

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM CONVERSOR DE ALTA FREQUÊNCIA BASEADO EM INVERSORES RESSONANTES COM COMUTAÇÃO SEQUENCIAL PARA ALIMENTAÇÃO DE UMA TOCHA DE PLASMA INDUTIVA

RICARDO F. PINHEIRO FILHO, JEAN PAUL DUBUT, ANDRÉS O. SALAZAR *, ANDRÉ L. MAITELLI *

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Centro Regional de Natal e Fortaleza – CRN
Rua Carlos Serrano, nº 2073 – CP 130
59001-970 – Lagoa Nova, Natal - RN (Brasil)
fone: +55 84 32314733 – fax: +55 84 32314941
ricfilho@gmail.com, jean@crn.inpe.br

* Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Dept. de Eng. de Computação e Automação - DCA
Campus Universitário, s/nº
59072-970 – Natal - RN (Brasil)
Fone: +55 84 32153696 – Fax: +55 84 32513767
andres@dca.ufrn.br, maitelli@dca.ufrn.br

Abstract— This paper presents the analysis and the design methodology of a DC/AC high frequency serie-resonant load converter based on the gate pulsing method with purpose to excite a inductively coupled plasma torch. This converter is composed of four full-bridge parallel modules, operating at 450 kHz frequency and using ZVS soft switching techniques.

Keywords— resonant converter; soft switching; gate pulsing method; RF power supply.

Resumo— Apresenta-se, neste artigo, a análise e a metodologia de projeto de um conversor CC/CA série-ressonante de alta frequência, baseado em inversores acionados sequencialmente, destinado à excitação de uma tocha plásmica indutiva. Este conversor é constituído por quatro módulos paralelos idênticos, em configuração ponte completa, e opera na frequência nominal de 450 kHz empregando técnicas de comutação suave ZVS.

Palavras chave— conversor ressonante; comutação suave; acionamento sequencial; fonte RF.

I. INTRODUÇÃO

O conversor CC/CA ressonante de alta frequência, descrito neste artigo e foco central desde trabalho, é parte integrante de uma fonte RF de 50kW destinada a equipar uma planta experimental de tratamento de resíduos industriais por plasma térmico [1]. Para situar o contexto que motivou o desenvolvimento deste projeto, é necessário conhecer as recentes exigências impostas pela legislação ambiental e sanitária do país, agências nacionais de regulamentação [2] (CONAM, ANVISA, COVISA, etc.) e por outros órgãos de fiscalização ambiental, que obrigam o setor industrial e hospitalar a dar um tratamento adequado e um destino apropriado aos resíduos produzidos. Face aos altos custos de processamento, acondicionamento e descarte decorrentes dessas novas exigências, os resíduos passaram, então, a receber um novo enfoque, podendo ser reciclados ou, ainda, dissociados para produzir energia térmica e/ou elétrica, em esquema de co-geração. A planta piloto, em fase de implantação no DCA/DFTE/UFRN [3], objetiva demonstrar o potencial desta tecnologia e estendê-la a novos campos de aplicação, notadamente ao tratamento de resíduos hospitalares contaminados e resíduos radioativos, bem como servir de campo experimental para o desenvolvimento de novos dispositivos e equipamentos ligados ao segmento.

O enfoque dado a este artigo é analítico, de forma a analisar detalhadamente a operação da topologia inversora adotada e desenvolver uma metodologia confiável de projeto a ser utilizada na realização prática da fonte, buscando não prender-se a detalhes decorrentes da complexidade da planta completa onde operam esses dispositivos. Apresentando o detalhamento matemático do conversor ressonante de alta frequência, a metodologia que levará ao dimensionamento dos

principais dispositivos constituintes de sua topologia, bem como as estratégias de controle adotadas para o seu comando e acionamento.

II. DESCRIÇÃO DA PLANTA

A planta experimental de tratamento de resíduos industriais por plasma térmico é constituída, essencialmente, por uma tocha de plasma indutiva, uma fonte RF de potência, um reator de processo e demais sistemas auxiliares associados. O conversor ressonante de alta frequência descrito neste artigo é parte integrante da fonte RF. A Fig. 1 traz um desenho da tocha indutiva utilizada, apresentando suas partes componentes.

