

CONVERSOR CC-CC FB-ZVS-PWM-PS PARA GERAÇÃO DE PLASMA

Marcello Mezaroba, Dr. Eng.; Luis César Fontana, Dr.; Jonathan Dômini Sperb, Eng.; Rafael Luis Klein
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Centro de Ciências Tecnológicas
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante, s/n, CEP: 89.223-100, Joinville, SC - Brasil.
mezaroba@joinville.udesc.br; fontana@joinville.udesc.br; jonathan@joinville.udesc.br; rafaelluisklein@yahoo.com.br

Abstract – Este trabalho apresenta o projeto de um conversor CC-CC FB-ZVS-PWM-PS. Uma de suas principais características é o isolamento em alta frequência, resultando em transformadores menores e comutação suave, diminuindo as perdas de comutação. A fonte pode ser usada para produzir descargas em gases, ou seja, plasma. Para a obtenção da alta tensão necessária para o plasma, são utilizados secundários em série. Apresenta ainda controladores de tensão e corrente independentes, para a contenção de arcos voltaicos e flexibilidade de utilização.

Index Terms — Conversor Isolado, fonte chaveada, plasma.

I. INTRODUÇÃO

O tratamento superficial de materiais é um processo largamente utilizado na indústria para melhorar propriedades características da superfície dos materiais como resistência ao desgaste, resistência à corrosão, refletividade ou absorção de radiação, condutividade e supercondutividade elétrica, catálise entre outras. O método mais utilizado para esta finalidade é o tratamento químico, que tem como principal desvantagem seu alto grau de poluição. Para a mesma finalidade, há também um campo de crescente destaque: tratamento por plasma. O tratamento superficial de materiais por plasma é um processo físico, não poluente, e apresenta vantagens tecnológicas sobre os processos químicos, principalmente no controle dos parâmetros do processo que permitem excelente reprodutibilidade dos resultados.

Diversos resultados experimentais mostram que o plasma (quarto estado da matéria) gera instabilidade eletromagnética no processo, induzindo arcos voltaicos. Tanto a fonte de alimentação quanto o material em tratamento podem ser danificados na ocorrência de um arco intenso.

Para contenção de arcos normalmente utiliza-se fontes de tensão pulsada. Como solução alternativa, procura-se implementar uma fonte de alimentação com um sistema de controle capaz de atuar eficazmente na contenção dos arcos, minimizando seus efeitos.

Desta maneira, propõe-se a utilização de um conversor CC-CC isolado, alimentado a partir da rede elétrica monofásica utilizando um conversor CA-CC, com um sistema permanente de controle de corrente e tensão de saída visando à eliminação de arcos voltaicos e utilizando uma técnica de comutação suave para reduzir as perdas de comutação.

II. CIRCUITO PROPOSTO

O circuito da etapa de potência do conversor é apresentado na figura 1. O conversor CC-CC FB-ZVS-

PWM-PS tem as iniciais das palavras que descrevem suas principais características, que são: FB - Ponte Completa (Full Bridge), ZVS - Comutação sob Tensão Nula (Zero Voltage Switching), PWM - Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation) e PS - Deslocamento de Fase (Phase Shift).

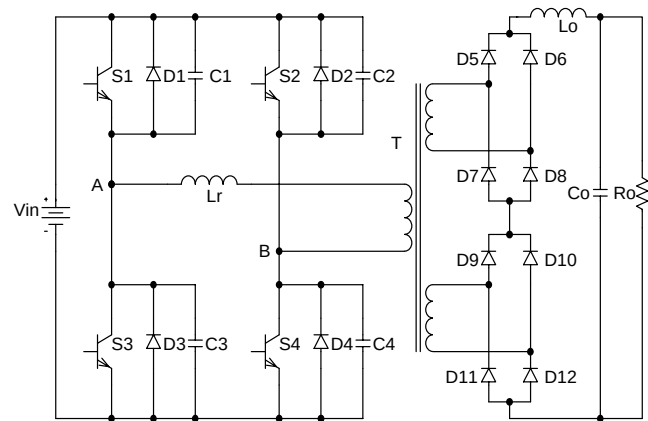


Fig. 1. Circuito proposto.

Na técnica de modulação conhecida como *Phase Shift* (PS) os sinais de comando de cada braço são complementares. A tensão V_{AB} e a potência transferida a carga são controladas pela defasagem entre os sinais de comando dos braços, conforme representado na figura 2.

