



República Federativa do Brasil  
Ministério da Indústria, Comércio Exterior  
e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102016021668-0 A2

(22) Data do Depósito: 21/09/2016

(43) Data da Publicação: 17/07/2018



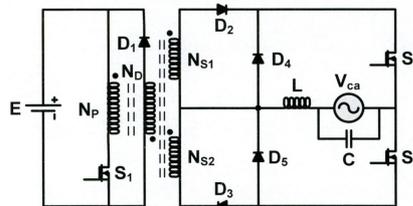
(54) **Título:** INVERSORES DE FREQUÊNCIA ISOLADOS COM TRANSFORMADOR EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD) E OUTRAS TOPOLOGIAS

(51) **Int. Cl.:** H02M 7/537; H02M 1/12

(73) **Titular(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

(72) **Inventor(es):** JOÃO AMÉRICO VILELA JUNIOR; GIOVANNA MARCHIORO REPP

(57) **Resumo:** Topologias de inversores de frequência que permitem transferir energia de uma fonte CC para cargas CA ou para a rede elétrica CA. As topologias de inversores propostas são modificações do Conversor Direto, do Conversor em Ponte Completa, do Conversor em Meia Ponte e do Conversor Push-Pull. Todas essas topologias utilizam transformadores operando em alta frequência que propiciam a isolamento galvânica e a adequação entre tensão de entrada e de saída.



## **INVERSORES DE FREQUÊNCIA ISOLADOS COM TRANSFORMADOR EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD) E OUTRAS TOPOLOGIAS**

[001]. Trata-se de inversores de frequência que transferem a energia de uma fonte CC para rede elétrica ou para cargas CA isoladas. As topologias propostas são modificações de conversores CC-CC de forma que a saída dos circuitos apresente uma tensão CA. O transformador opera em alta frequência, possibilitando uma redução significativa do volume e peso do equipamento. O baixo número de interruptores e a simplicidade do circuito de potência é um dos grandes diferenciais dessas topologias de inversores.

[002]. Todas as topologias apresentadas utilizam um transformador em alta frequência, que propicia isolamento galvânica entre a entrada e a saída do inversor. Os inversores descritos nessa patente podem operar utilizando inúmeras técnicas de controle existentes na literatura.

[003]. Essa patente apresenta o inversor de frequência utilizando o Conversor Direto (Forward), o inversor de frequência utilizando o Conversor Direto com Dois Interruptores e algumas das variações topológicas possíveis nesses dois inversores. Também é apresentado nessa patente o inversor de frequência utilizando o Conversor em Ponte Completa (Full-Bridge), o inversor de frequência utilizando o Conversor em Meia Ponte (Half-Bridge), o inversor de frequência utilizando o Conversor Push-Pull e algumas variações topológicas possíveis para esses inversores.

### INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD)

[004]. O Conversor Direto (Forward) é uma topologia clássica

de conversor CC-CC amplamente utilizada e descrita na literatura. Entretanto, sua aplicação como inversor de frequência é muito restrita e as topologias existentes são complexas e com elevado número de interruptores e outros semicondutores.

[005]. A Figura 1 apresenta a topologia do inversor de frequência utilizando o Conversor Direto (Forward), que será denominado Inversor com Duplo Forward (IDF). Nesse inversor o interruptor  $S_1$  opera em alta frequência e os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  operam em baixa frequência.

[006]. A operação do inversor IDF pode ser descrita em seis estágios de operação. O primeiro estágio tem início com o fechamento do interruptor  $S_1$ , permitindo que a tensão "E" da fonte CC seja aplicada no enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). Nesse momento, a circulação de corrente pelo enrolamento de desmagnetização ( $N_D$ ) fica bloqueada pelo diodo  $D_1$ . O interruptor  $S_2$  também está conduzindo, o que possibilita a circulação de corrente no secundário 1 do transformador ( $N_{S1}$ ), no diodo  $D_2$  e no próprio interruptor  $S_2$ . A energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica).

[007]. O segundo estágio de operação tem início com a abertura do interruptor  $S_1$ , que provoca a interrupção da circulação de corrente no enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). Nessa condição, a corrente magnetizante do transformador produz uma inversão de tensão em todos os terminais do transformador, respeitando as polaridades apresentadas na Figura 1. Dessa forma, o enrolamento de desmagnetização ( $N_D$ ) polariza diretamente o diodo  $D_1$  e ele passa a conduzir, devolvendo a energia acumulada na indutância magnetizante para a fonte CC.

O enrolamento primário  $N_P$  e os enrolamentos secundários  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$  ficam bloqueados pelo interruptor  $S_1$  e pelos diodos  $D_2$  e  $D_3$ , respectivamente. Como agora o indutor  $L$  não está sendo alimentado pela fonte CC, ele transfere sua energia armazenada para a rede elétrica ( $V_{ca}$ ) através do diodo  $D_4$  e do interruptor  $S_2$ , que permanece fechado nesse estágio de operação.

[008]. O terceiro estágio de operação começa quando a corrente magnetizante cessa e o diodo  $D_1$  é novamente bloqueado. Durante esta etapa, o indutor  $L$  continua transferindo energia para a carga. O fechamento do interruptor  $S_1$  faz o circuito retornar ao primeiro estágio de operação.

[009]. A operação do inversor IDF alterna entre o primeiro, segundo e terceiro estágio, enquanto o interruptor  $S_2$  permanecer conduzindo. Para inverter o sentido da tensão e da corrente aplicada no circuito de saída, é necessário abrir o interruptor  $S_2$  e fechar o interruptor  $S_3$ . Essa inversão ocorre na frequência da rede elétrica ou na frequência CA que se deseja alimentar a carga.

[010]. O quarto estágio de operação tem início com o fechamento do interruptor  $S_1$ , estando o interruptor  $S_3$  conduzindo. Esse estágio assemelha-se ao primeiro estágio de operação, porém agora a corrente circula no secundário 2 do transformador ( $N_{S2}$ ), no diodo  $D_3$ , no interruptor  $S_3$ . A energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica). Como agora o interruptor  $S_3$  está conduzindo, a corrente percorre o circuito de saída com sentido oposto ao do primeiro estágio de operação.

[011]. O quinto estágio de operação é similar ao segundo estágio, mas nesse caso o indutor  $L$  transfere energia para rede elétrica ( $V_{ca}$ ) através do diodo  $D_5$  e do interruptor  $S_3$ . A corrente

percorre o circuito de saída novamente com sentido oposto ao do segundo estágio de operação.

[012]. O sexto estágio de operação é semelhante ao terceiro, tendo seu início quando a corrente magnetizante cessa. Quando o interruptor  $S_1$  fecha novamente, o circuito retorna ao quarto estágio de operação. Enquanto a chave  $S_3$  permanecer conduzindo, a operação do inversor IDF alterna-se entre o quarto, quinto e sexto estágio.

[013]. O transformador produz a isolamento galvânica da entrada em relação à saída do inversor IDF e permite que a tensão de saída seja elevada ou abaixada em relação à tensão de entrada, característica fundamental em algumas aplicações.