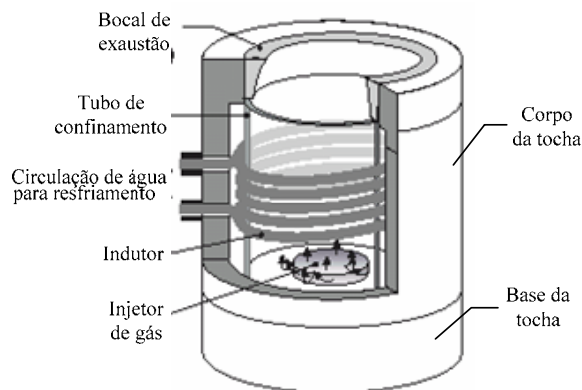


Fig. 1 – Tocha plásmica indutiva.

A fonte RF é composta por dois conversores estáticos de potência. O primeiro deles se constitui em um retificador boost trifásico operando como pré-regulador do fator de potência [4], que fornece uma tensão contínua de 800V @ 75A no barramento. O segundo conversor é do tipo inversor série-ressonante, operando a aproximadamente 450kHz sob potência nominal de 50kW, fornecendo a corrente senoidal de excitação para a tocha indutiva.

O retificador boost trifásico emprega técnicas de modulação vetorial para sintetizar as correntes de linha e implementar a correção do fator de potência.

O conversor CC/CA série-ressonante empregado é arquitetado sobre um conjunto de quatro células inversoras em ponte completa, agrupadas em configuração paralela e acionadas segundo um padrão seqüencial. Um transformador de alta frequência, construído sobre um núcleo de ferrite, é inserido entre o conversor e a tocha a plasma para prover a adaptação de impedâncias necessária. Adicionalmente, isola galvanicamente a tocha indutiva da rede de energia elétrica, eliminando o risco de eletrocussão. As pontes inversoras são equipadas com dispositivos IGBT's de tecnologia NPT, que oferecem substancial redução das perdas de comutação em altas frequências. O conjunto de módulos IGBT's é montado sobre um bloco dissipador em alumínio resfriado por um fluxo de ar forçado que acomoda também os *drivers* de acionamento. A geração dos comandos de disparo, da estratégia de controle, seqüência de operação dos inversores, processamento dos diversos sinais de amostragem, bem como o rastreo da frequência de ressonância da carga é provido por um módulo DSP TMS320F2812 da *Texas Instruments*. Toda a interconexão necessária entre o DSP e os módulos de excitação dos IGBT's é feita por fibra óptica, eliminando assim, o risco de possíveis interferências por EMI nos pulsos de comando. O controle da frequência de comutação é feito de modo a garantir a operação dos inversores em modo de comutação suave, empregando técnicas ZVS, que minimizam as perdas na sua operação e o desgaste dos dispositivos, possibilitando alcançar potências de operação mais elevadas. A programação do DSP é realizada em linguagem ANSI C, através de um ambiente próprio, agrupando um conjunto de funções pré-estabelecidas.

Fisicamente, os conversores são integrados em dois bastidores no padrão de 19", com 32U de altura interna útil. A fonte RF é alimentada por uma rede trifásica de 380V e dispõe de diversas funcionalidades auxiliares, tais como circuitos de proteção, acionamento, medição e monitoramento dos principais parâmetros operacionais.

A estrutura modular adotada na concepção do projeto e na construção da fonte possibilitará que sejam feitas, eventualmente, novas associações de módulos, de forma a obter níveis de potência mais elevados para equipar plantas de maior capacidade.

III. TOPOLOGIA DO CONVERSOR

O conversor CC/CA série-ressonante descrito neste texto é constituído por um conjunto de quatro inversores em ponte completa de IGBT's, do tipo SKM200GB125D ultra-rápidos, operando com potência nominal de 50kW. Esses dispositivos semicondutores foram escolhidos por apresentar menores tempos típicos de comutação, da ordem de 80ns e 350ns, na entrada em condução e no bloqueio, respectivamente. Cada módulo IGBT permite o

manejo de até 200A de corrente, suporta tensões de operação de até 1200V e possui diodos ultra-rápidos em antiparalelo internos ao seu encapsulamento.