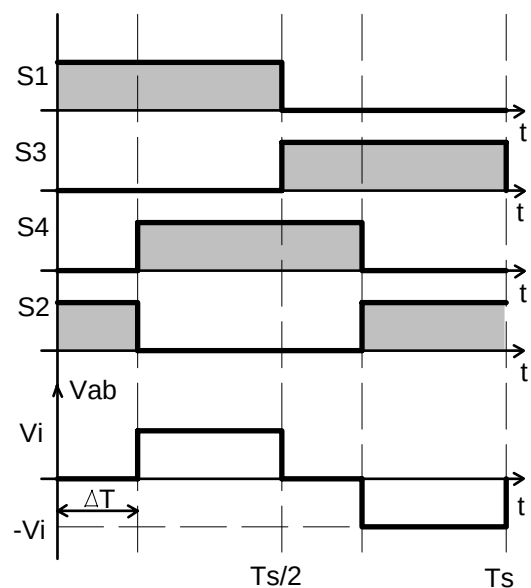


Fig. 2. Sinais de comando e tensão V_{AB}

O conversor utiliza um transformador de alta frequência, que apresenta como vantagem seu volume reduzido em comparação com transformadores em baixa frequência e irá proporcionar a isolamento entrada-saída. Para obter uma alta tensão de saída, utiliza-se o transformador com dois secundários ligados em série, de maneira que a tensão reversa nos diodos de saída seja reduzida.

III. ETAPAS DE OPERAÇÃO

Para simplificar a análise das etapas de operação, o transformador é removido e a carga é representada por uma fonte de corrente ideal, cujo valor é igual a I_0' , que equivale à corrente no secundário referenciada para o primário do transformador. Todos os demais componentes são considerados ideais.

Primeira etapa (t_0-t_1): No instante t_0 a fonte de corrente I_0' , que representa a carga, encontra-se curto-circuitada pelos diodos retificadores de saída. A corrente do indutor ressonante L_r circula por S_2 e D_1 .

Segunda etapa (t_1-t_2): No instante t_1 a chave S_2 é bloqueada. As tensões V_{C2} e V_{C4} , e a corrente I_{Lr} variam de forma ressonante até o instante t_2 , quando a tensão V_{C4} torna-se igual a zero.

Terceira etapa (t_2-t_3): No instante t_2 quando a tensão no capacitor C_4 atinge zero, o diodo D_4 é polarizado diretamente e entra em condução. A corrente no indutor decresce linearmente. Durante esta etapa a chave S_4 deve ser comandada a conduzir.

Quarta etapa (t_3-t_4): Esta etapa inicia no instante t_3 quando a corrente no indutor L_r atinge zero e inverte de sentido, circulando por S_1 e S_4 . A corrente no indutor cresce linearmente e no final desta etapa atinge I_0' .

Quinta etapa (t_4-t_5): Durante esta etapa ocorre a transferência de potência, através de S_1 e S_4 .

Sexta etapa (t_5-t_6): No instante t_5 a chave S_1 é bloqueada. As tensões V_{C1} e V_{C3} variam de forma ressonante até o instante t_6 , quando a tensão no capacitor C_3 torna-se igual a zero.

Sétima etapa (t_6-t_7): No instante t_6 , quando a tensão no capacitor C_3 atinge zero, o diodo D_3 é polarizado diretamente entrando em condução. Durante esta etapa os diodos do estágio de saída se mantêm em curto-circuito e a corrente no indutor L_r circula por D_3 e S_4 .

Oitava etapa (t_7-t_8): No instante t_7 a chave S_4 é bloqueada. As tensões V_{C2} e V_{C4} e a corrente I_{Lr} variam de forma ressonante até o instante t_8 , quando a tensão V_{C2} torna-se igual a zero.

Nona etapa (t_8-t_9): A nona etapa inicia no instante t_8 quando a tensão no capacitor C_2 atinge zero, polarizando diretamente o diodo D_2 . A corrente no indutor decresce linearmente. Durante esta etapa a chave S_2 deve ser comandada a conduzir.

Décima etapa (t_9-t_{10}): No instante t_9 a corrente em L_r atinge zero e inverte de sentido, passando a circular por S_3 e S_2 . Essa mesma corrente cresce linearmente, igualando-se a I_0' no instante t_{10} .

Décima primeira etapa ($t_{10}-t_{11}$): Durante esta etapa ocorre a transferência de potência para a carga através de S_2 e S_3 .

Décima segunda etapa ($t_{11}-t_{12}$): No instante t_{11} a chave S_3 é bloqueada. As tensões V_{C1} e V_{C3} variam de forma linear até o instante t_{12} , quando V_{C1} torna-se igual a zero.

As principais formas de onda para todas as etapas podem ser vistas na figura 3. Os circuitos equivalentes das etapas de operação estão apresentados na Figura 4.