[014]. O capacitor C do filtro de saída não é necessário em algumas aplicações.

#### INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD) COM DOIS INTERRUPTORES

[015]. O Conversor Direto (Forward) com dois interruptores é uma variação topológica do conversor Direto que elimina a necessidade do enrolamento de desmagnetização, fornecendo um caminho para a corrente magnetizante retornar para a fonte CC através do enrolamento primário do transformador e de dois diodos.

[016]. A Figura 2 apresenta a topologia do inversor de frequência utilizando o Conversor Direto (Forward) com dois interruptores, que será denominado Inversor com Dois interruptores e Duplo Forward (IDDF). Os estágios de operação do inversor IDDF são semelhantes aos estágios de operação do inversor IDF descritos anteriormente. Nesse inversor os interruptores  $S_1$  e  $S_2$  operam

simultaneamente em alta frequência e os interruptores  $S_3$  e  $S_4$  operam alternadamente em baixa frequência.

[017]. A principal diferença na operação do IDDF em relação ao IDF ocorre no segundo e no quinto estágio, quando os interruptores  $S_1$  e  $S_2$  abrem simultaneamente. Nesse instante, o enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ) tem sua tensão invertida devido à corrente magnetizante. A inversão da tensão no primário do transformador faz com que os diodos  $D_1$  e  $D_2$  entrem em condução, propiciando um caminho para devolver a energia acumulada na indutância magnetizante para a fonte CC (E). O secundário do inversor IDDF tem o mesmo comportamento do secundário do inversor IDF.

[018]. A Figura 3 mostra a forma de onda da tensão e da corrente em baixa frequência na saída do inversor IDDF, o sinal de comando e a forma de onda da corrente nos interruptores  $S_3$  e  $S_4$ . Os resultados foram obtidos utilizando a modulação PWM senoidal.

[019]. A Figura 4 mostra uma variação topológica do inversor IDF que também pode ser estendida ao inversor IDDF. Nesse caso, os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  devem ser unidirecionais e os estágios de operação são análogos aos do inversor IDF.

#### INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR EM PONTE COMPLETA (FULL-BRIDGE)

[020]. O Conversor em Ponte Completa (Full-Bridge) é uma topologia clássica de conversor CC-CC e de conversor CC-CA amplamente utilizada e descrita na literatura. Contudo, a utilização dessa topologia como inversor de frequência de forma isolada, em muitos casos, é realizada com o transformador operando em baixa frequência. As topologias de inversores em ponte completa com

transformador em alta frequência existentes são complexas e com elevado número de interruptores.

[021]. A Figura 5 apresenta a topologia do inversor de frequência utilizando o Conversor em Ponte Completa (Full-Bridge), que será denominado Inversor em Ponte Completa Duplo (IPCD).

[022]. Para exemplificar o princípio de funcionamento do Inversor IPCD, será utilizada uma das técnicas de modulação possíveis para acionamento desse inversor. A operação do inversor será descrita em oito estágios.

[023]. O primeiro estágio de operação tem início com o fechamento dos interruptores  $S_1$  e  $S_4$ , ou seja, a tensão "E" da fonte CC é aplicada no enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). O interruptor  $S_5$  está conduzindo, permitindo a circulação de corrente no secundário 1 do transformador ( $N_{S1}$ ), no diodo  $D_1$  e no próprio interruptor  $S_5$ . Dessa forma, a energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica). Os demais enrolamentos secundários do transformador ficam bloqueados pelo diodo  $D_2$  (que é o caso do enrolamento  $N_{S2}$ ) ou pelo interruptor  $S_6$  (que é o caso dos enrolamentos  $N_{S3}$  e  $N_{S4}$ ).

[024]. O segundo estágio de operação tem início com a abertura do interruptor  $S_1$  e, na sequência, o fechamento do interruptor  $S_2$ , colocando em roda livre o enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). Com tensão igual a zero nos enrolamentos do transformador, o indutor L transfere energia para rede elétrica ( $V_{ca}$ ) através do enrolamento secundário 1 do transformador ( $N_{S1}$ ), do diodo  $D_1$  e do interruptor  $S_5$  (que permanece conduzindo). O diodo  $D_5$ , assim como o diodo  $D_6$ , é utilizado apenas durante o transitório de comutação entre os interruptores  $S_5$  e  $S_6$ , no qual a

indutância de dispersão do secundário do transformador não permite assumir toda a corrente do indutor L. Se for possível garantir que a corrente no indutor L seja zero no momento da comutação entre os interruptores  $S_5$  e  $S_6$ , não será necessária a inclusão dos diodos  $D_5$  e  $D_6$  no circuito, conforme ilustrado na Figura 6.

[025]. O terceiro estágio de operação começa quando o interruptor  $S_4$  abre e, na sequência, o interruptor  $S_3$  fecha. Nesse instante, a tensão "E" da fonte CC é aplicada de forma invertida no enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). O interruptor  $S_5$  permanece conduzindo, permitindo a circulação de corrente no secundário 2 do transformador ( $N_{S2}$ ), no diodo  $D_2$  e no próprio interruptor  $S_5$ . A energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica). Os demais enrolamentos secundários do transformador ficam bloqueados pelo diodo  $D_1$  (que é o caso do enrolamento  $N_{S1}$ ) ou pelo interruptor  $S_6$  (que é o caso dos enrolamentos  $N_{S3}$  e  $N_{S4}$ ).

[026]. O quarto estágio de operação tem início com abertura do interruptor  $S_2$  e fechamento do interruptor  $S_1$ , colocando novamente em roda livre o enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). Esse estágio tem um comportamento semelhante ao segundo estágio de operação.

[027]. A abertura do interruptor  $S_3$  e o fechamento do interruptor  $S_4$  faz o circuito retornar ao primeiro estágio de operação. O inversor IPCD deve ficar operando ciclicamente entre os primeiros quatro estágios de operação enquanto o interruptor  $S_5$  permanecer conduzindo. Para inverter o sentido da tensão e da corrente aplicada no circuito de saída, é necessário abrir o interruptor  $S_5$  e fechar o interruptor  $S_6$ . Essa inversão ocorre na

frequência da rede elétrica ou na frequência CA que se deseja alimentar a carga.

[028]. O quinto estágio de operação tem início com o fechamento dos interruptores  $S_1$  e  $S_4$ , logo a tensão "E" da fonte CC é aplicada no enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). Nessa etapa o interruptor  $S_6$  está conduzindo, permitindo a circulação de corrente no secundário 4 do transformador ( $N_{S4}$ ), no diodo  $D_4$  e no próprio interruptor  $S_6$ , conforme ilustrado na Figura 5. A energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica). Os demais enrolamentos secundários do transformador ficam bloqueados pelo diodo  $D_3$  (que é o caso do enrolamento  $N_{S3}$ ) ou pelo interruptor  $S_5$  (que é o caso dos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$ ).