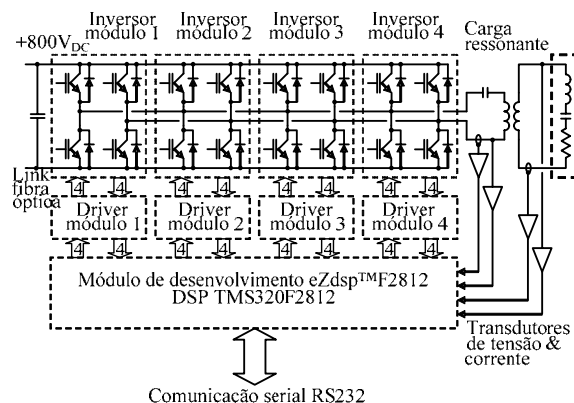


Fig. 2 – Esquema completo do módulo inversor série-ressonante.

A Fig. 2 apresenta o esquema de ligação das quatro pontes inversoras que compõem o conversor CC/CA série-ressonante. Para a realização do par ressonante empregam-se capacitores em série com os terminais comuns de saída do conjunto, utilizando como indutância de ressonância a própria tocha plásmica indutiva, cujo valor de indutância aproximado é de cerca de 3,7μH [1]. O par ressonante define, além da frequência de ressonância do sistema, a sua impedância característica, segundo (1) e (2). Assim sendo, a escolha da capacitância ressonante será feita de modo a obter-se a frequência desejada. O que se torna uma limitação do projeto, pois a escolha de uma determinada frequência de ressonância implica, diretamente, no valor da impedância característica do próprio par ressonante.

$$\omega_o = 2\pi f_o = \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}} \quad (1)$$

$$z_o = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} \quad (2)$$

Como já foi mencionado, a geração dos pulsos de comando para os interruptores, o estabelecimento da estratégia de controle e da seqüência de acionamento dos comandos das estruturas inversoras são providos por um microprocessador DSP TMS320F2812. Outra função desempenhada pelo DSP é a de rastrear a frequência de ressonância da carga, a fim de garantir a manutenção da condição de operação na região de comutação ZVS do inversor, região em que a frequência de comutação do sistema é superior à frequência de ressonância empregada. A Fig. 3 ilustra o padrão de seqüenciamento adotado e focaliza a operação ZVS dos interruptores. Além da geração dos diversos sinais necessários ao comando e controle do conversor, o DSP implementa as diversas funcionalidades adicionais requeridas, tais como proteção e supervisão do sistema,

monitoramento das variáveis necessárias à realização do controle e detecção de falha dos módulos. A interface externa com a fonte RF é realizada através de uma comunicação serial no padrão RS 232C.

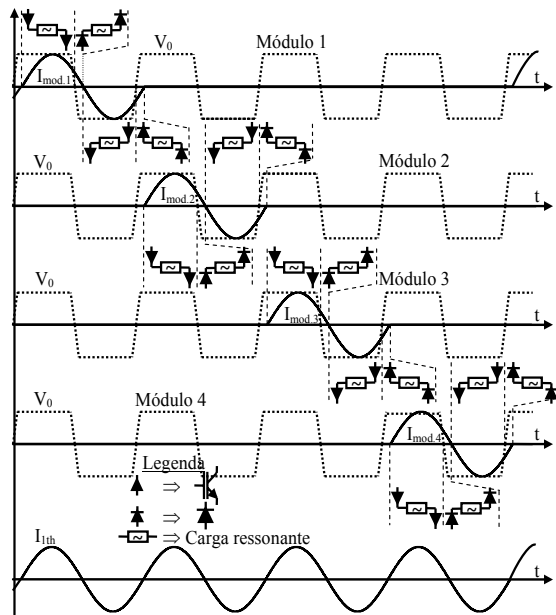


Fig. 3 – Sequência dos pulsos de acionamento das células inversoras.

O transformador de alta frequência é construído sobre um núcleo de ferrite, com enrolamentos constituídos por placas de circuito impresso, empilhadas e imersas em óleo isolante. Este transformador tem a finalidade de adaptar a impedância da carga ao inversor série-ressonante, bem como isolar galvanicamente, da rede de energia elétrica, a tocha indutiva. As correntes e tensões na saída dos inversores, transformador e circuito ressonante são medidas por transdutores de alta frequência, fornecendo os sinais necessários para os circuitos de realimentação das malhas de controle.