IV. CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

$V_{in} = 311V$
 $V_o = 1000V$
 $V_{o_{máx}} = 1030V$
 $I_{o_{nom}} = 1A$
 $P_o = 1000W$
 $F_s = 70kHz$

Tensão de Barramento
Tensão Nominal de Saída
Tensão Máxima de Saída
Corrente Máxima de Saída
Potência Nominal
Frequência de Chaveamento

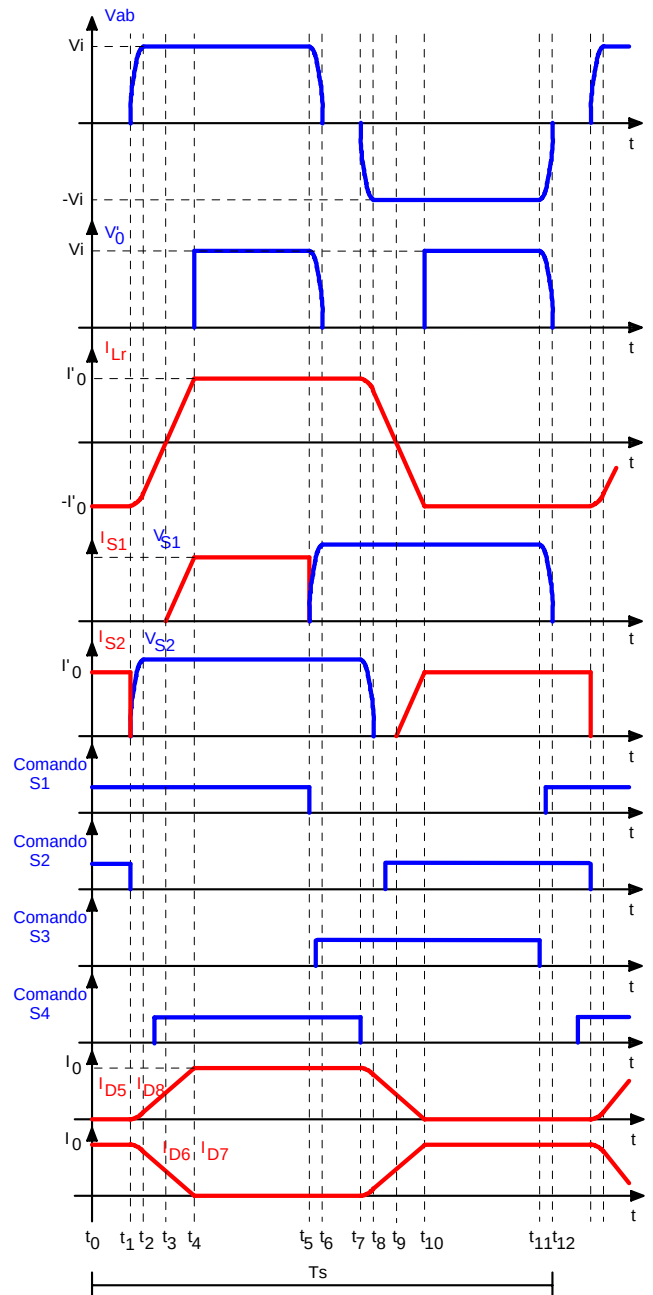


Fig. 3. Principais formas de onda.

