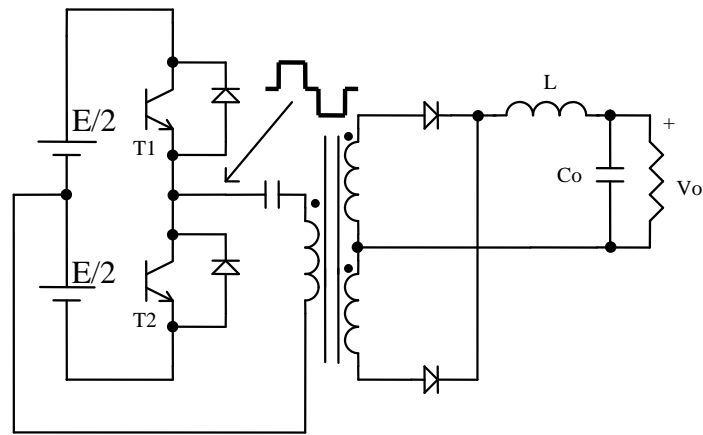


Figura 2.11 Conversor em meia-ponte

2.7 Conversor em ponte completa

Pode-se obter o mesmo desempenho do conversor em meia ponte, sem o problema da maior corrente pelo transistor, com o conversor em ponte completa. O preço é o uso de 4 transistores, como mostrado na figura 2.12.

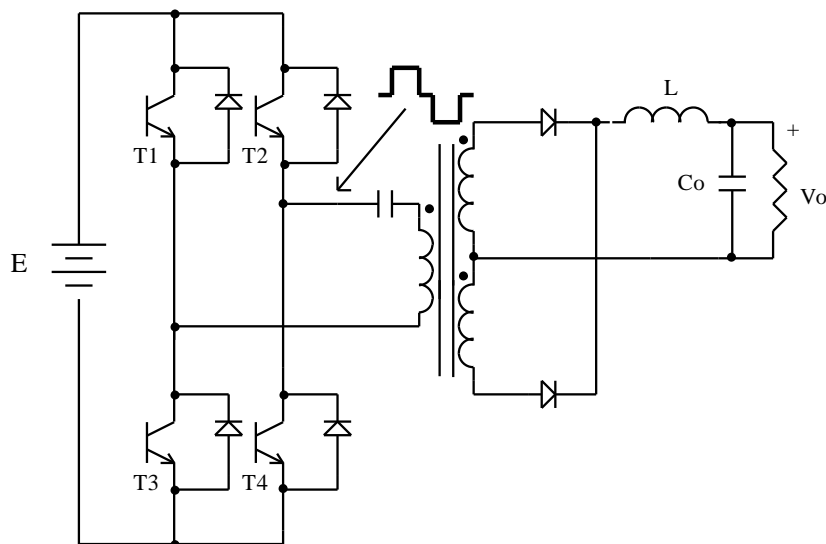
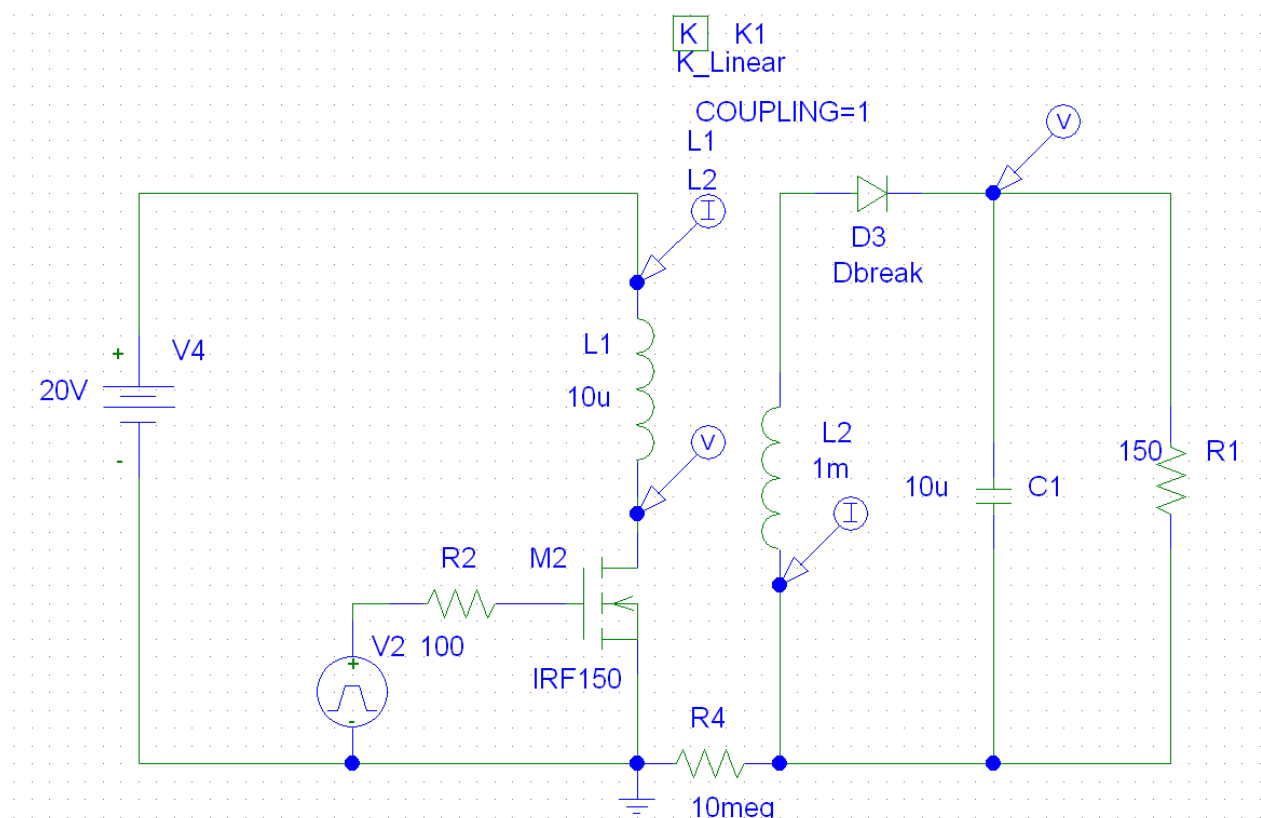