[029]. O sexto estágio de operação tem início com a abertura do interruptor  $S_1$  e na sequência o fechamento do interruptor  $S_2$ , colocando em roda livre o enrolamento primário do transformador. Com tensão igual a zero nos enrolamentos do transformador, o indutor L transfere energia para rede elétrica ( $V_{ca}$ ) através do enrolamento secundário 4 do transformador ( $N_{S4}$ ), do diodo  $D_4$  e do interruptor  $S_6$ . A função do diodo  $D_6$  está explicada do segundo estágio de operação.

[030]. O sétimo estágio de operação começa quando o interruptor  $S_4$  abre e, na sequência, o interruptor  $S_3$  fecha. Nesse instante, a tensão "E" da fonte CC é aplicada de forma invertida no enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). O interruptor  $S_6$  permanece conduzindo, o que permite a circulação de corrente no secundário 3 do transformador ( $N_{S3}$ ), no diodo  $D_3$  e no próprio interruptor  $S_6$ . Dessa forma, a energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser

a rede elétrica). Os demais enrolamentos secundários do transformador ficam bloqueados pelo diodo  $D_4$  (que é o caso do enrolamento  $N_{S4}$ ) ou pelo interruptor  $S_5$  (que é o caso dos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$ ).

[031]. O oitavo estágio de operação tem início com abertura do interruptor  $S_2$  e fechamento do interruptor  $S_1$ , colocando novamente em roda livre o enrolamento primário do transformador ( $N_p$ ). Esse estágio tem um comportamento semelhante ao sexto estágio de operação.

[032]. A abertura do interruptor  $S_3$  e o fechamento do interruptor  $S_4$  faz o circuito retornar ao quinto estágio de operação. O inversor IPCD deve ficar operando ciclicamente entre os últimos quatro estágios de operação enquanto o interruptor  $S_6$  permanecer conduzindo.

[033]. A Figura 7 mostra o inversor IPCD com pequenas alterações topológicas, mas com mesmo princípio de operação. No inversor IPCD é possível utilizar as mesmas técnicas de chaveamento suave que são utilizadas nos conversores CC-CC em ponte completa.

#### INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR EM MEIA PONTE (HALF-BRIDGE)

[034]. A Figura 8 apresenta a topologia do inversor de frequência utilizando o Conversor em Meia Ponte (Half-Bridge), que será denominado Inversor em Meia Ponte Duplo (IMPD). A operação do inversor IMPD pode ser descrita em doze estágios de operação.

[035]. O primeiro estágio tem início com o fechamento do interruptor  $S_1$ , logo, a tensão " $E_1$ " da fonte CC é aplicada no

enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). O secundário do inversor IMPD tem o mesmo comportamento do secundário do inversor IPCD durante seu primeiro estágio, com circulação de corrente no secundário 1 do transformador ( $N_{S1}$ ), no diodo  $D_1$  e no interruptor  $S_3$ , que está fechado. Dessa forma, a energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica).

[036]. O segundo estágio de operação tem início com a abertura do interruptor  $S_1$ , que provoca a interrupção da tensão " $E_1$ " da fonte CC sobre o enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). Nesse instante, o enrolamento primário gera uma tensão " $E_2$ " com polaridade invertida, para manter a circulação da corrente magnetizante. Esse efeito faz com que o diodo em antiparalelo ao interruptor  $S_2$  entre em condução, propiciando um caminho para devolver a energia acumulada na indutância magnetizante para a outra fonte CC ( $E_2$ ) presente no circuito. No secundário do transformador, a corrente fornecida pelo indutor L circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$ , diodos  $D_1$  e  $D_2$ , interruptor  $S_3$  e é transferida para carga na saída do inversor. Assim como no inversor IPCD, os diodos  $D_5$  e  $D_6$  são utilizados apenas durante o transitório de comutação entre os interruptores  $S_5$  e  $S_6$ , no qual a indutância de dispersão do secundário do transformador não permite assumir toda a corrente do indutor L. Se for possível garantir que a corrente no indutor L seja zero no momento da comutação entre os interruptores  $S_5$  e  $S_6$ , não será necessária a inclusão dos diodos  $D_5$  e  $D_6$  no circuito.

[037]. O terceiro estágio de operação tem início quando a corrente magnetizante cessa. No secundário do transformador, a corrente imposta pelo indutor L circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$

de forma igualitária, para garantir fluxo zero no transformador. A corrente permanece circulando pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$ , o interruptor  $S_3$  e é transferida para o circuito de saída do inversor.

[038]. O quarto estágio tem início com o fechamento do interruptor  $S_2$ , logo, a tensão " $E_2$ " da fonte CC é aplicada no enrolamento primário do transformador ( $N_P$ ). No secundário a corrente circula pelo enrolamento 2 do transformador ( $N_{S2}$ ), pelo diodo  $D_2$  e pelo interruptor  $S_3$ , que está fechado. Dessa forma, a energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica).

[039]. O quinto estágio de operação tem início com a abertura do interruptor  $S_2$ . Esse estágio tem comportamento semelhante ao segundo estágio. No secundário do transformador, a corrente fornecida pelo indutor L circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$ , os diodos  $D_1$  e  $D_2$ , o interruptor  $S_3$  e é transferida para carga na saída do inversor.

[040]. O sexto estágio tem início com o fim da corrente magnetizante e seu comportamento é semelhante ao terceiro estágio. No secundário do transformador, a corrente imposta pelo indutor L circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$  de forma igualitária, para garantir fluxo zero no transformador. A corrente permanece circulando pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$ , o interruptor  $S_3$  e é transferida para o circuito de saída do inversor.

[041]. O fechamento do interruptor  $S_1$  faz o circuito retornar ao primeiro estágio de operação. O inversor IMPD deve ficar operando ciclicamente entre os primeiros seis estágios de operação enquanto o interruptor  $S_3$  permanecer conduzindo. Para inverter o sentido da tensão e da corrente aplicada no circuito de saída, é necessário abrir o interruptor  $S_3$  e fechar o interruptor  $S_4$ .

Essa inversão ocorre na frequência da rede elétrica ou na frequência CA que se deseja alimentar a carga.

[042]. Quando o interruptor  $S_4$  está conduzindo têm-se outros seis estágios de operação semelhantes aos seis estágios descritos acima, mas utilizando os enrolamentos secundários  $N_{S3}$  e  $N_{S4}$ .

#### INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR PUSH-PULL

[043]. A Figura 9 apresenta a topologia do inversor de frequência utilizando o Conversor Push-Pull, que será denominado Inversor Push-Pull Duplo (IPPD).

[044]. A operação do inversor IPPD pode ser descrita em doze estágios de operação. O primeiro estágio de operação tem início com o fechamento do interruptor  $S_1$ , logo a tensão "E" da fonte CC é aplicada no enrolamento primário 1 do transformador ( $N_{P1}$ ). O interruptor  $S_3$  está conduzindo, permitindo a circulação de corrente no secundário 1 do transformador ( $N_{S1}$ ), no diodo  $D_1$  e no próprio interruptor  $S_3$ . A energia é transferida para o circuito de saída, que é composto pelo filtro LC e pela carga (que pode ser a rede elétrica).