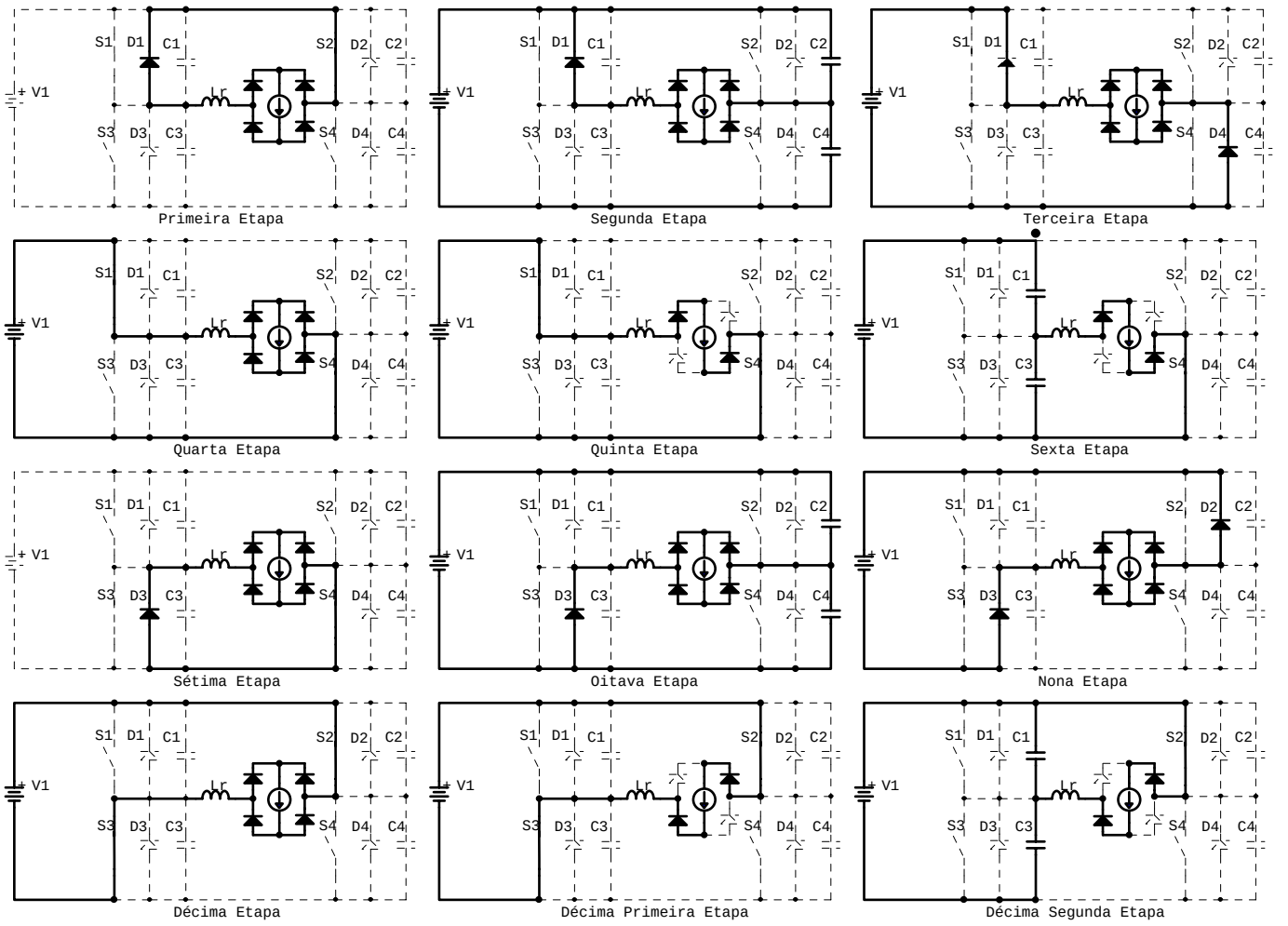


Fig. 4. Etapas de operação.

V. COMANDO E CONTROLE

O diagrama de blocos do circuito de comando e controle pode ser observado na Figura 5.

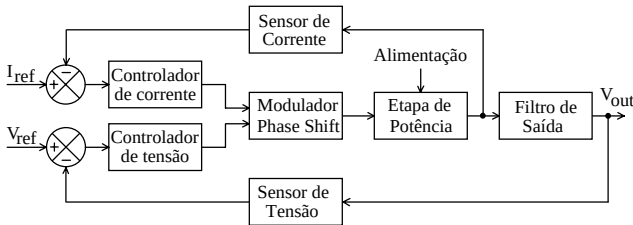


Fig. 5. Diagrama de blocos da lógica de controle.

Foi utilizada uma lógica para o controle em que os sinais de controle são concorrentes, ou seja, ambos os controladores podem atuar nas condições de saída, sendo o controle de corrente predominante. Quando a corrente de saída está abaixo do valor de referência, o controlador de corrente permanece saturado e o controle de tensão mantém a tensão de saída regulada. Se a corrente de saída tentar exceder o valor da referência de corrente, o controlador de corrente

atua de maneira a reduzir a defasagem e, reduzindo a tensão de saída, a corrente de saída fique controlada. Esta lógica de controle permite que ambos os controladores sejam rápidos e consigam controlar de maneira satisfatória tensão e corrente de saída.

A função de transferência da planta de corrente é dada em (1).

$$G_{cor} = 2 \frac{N_s \cdot V_{in} \cdot R_{sh}}{N_p \cdot V_d \cdot L_o} \frac{1}{s} \quad (1)$$

Onde:

N_s : número de espiras do secundário;

V_{in} : tensão de entrada;

R_{sh} : valor da resistência do sensor de corrente;

N_p : número de espiras do primário;

V_d : amplitude da tensão da portadora do integrado;

L_o : indutância do filtro de saída.

Para o controlador de corrente foi utilizada uma estrutura que apresenta dois pólos e um zero, conforme definido em (2).

$$G_{c_{cor}} = K_i \frac{(s + \omega_{zi})}{(s + \omega_{pi})^2} \quad (2)$$

Para o projeto do controlador de corrente foram utilizados os seguintes parâmetros:

Frequência de cruzamento: $F_s/5$;

Frequência do pólo: $F_s/2$;

Frequência do zero: $F_s/40$.

O diagrama de bode do controlador, da planta e a função de transferência de malha aberta para a malha de corrente são mostrados na figura 6.

Para estas condições, a $FTMA_{cor}$ apresenta Margem de fase de $60,3^\circ$ e margem de ganho infinita.