IV. ANÁLISE QUALITATIVA DA ESTRUTURA

Para realizar as simulações e o equacionamento descritivo da operação do conversor CC/CA série-ressonante utiliza-se o circuito simplificado da Fig. 4. Tendo em vista a tensão aplicada ao par ressonante e à carga através do transformador conectado à saída do grupo inversor, essa simplificação não altera a análise do funcionamento do sistema, sendo, portanto, completamente aceitável. O circuito composto por uma única estrutura em ponte completa, operando em uma frequência de comutação quatro vezes superior à frequência das quatro estruturas componentes do inversor, pode ainda ser simplificado da forma como é mostrado na Fig. 5.

A resistência série R_o observada no circuito da Fig. 5 é a própria resistência do plasma, referida ao lado primário da tocha indutiva [5, 6]. A essa resistência é aferido o valor típico observado em aplicações deste tipo, entre 0,25 e 1,25 Ω [6]. O valor

empregado na maior parte da análise aqui apresentada é de 0,6 Ω .

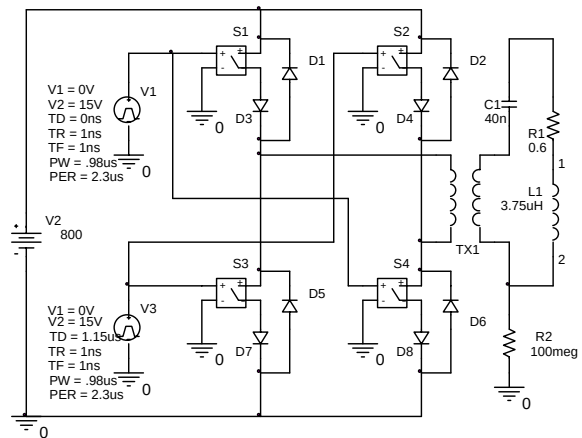


Fig. 4 – Esquema elétrico do módulo inversor simplificado.

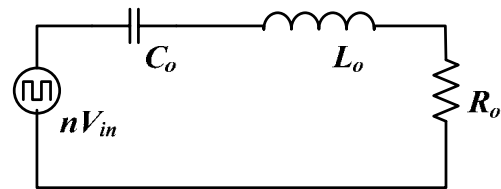


Fig. 5 – Circuito equivalente utilizado no estudo do conversor.

O controle da potência transmitida pelo conversor à tocha indutiva deve levar em conta diversos fatores, como será demonstrado no equacionamento do sistema. Dentre eles a tensão aplicada ao par ressonante, derivada da tensão de entrada no barramento CC do retificador sob influência da relação de transformação utilizada, a relação entre as frequências de ressonância e comutação do sistema e a resistência oferecida pelo plasma. Além da impedância característica encontrada no par ressonante empregado. Todos esses fatores devem ser levados em conta no projeto do conversor, na determinação da sua faixa de operação mais apropriada, bem como na elaboração da técnica de controle utilizada.

Além dos fatores envolvidos no controle da potência de saída do conversor, deve-se levar em conta também a necessidade de garantir a sua operação na região de comutação suave, observada quando a frequência da tensão de saída é superior à frequência de ressonância do seu circuito LC. Considerando também a necessidade de adotar-se um tempo-morto entre os pulsos de comando dos conversores para evitar curtos-circuitos e a consequente destruição dos dispositivos semicondutores, entende-se que é imperativo levar-se em conta este tempo-morto no controle pela frequência da faixa de operação do conversor. Assim sendo, opta-se por realizar um controle da fase entre tensão e corrente no par-ressonante através da frequência de comutação do circuito, tendo em vista garantir essa condição de trabalho, deixando o controle da potência atrelado ao nível da tensão CC de entrada do sistema.

Outro detalhe que deve ser analisado é a necessidade de fornecer a potência desejada ao secundário do transformador sem exceder os limites de energia que os dispositivos semicondutores são capazes de processar. Na operação em modo ressonante, uma vez aplicada a tensão do barramento sobre o par-ressonante, a potência drenada da fonte de alimentação é limitada apenas pela resistência do plasma referida para o lado do conversor. Daí a necessidade de utilizar-se do transformador RF também como um método para realizar o casamento de impedâncias entre a carga e a fonte CC, fazendo o conversor fornecer um nível adequado de potência sem, no entanto, comprometer os demais elementos do circuito. Como a indutância ressonante é determinada pela própria tocha indutiva, a frequência do par ressonante será determinada pela capacitância empregada em série com a mesma, assim como se dará com a sua impedância característica.