[045]. O segundo estágio de operação tem início com a abertura do interruptor  $S_1$ , que provoca a interrupção da corrente no enrolamento primário ( $N_{P1}$ ). No secundário do transformador, a corrente fornecida pelo indutor L circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$ , pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$ , pelo interruptor  $S_3$  e é transferida para carga na saída do inversor. À medida que a energia acumulada na indutância magnetizante vai sendo transferida para o circuito de saída, a corrente no enrolamento  $N_{S1}$  vai diminuindo e a corrente no enrolamento  $N_{S2}$  vai aumentando. Assim como nos inversores IPCD e IMPD, os diodos  $D_5$  e  $D_6$  são utilizados apenas

durante o transitório de comutação entre os interruptores  $S_5$  e  $S_6$ , no qual a indutância de dispersão do secundário do transformador não permite assumir toda a corrente do indutor  $L$ . Se for possível garantir que a corrente no indutor  $L$  seja zero no momento da comutação entre os interruptores  $S_5$  e  $S_6$ , não será necessária a inclusão dos diodos  $D_5$  e  $D_6$  no circuito.

[046]. O terceiro estágio de operação tem início quando a corrente magnetizante cessa. Nesse instante, a corrente imposta pelo indutor  $L$  circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$  de forma igualitária, para garantir fluxo zero no transformador. A corrente permanece circulando pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$ , o interruptor  $S_3$  e é transferida para o circuito de saída do inversor.

[047]. O quarto estágio de operação tem início com o fechamento do interruptor  $S_2$ , logo, a tensão "E" da fonte CC é aplicada no enrolamento primário 2 do transformador ( $N_{P2}$ ). Em virtude das polaridades dos enrolamentos do transformador, esta ação permite a circulação de corrente no secundário 2 do transformador ( $N_{S2}$ ), no diodo  $D_2$  e no interruptor  $S_3$ . A energia é transferida para o circuito de saída.

[048]. O quinto estágio de operação tem início com a abertura do interruptor  $S_2$ , que provoca a interrupção da corrente no enrolamento primário ( $N_{P2}$ ). No secundário do transformador, a corrente fornecida pelo indutor  $L$  circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$ , os diodos  $D_1$  e  $D_2$ , o interruptor  $S_3$  e é transferida para carga na saída do inversor.

[049]. O sexto estágio de operação tem início quando a corrente magnetizante cessa. Nesse instante, a corrente imposta pelo indutor  $L$  circula pelos enrolamentos  $N_{S1}$  e  $N_{S2}$  de forma igualitária, para garantir fluxo zero no transformador. A corrente

permanece circulando pelos diodos  $D_1$  e  $D_2$ , o interruptor  $S_3$  e é transferida para o circuito de saída do inversor.

[050]. O fechamento do interruptor  $S_1$  faz o circuito retornar ao primeiro estágio de operação. O inversor IPPD deve ficar operando ciclicamente entre os primeiros seis estágios de operação enquanto o interruptor  $S_3$  permanecer conduzindo. Para inverter o sentido da tensão e da corrente aplicada no circuito de saída, é necessário abrir o interruptor  $S_3$  e fechar o interruptor  $S_4$ . Essa inversão ocorre na frequência da rede elétrica ou na frequência CA que se deseja alimentar a carga.

[051]. Quando o interruptor  $S_4$  está conduzindo tem-se outros seis estágios de operação semelhantes aos seis estágios descritos acima, mas utilizando os enrolamentos secundários  $N_{S3}$  e  $N_{S4}$ .

## REIVINDICAÇÕES

1) INVERSORES DE FREQUÊNCIA ISOLADOS COM TRANSFORMADOR EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD) E OUTRAS TOPOLOGIAS AFINS, **caracterizados pelo** baixo número de interruptores e a simplificação do circuito de potência.

2) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO, **caracterizado por** utilizar o conversor direto (FORWARD) com dois enrolamentos secundários no transformador e conectados num circuito formado por dois interruptores e quatro diodos, apresentado na Figura 1, que possibilita a geração de uma corrente ou tensão senoidal na saída. Essa topologia de inversor denominado Inversor com Duplo Forward (IDF) permite transferir energia de uma fonte CC para cargas CA ou para a rede elétrica CA.

3) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO COM DOIS INTERRUPTORES, **caracterizado por** utilizar o conversor direto (FORWARD) com dois interruptores no primário do transformador e possuir o mesmo circuito no secundário do transformador que o apresentado pelo inversor IDF. Essa topologia de inversor denominada Inversor com Dois interruptores e Duplo Forward (IDDF), descrita na Figura 2, permite transferir energia de uma fonte CC para cargas CA ou para a rede elétrica CA.

4) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD), **caracterizado por** permitir que o diodo  $D_2$  e o interruptor  $S_2$  no inversor IDF (Figura 1) sejam substituídos por um interruptor unidirecional  $S_2$  na posição do diodo  $D_2$ , conforme apresentado na Figura 4. Semelhantemente, o diodo  $D_3$  e o interruptor  $S_3$  também podem ser substituídos pelo interruptor unidirecional  $S_3$ , apresentado na Figura 4. Essas alterações topológicas não comprometem a funcionalidade do inversor.

5) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD) COM DOIS INTERRUPTORES, **caracterizado por** permitir que o diodo  $D_3$  e o interruptor  $S_3$  no inversor IDDF (Figura 2) sejam substituídos por um interruptor unidirecional  $S_3$  na posição do diodo  $D_3$ . Semelhantemente, o diodo  $D_6$  e o interruptor  $S_4$  também podem ser substituídos pelo interruptor unidirecional  $S_4$  na posição do diodo  $D_6$ . Essas alterações topológicas não comprometem a funcionalidade do inversor.

6) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR EM PONTE COMPLETA (FULL-BRIDGE), **caracterizado por** utilizar o conversor em ponte completa (FULL-BRIDGE) com quatro enrolamentos secundários no transformador e conectados num circuito formado por dois

interruptores e seis diodos, apresentado na Figura 5, que possibilita a geração de uma corrente ou tensão senoidal na saída do inversor. Essa topologia de inversor denominado Inversor em Ponte Completa Duplo (IPCD) permite transferir energia de uma fonte CC para cargas CA ou para a rede elétrica CA.

7) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR EM PONTE COMPLETA (FULL-BRIDGE), **caracterizado por** permitir que os diodos  $D_5$  e  $D_6$  sejam retirados do circuito do inversor IPCD (Figura 5), ficando o circuito conforme apresentado na Figura 6. Sendo necessário, para não comprometer a operação do inversor, garantir que a corrente no indutor  $L$  seja zero no momento da comutação entre os interruptores  $S_5$  e  $S_6$ .

8) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR EM PONTE COMPLETA (FULL-BRIDGE), **caracterizado por** possibilitar que as mesmas técnicas de chaveamento suave que são utilizadas nos conversores CC-CC em ponte completa sejam utilizadas no inversor IPCD. A Figura 7 apresenta o inversor IPCD com uma indutância ( $L_r$ ) em série com o primário do transformador para possibilitar o chaveamento suave dos interruptores  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ .

9) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR EM MEIA PONTE (HALF-BRIDGE), **caracterizado por** utilizar o conversor em meia ponte (HALF-BRIDGE) com quatro enrolamentos secundários no transformador e conectados num circuito igual ao utilizado pelo inversor IPCD, possibilitando a geração de uma corrente ou tensão senoidal na saída do inversor. Essa topologia de inversor denominada Inversor em Meia Ponte Duplo (IMPD), descrita na Figura 8, permite transferir energia de uma fonte CC para cargas CA ou para a rede elétrica CA.

10) INVERSOR DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR PUSH-PULL, **caracterizado por** utilizar o conversor Push-Pull com dois enrolamentos primários e quatro enrolamentos secundários no transformador e conectados num circuito formado por dois interruptores e seis diodos, apresentado na Figura 9, que possibilita a geração de uma corrente ou tensão senoidal na saída do inversor. Essa topologia de inversor denominada Inversor Push-Pull Duplo (IPPD) permite transferir energia de uma fonte CC para cargas CA ou para a rede elétrica CA.