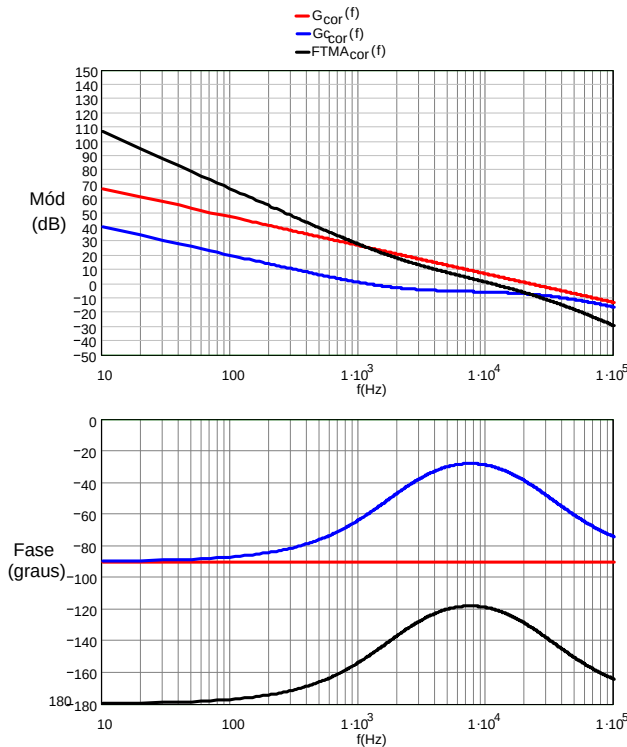


Fig. 6. Diagrama de bode da malha de corrente.

A função de transferência da planta de tensão é apresentada em (3).

$$G_{ten} = \frac{N_s \cdot V_{in} \cdot A_v}{N_p \cdot V_d} \cdot \frac{1}{C_o \cdot L_o \cdot s^2 + \frac{L_o}{R_o} s + 1} \quad (3)$$

Onde:

N_s : número de espiras do secundário;

V_{in} : tensão de entrada;

A_v : ganho do sensor de tensão;

N_p : número de espiras do primário;

V_d : amplitude da tensão da portadora do integrador;

L_o : indutância do filtro de saída;

C_o : capacitância do filtro de saída;

R_o : resistência nominal da carga.

Para o controlador de tensão foi utilizada uma estrutura que apresenta dois pólos e dois zeros, conforme definido em (4).

$$G_{c_{ten}} = K_v \frac{(s + \omega_{zv1})(s + \omega_{zv2})}{(s + \omega_{pv})s} \quad (4)$$

Para o projeto do controlador de corrente foram utilizados os seguintes parâmetros:

Frequência de cruzamento: $F_s/120$;

Frequência do pólo: $F_s/4$;

Frequência dos zeros: $\sqrt{C_o/L_o}$ (freq. dos pólos da planta).

O diagrama de bode do controlador, da planta e a função de transferência de malha aberta para a malha de tensão são mostrados na figura 7.

Para estas condições, a $FTMA_{ten}$ apresenta Margem de fase de $99,5^\circ$ e margem de ganho infinita.

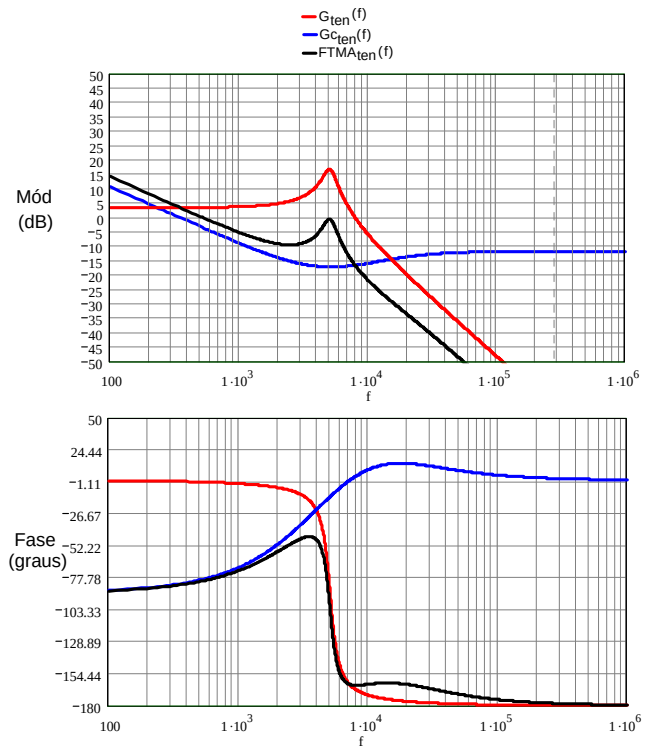


Fig. 7. Diagramas de bode da malha de tensão.

O controlador foi desenvolvido utilizando amplificadores operacionais. Para obter o deslocamento de fase dos pulsos de comando, utilizou-se o integrador UC 3875.

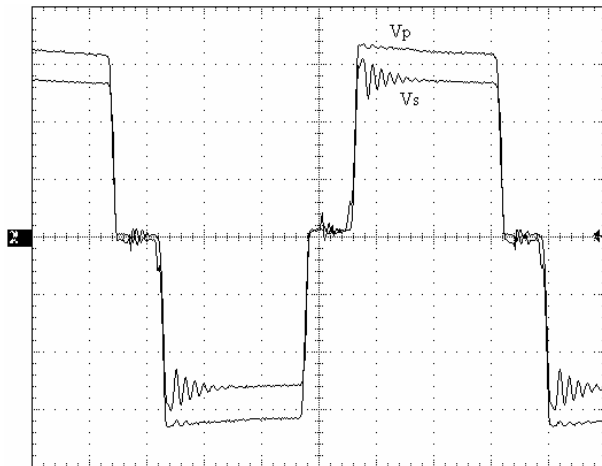
VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os principais componentes do circuito são apresentados na Tabela 1. A Figura 8 mostra a forma de onda de tensão no primário do transformador e de um dos secundários, para potência nominal, com carga resistiva. Pela tensão do secundário pode-se observar a tensão reversa nos diodos de saída em torno de 750V.