A impedância característica observada no circuito é um dos fatores que determinam e limitam a potência drenada pelo conversor série ressonante, sendo, portanto, um parâmetro importante de projeto. Caso seja apropriado alterar-se este parâmetro, tem-se que pensar nas limitações impostas pelo uso da própria tocha indutiva no circuito ressonante. Segundo (1) e (2), tem-se que uma redução na impedância característica provido pelo aumento da capacitância ressonante, acarreta em mudança na frequência a ser sintonizada. Recuperar o valor de frequência anteriormente adotado torna-se impraticável, em virtude do valor mínimo de indutância encontrado no indutor da tocha. Em caso contrário, ainda há a possibilidade de elevar-se a impedância característica através da redução de capacitância, sendo necessário, para tanto, o emprego de um indutor externo para sintonizar a frequência desejada. Este recurso pode ser utilizado caso haja a necessidade de limitar a potência de saída do conversor para proteger os interruptores de níveis excessivos de corrente.

Todos esses fatores exercem influência direta nas decisões de projeto que devem ser tomadas. Tendo em vista cada um deles, e a partir da análise matemática apresentada a seguir, é que se tem condições de determinar os parâmetros mais adequados do par ressonante, relação de transformação do transformador RF e dispositivos semicondutores a serem adotados para o conversor CC/CA.

V. ANÁLISE MATEMÁTICA DA ESTRUTURA

Inicia-se a análise matemática pela apresentação da função de transferência da corrente de saída pela tensão CC de entrada do conversor. Essa função de transferência, dada por (3) e cujos diagramas de Bode podem ser vistos na Fig. 6, será utilizada para obter-se o compensador, que vai atuar sobre a referência de tensão do retificador PWM para adequar a tensão do barramento CC às necessidades de fornecimento de energia do inversor.

Foram adotados, para um projeto inicial do par ressonante, os valores aproximados de $f_o = 410\text{kHz}$, $z_o = 10\Omega$ e $R_o = 0,6\Omega$, para uma $n = 0,5$.

$$G(s) = \frac{i_{out}(s)}{V_{in}(s)} = n \frac{4}{\pi} \frac{\frac{Q_o}{\omega_o} s}{1 + \frac{Q_o}{\omega_o} s + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2} \quad (3)$$

Onde $Q_o = \frac{R_o}{z_o}$ é o fator de qualidade.

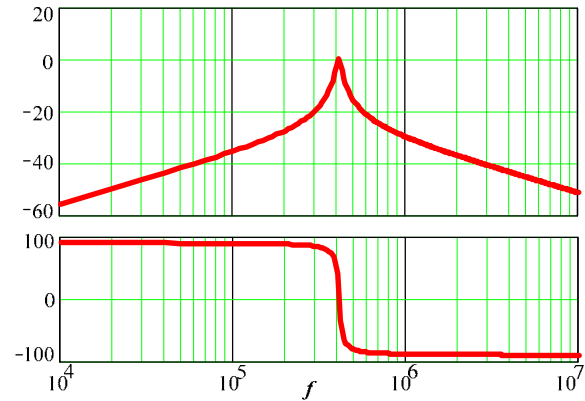


Fig. 6 – Diagramas de Bode da função de transferência I_{out}/V_{in} .

Para que se tenha um bom entendimento do funcionamento do conversor CC/CA é necessário obter-se a sua característica de saída, que relaciona a corrente eficaz de saída com os demais parâmetros importantes do circuito, em função da resistência de plasma referida e da impedância característica do par ressonante, como apresentada em (4) e na Fig. 7.

$$\overline{I_{out}} = I_o \frac{\pi\sqrt{2}}{4nV_{in}} = \frac{1}{R_o \sqrt{1 + \left[\frac{z_o}{R_o} \left(\frac{\mu_f^2 - 1}{\mu_f} \right) \right]^2}} \quad (4)$$

Com a relação entre as frequências de comutação e ressonância sendo dada por: $\mu_f = \frac{f_s}{f_o}$.