DESENHOS

Figura 1

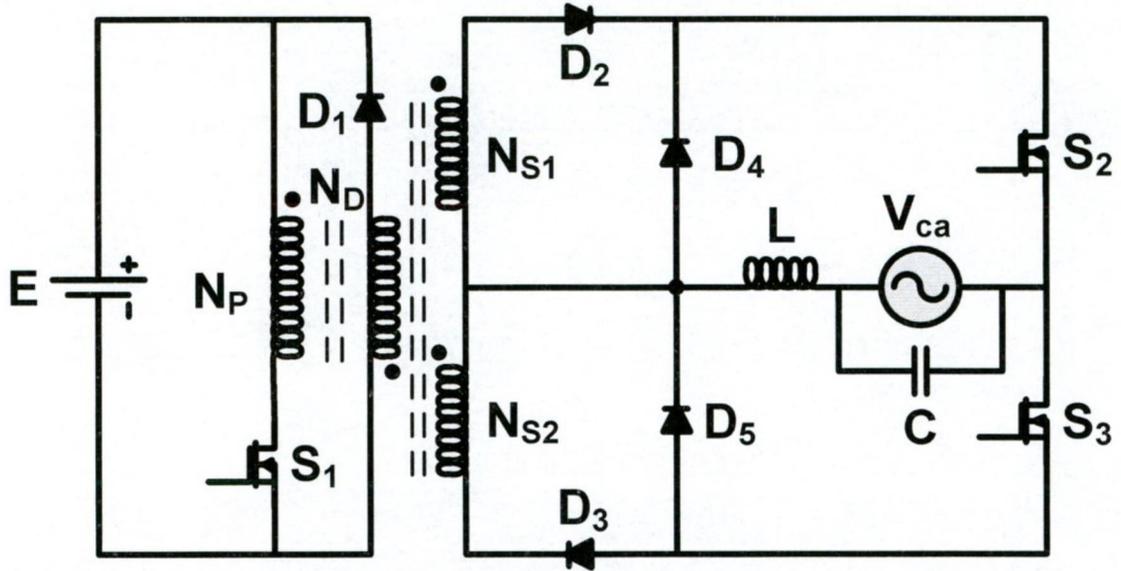


Figura 2

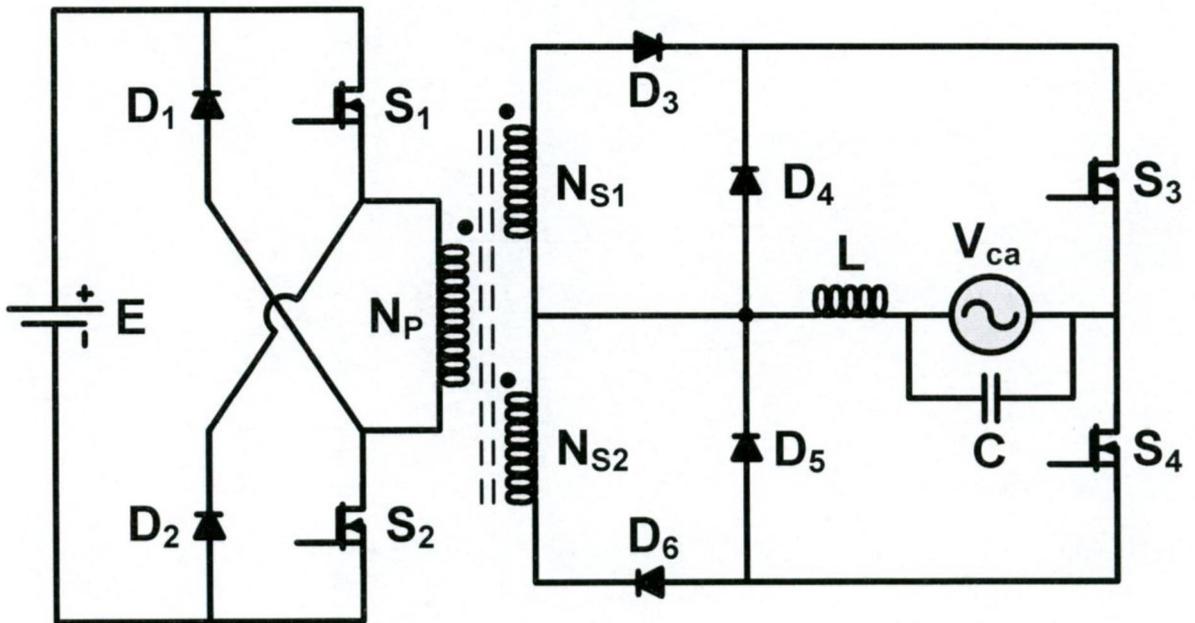


Figura 3

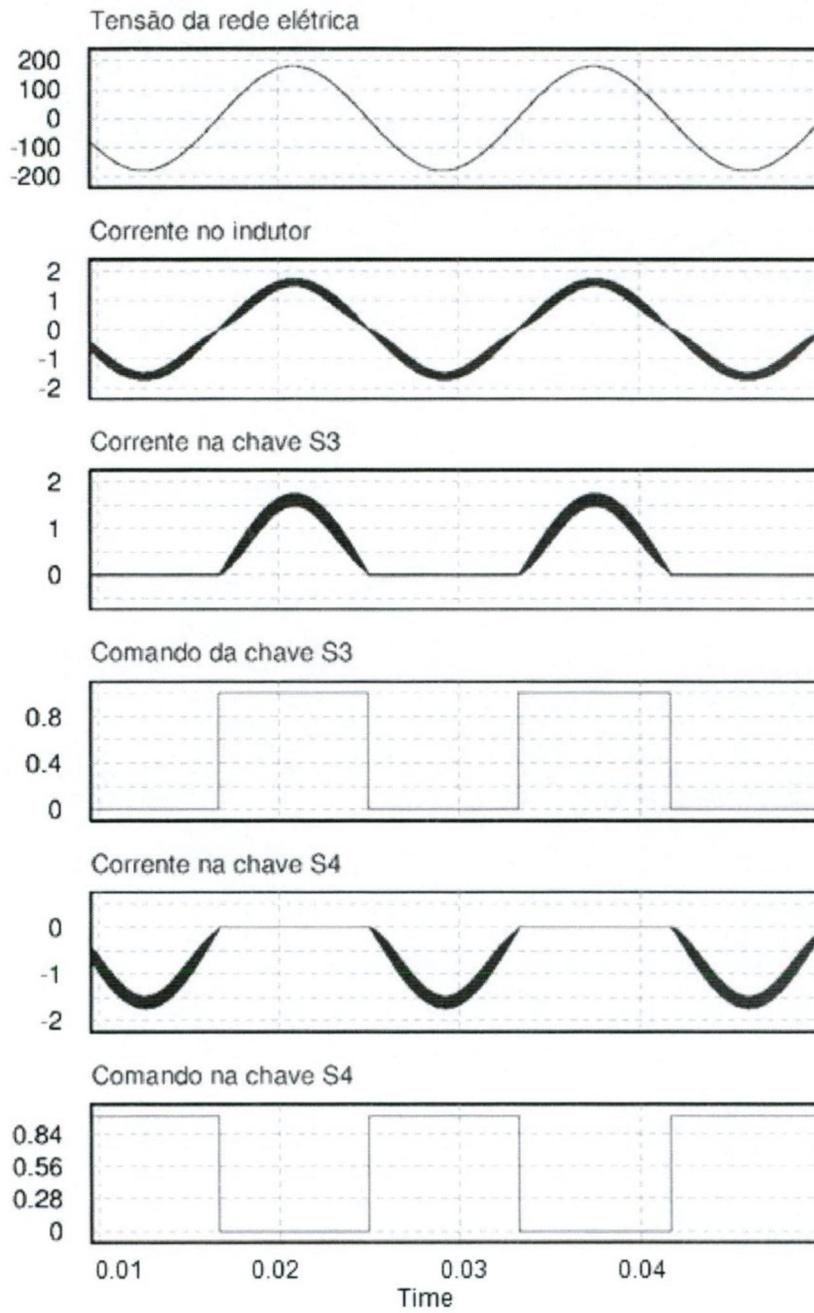


Figura 4

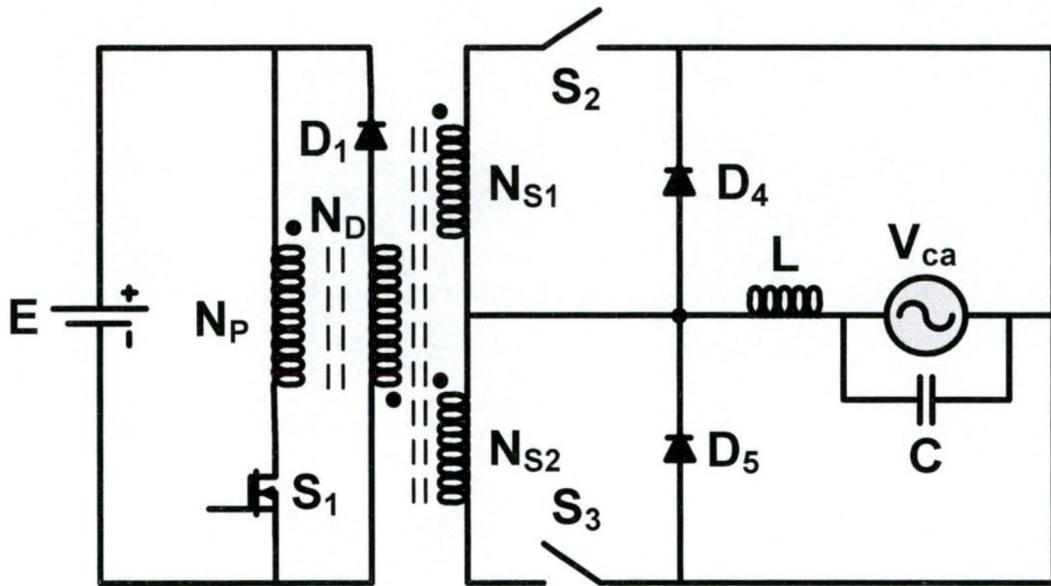


Figura 5

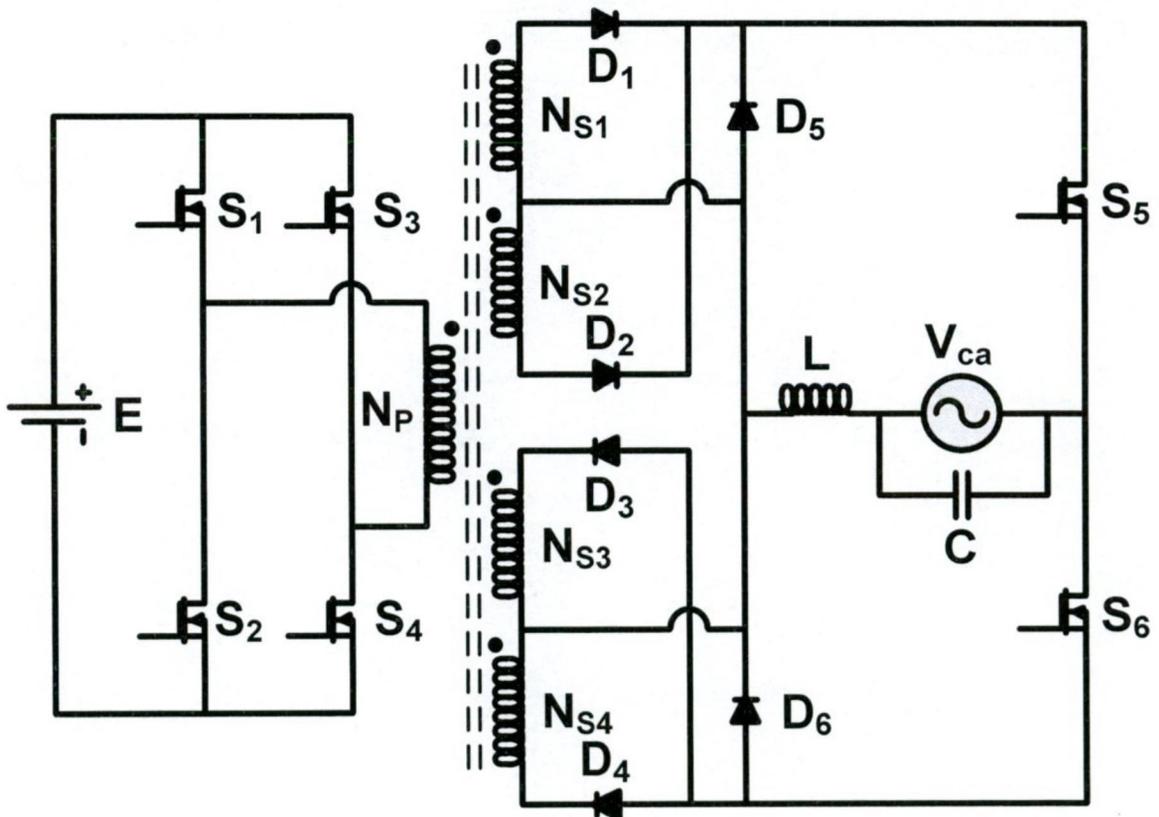


Figura 6

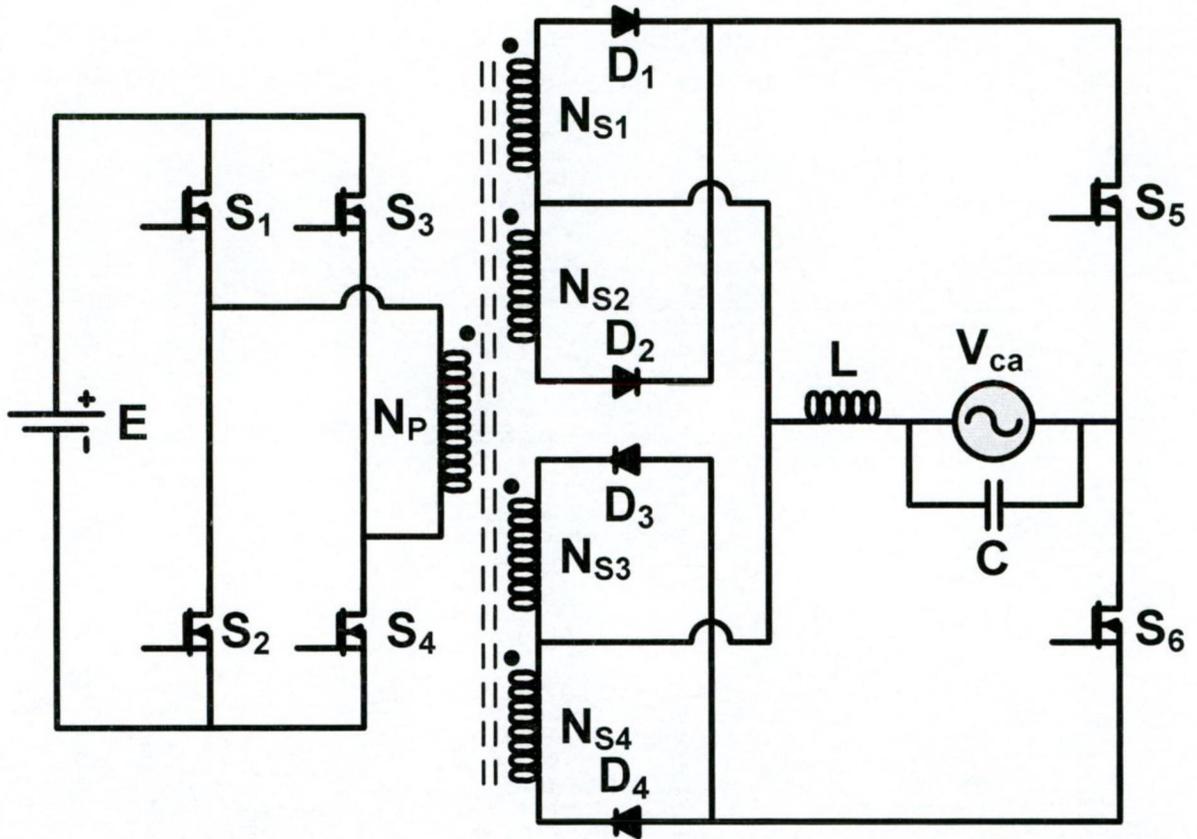


Figura 7

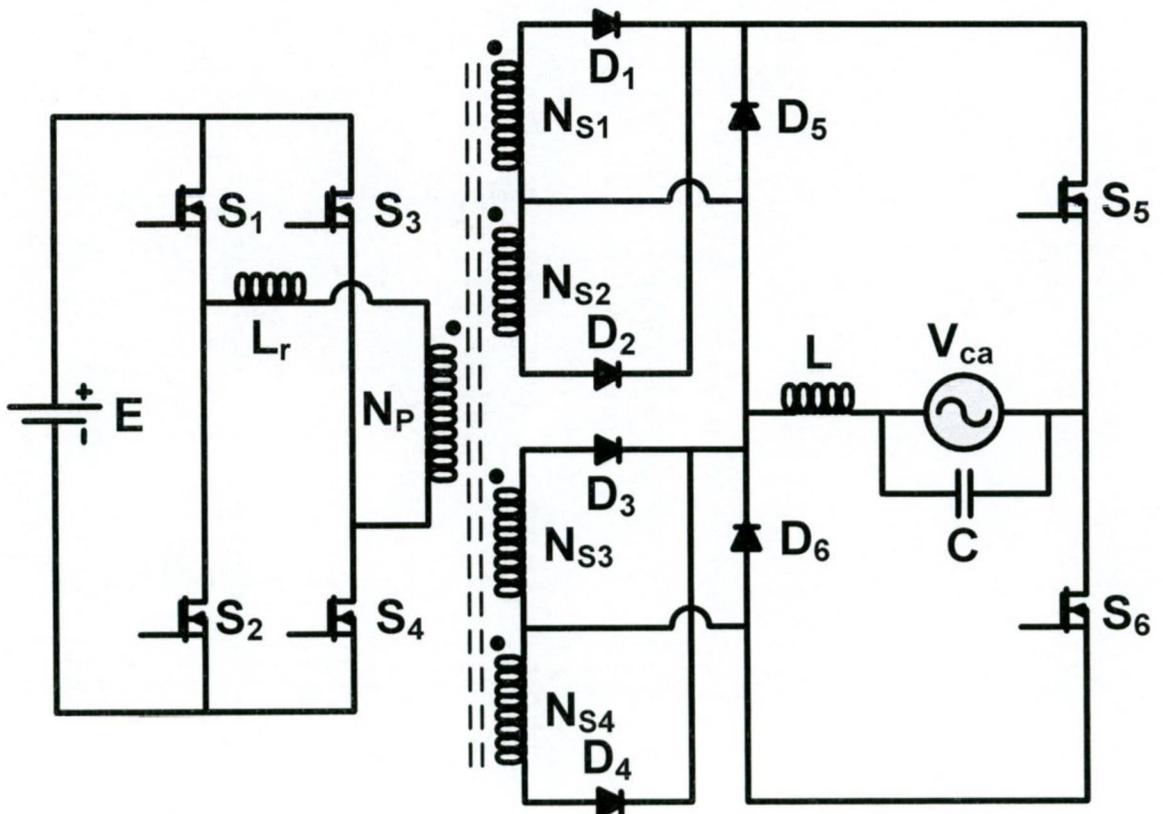