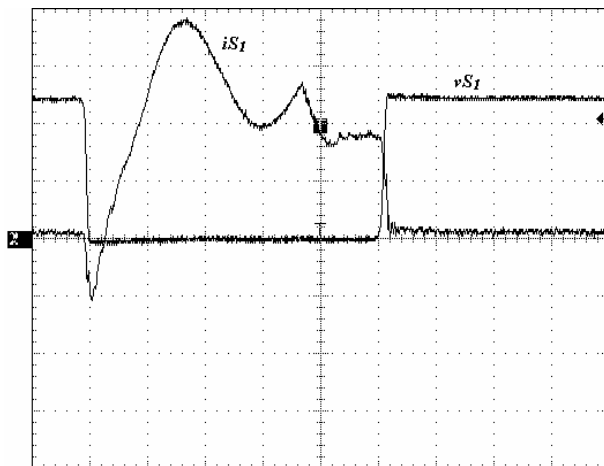
TABELA I

Principais componentes do Circuito de Potência

Elemento	Tipo/Valor	Detalhes
$S_1 - S_4$	IRGP35B60PD	IGBT - International Rectifier
$D_5 - D_{12}$	MUR 8100	Diodo Ultra Rápido
L_o	1,9mH	Indutor com núcleo de Ferrite.
C_o	500 nF	Capacitor de Polipropileno
L_r	6,6 μ H	Indutor com núcleo de Ferrite.
T	$\frac{N_s}{N_p} = 2,16$	Transformador, um primário, dois secundários

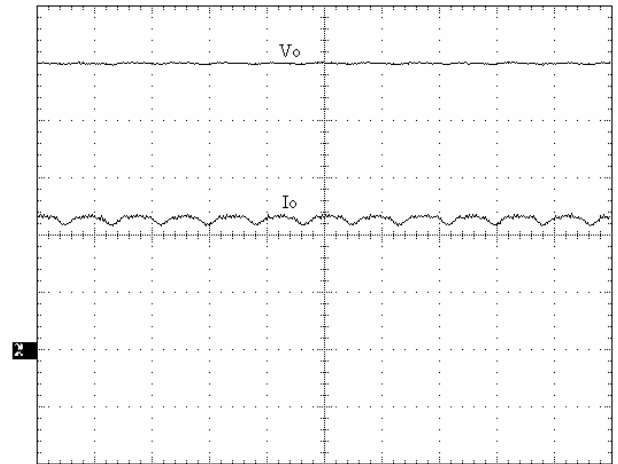
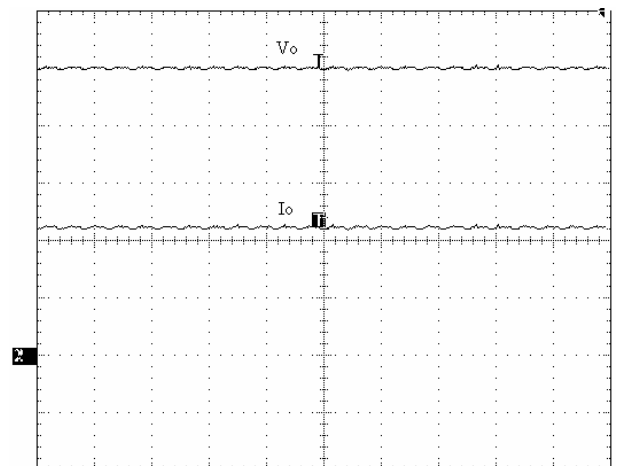
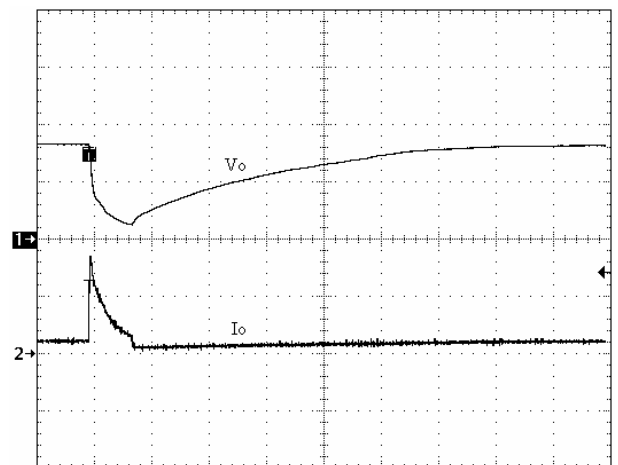
Fig. 8. Tensões no primário e secundário do transformador.
(100V/div, 250V/div, 2 μ s/div)

A ocorrência de comutação suave pode ser vista na Figura 9. Há uma pequena sobreposição no instante do bloqueio, proveniente da circulação da corrente pelo capacitor intrínseco da chave.