Figura 2.28 Conversor em ponte completa.

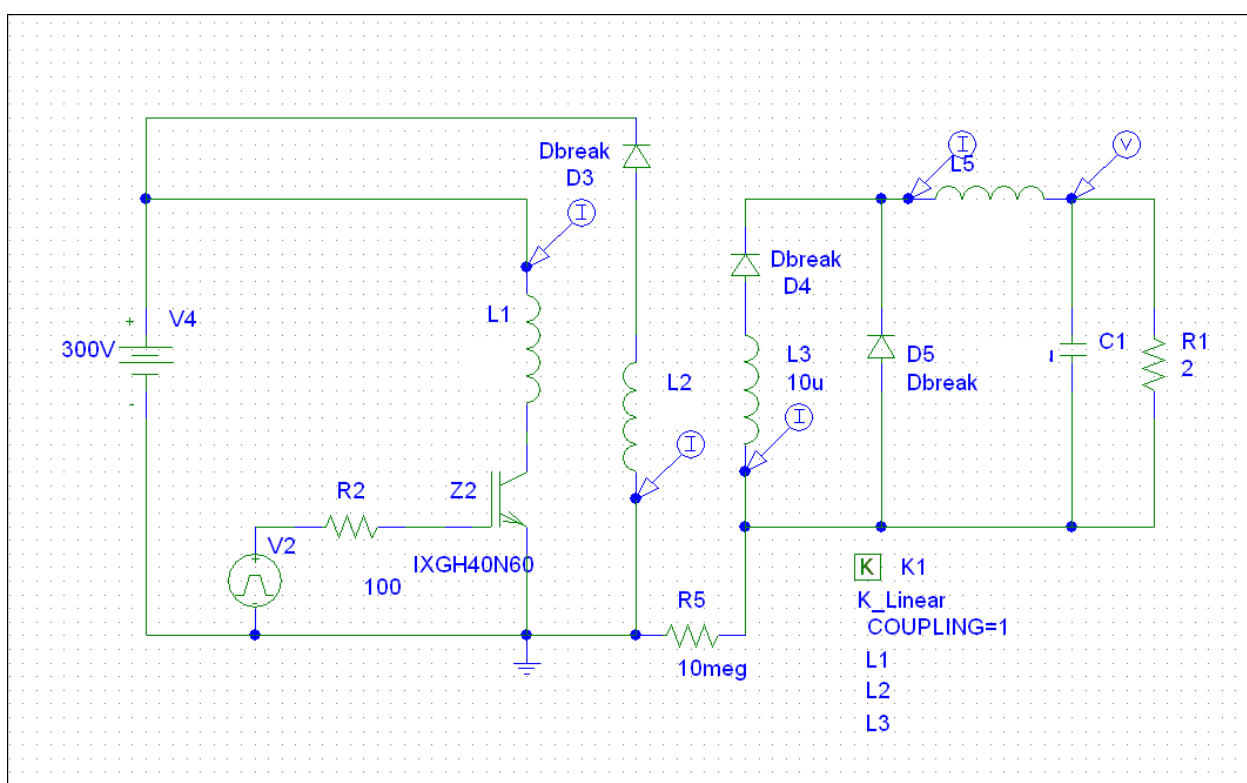
2.8 Exercícios

- Para o conversor *forward*, com 3 enrolamentos, $N_1=100$, $N_3=40$ (enrolamento de desmagnetização), Tensão de entrada $E=20V$. N_2 (número de espiras do enrolamento de saída) não é conhecido. Suponha condução contínua no indutor de saída
 - Desenhe a forma de onda em N_3 , para a situação de máximo ciclo de trabalho, indicando valores na escala vertical.
 - Determine o máximo ciclo de trabalho.
 - Determine a mínima tensão de bloqueio que o transistor deve suportar.
 - Qual o número de espiras do enrolamento N_2 caso se deseje uma tensão de saída de 12V para um ciclo de trabalho de 50%?
- Simule o circuito abaixo com uma frequência de chaveamento de 25kHz, largura de pulso de 50%. A relação de espiras do elemento magnético é de 1:10. Analise os valores das grandezas listadas abaixo e verifique se o resultado da simulação é consistente com as expectativas teóricas. Em caso de discrepância, procure justificar as diferenças.
 - Tensão de saída.
 - Ondulação da tensão de saída.
 - Tensão sobre o indutor L_1 .
 - Ondulação da corrente em L_1 e em L_2 (considere apenas os intervalos em que há corrente no transistor e no diodo, respectivamente).
 - Tensão V_{ce} do transistor.
 - Altere o acoplamento dos indutores para 0.95 e repita a simulação e as análises anteriores, justificando as eventuais alterações de resultados.



3. Calcule os seguintes parâmetros: $L5$, $L1$, $L2$, $C1$, δ , para o conversor forward abaixo. Simule o circuito e verifique se os resultados são consistentes com a expectativa. Justifique eventuais discrepâncias.

- O circuito opera no modo de condução contínua.
- Tensão de saída de 12V
- *Ripple* da corrente de saída (em $L5$) igual a 4 A (pico a pico)
- *Ripple* da tensão de saída de 1%.
- Relação de espiras entre $L1$ e $L3$ é $N1=10.N3$.
- $L2$ deve ser tal que garanta a desmagnetização total do núcleo durante a condução de $D3$.
- A frequência de chaveamento é de 20 kHz.



4. Utilizando o circuito do exercício anterior, aumente a largura de pulso para 60% e refaça a simulação. Discuta as alterações nos resultados.