Figura 8

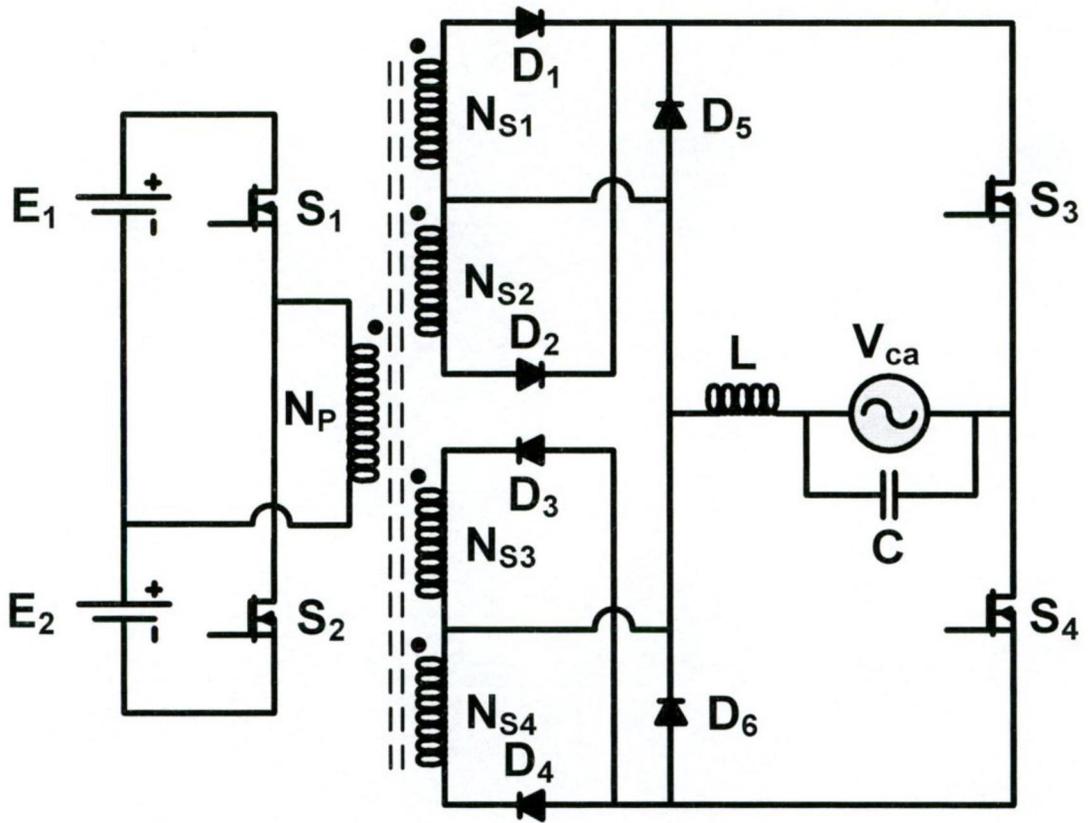
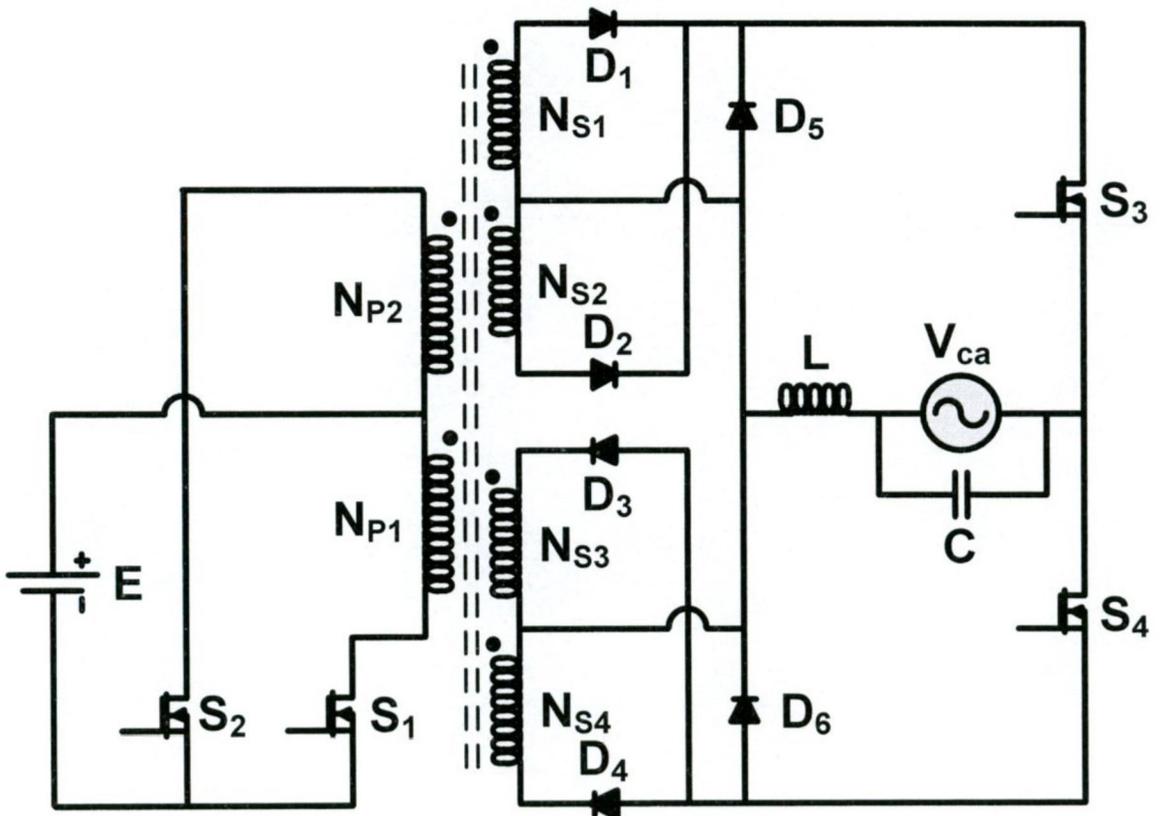


Figura 9



**RESUMO****INVERSORES DE FREQUÊNCIA ISOLADOS COM TRANSFORMADOR EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO O CONVERSOR DIRETO (FORWARD) E OUTRAS TOPOLOGICAS**

Topologias de inversores de frequência que permitem transferir energia de uma fonte CC para cargas CA ou para a rede elétrica CA. As topologias de inversores propostas são modificações do Conversor Direto, do Conversor em Ponte Completa, do Conversor em Meia Ponte e do Conversor Push-Pull. Todas essas topologias utilizam transformadores operando em alta frequência que propiciam a isolação galvânica e a adequação entre tensão de entrada e de saída.