Fig. 9. Tensão e corrente na chave.
(100V/div, 1A/div, 2 μ s/div)

A tensão e a corrente aplicadas em carga resistiva podem ser observadas na Figura 10. As formas de onda foram adquiridas com tensão e corrente ligeiramente acima da nominal. Ensaiou-se o conversor ligando-o ao reator de plasma.

Neste caso, obteve-se a tensão de saída máxima do conversor, com corrente reduzida. As formas de onda de tensão e corrente de saída podem ser observadas na figura 11.

Fig. 10. Tensão e corrente na saída.
(200V/div, 500mA/div, 2 μ s/div)Fig. 11. Tensão e corrente de saída do conversor, no plasma.
(200V/div; 200mA/div, 20ms/div)Fig. 12. Tensão e corrente de saída na ocorrência de um arco.
(500V/div, 5A/div, 500 μ s/div)

Pode-se observar tensão e corrente de saída do conversor durante a ocorrência de arcos na figura 12. Observa-se o comportamento transitório da tensão e o pico de corrente provocado pela descarga do capacitor de saída.

Foram também levantadas curvas de tensão versus corrente para a geração de descargas elétricas em gases (plasma), utilizando o conversor. No ensaio foi utilizado gás nitrogênio puro à baixa pressão ($\sim 10^{-4}$ atm; 1,0 mBar). A descarga é feita entre dois eletrodos dentro de uma câmara de vácuo. O eletrodo utilizado como catodo da descarga, em nosso experimento, é uma peça de cobre, com o formato e dimensões mostradas na figura 13.

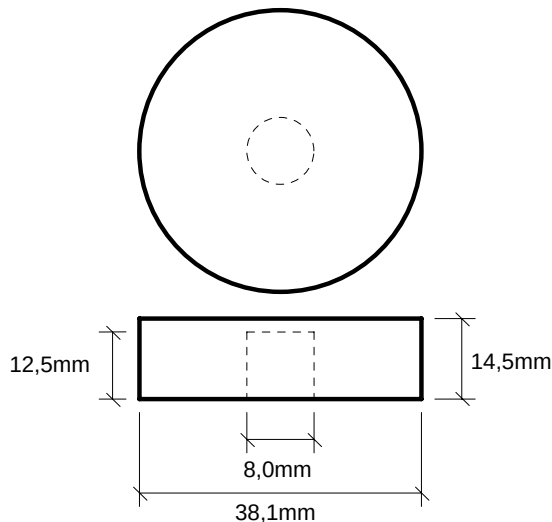


Fig. 13. Eletrodo usado como catodo da descarga em um meio gasoso (plasma de nitrogênio).

Para diversos valores de pressão foi medida a corrente em função da tensão aplicada. Os gráficos de tensão versus corrente podem ser vistos na figuras 14 e 15. O estado de plasma apresentou-se bastante estável. Os micro-arcos voltaicos, que é um fenômeno característico de plasma produzido entre dois eletrodos, foram atenuados pela forma de alimentação da fonte. Isso permitiu elevar a temperatura do catodo até cerca de 1000°C pelo bombardeamento iônico dos íons produzidos no plasma.

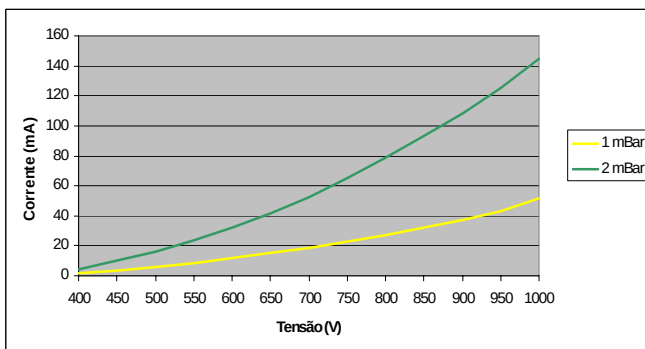


Fig. 14. Característica tensão x corrente em Plasma de nitrogênio a 1 mBar e 2 mBar.

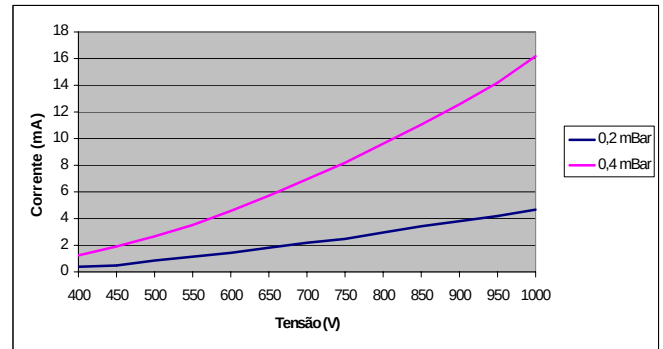


Fig. 15. Característica tensão x corrente em Plasma de nitrogênio a 0,2 mBar e 0,4 mBar.

A figura 16 mostra o aspecto final do conversor montado. A figura 17 mostra o reator onde foi ensaiado o conversor.



Fig. 16. Reator de Plasma utilizado nos ensaios.

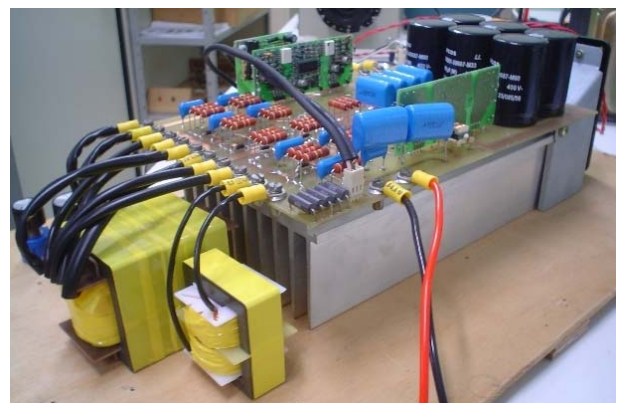


Fig. 17. Conversor montado.

VII. CONCLUSÕES

A utilização do conversor CC-CC FB-ZVS-PWM-PS é bastante vantajosa, pois o circuito apresenta diversas características apreciáveis em circuitos chaveados. A técnica da comutação suave é extremamente interessante, pois melhora o rendimento do conversor, uma vez que as perdas de comutação tornam-se bastante reduzidas. A utilização de uma frequência de chaveamento alta (70kHz) implica na redução considerável dos componentes magnéticos. Entretanto, para frequências mais elevadas, técnicas alternativas para construção dos elementos magnéticos devem ser utilizadas, principalmente visando redução do efeito de proximidade e do efeito Skin.

A comutação suave só acontece quando há energia suficiente armazenada no indutor ressonante, ou seja, para potências próximas à nominal. Para potências muito baixas, a comutação suave deixa de acontecer e as perdas de comutação aumentam sensivelmente. Entretanto, com potência abaixo da nominal, as perdas por condução são menores compensando o aumento das perdas por comutação.

Utilizando dois secundários, com retificação em ponte completa, em série, foi possível alcançar a alta tensão necessária para fazer a ignição do plasma, sem que para isso fosse necessário o uso de diodos com tensão reversa muito elevada.

Pôde-se observar que o sistema de controle de corrente mostrou-se muito eficaz na contenção de arcos. Com a utilização do controlador de corrente, a ocorrência de arcos e seus efeitos desastrosos são minimizados e, com isso, elimina-se a possibilidade de danificar a fonte.

Com a utilização conjunta do controle de tensão, obteve-se como diferencial a possibilidade de ter-se uma tensão de saída estabilizada, constante e controlada durante os períodos de operação normal (sem arco) e controlada em corrente na presença de arcos. Devido ao pequeno capacitor de saída utilizado, pôde-se verificar que os arcos são controlados e

não há energia suficiente no capacitor de saída para que ocorram problemas durante o processo, na eventual ocorrência de arcos.

A utilização de controles concorrentes possibilitou o uso de frequências de cruzamento altas e desempenho dinâmico bastante rápido em ambos os controladores, garantindo o bom funcionamento do conversor no plasma, mesmo na presença de arcos.

A descarga produzida em atmosfera de nitrogênio, alimentada por este tipo de fonte, mostrou-se muito eficiente para a aplicação em tratamento de superfícies de materiais, como nitretação por plasma. O bombardeamento iônico do catodo proporcionou uma grande taxa de transferência de energia, elevando rapidamente a sua temperatura para aproximadamente 1000°C.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Barbi, F. P. Souza, "Conversores CC-CC Isolados de Alta Frequência com Comutação Suave", Edição dos Autores, Florianópolis, 1999.
- [2] I. Barbi, "Projetos de Fontes Chaveadas", Edição do Autor, Florianópolis, 2001.
- [3] A. Martignoni, "Transformadores", Editora Globo, Porto Alegre, 1977.
- [4] R. P. T. Bascopé, A.J. Perin, "O Transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de Potência", Sagra Luzzatto, Porto Alegre, 1997.
- [5] M. L. Heldwein, "Unidade Retificadora Trifásica de Alto Desempenho para Aplicação em Telecomunicação", Tese de Mestrado, Florianópolis, 1998.
- [6] S. V. G. Oliveira, "Otimização de Projeto de Fontes de Alimentação para Centrais de Telecomunicações", Tese de Mestrado, Florianópolis, 2001.