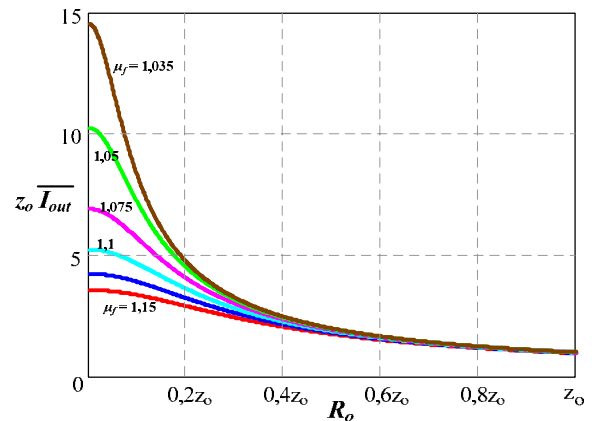


Fig. 7 – Característica de saída $I_{out} \times R_o$.

A partir da expressão obtida e por inspeção do circuito da Fig. 5, obtém-se a característica de potência de saída do sistema, apresentada nas curvas da Fig. 8, resultantes da expressão dada em (5). Da interpretação dessa característica externa se detecta a influência de cada um dos parâmetros do circuito do conversor CC/CA.

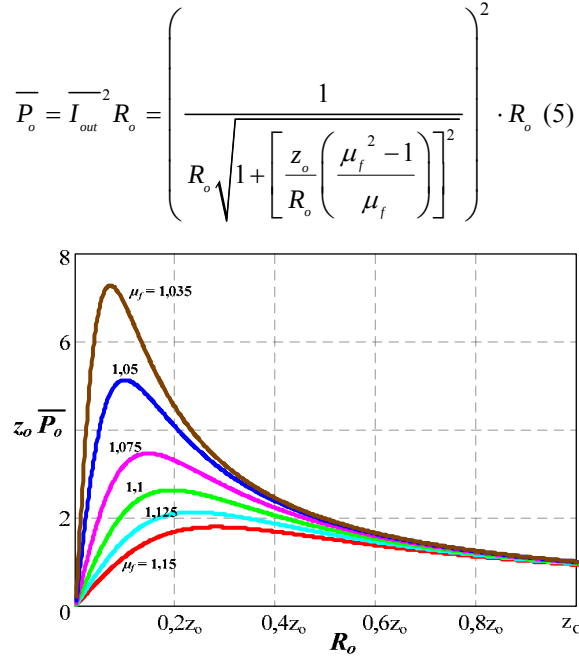


Fig. 8 – Característica de carga do inversor série-ressonante.

A partir das curvas apresentadas na Fig. 8, pode-se perceber a influência que a frequência de comutação e a impedância característica do par ressonante exercem sobre a potência entregue à carga.

É importante, nesse momento, ressaltar o efeito da utilização de diferentes relações de transformação no transformador RF empregado. Na Fig. 9 são apresentadas as curvas que caracterizam a potência de saída do inversor série-ressonante mediante a adoção de valores distintos dessa relação de transformação e para uma razão μ_f fixa em 1,022.

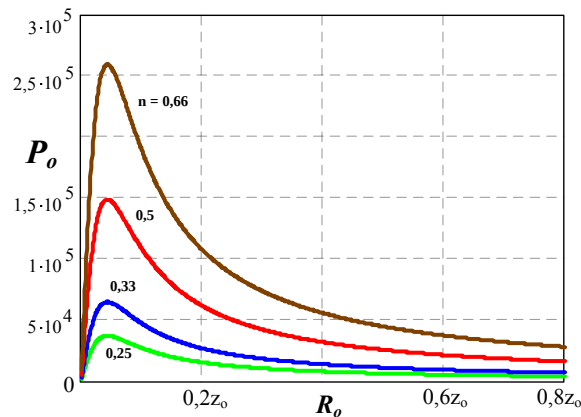


Fig. 9 – Potência de saída em função da resistência do plasma para diversas relações de transformação.

É notável, portanto, o efeito da adoção de transformadores diferentes na capacidade de

transmissão de energia do conversor. Podendo, em alguns casos e para valores específicos de μ_f , uma escolha equivocada dessa relação de transformação, tornar impraticável a operação em níveis mais elevados de potência.

Percebe-se também, que há um ponto crítico na determinação do ponto de operação do conversor no tocante à característica elétrica da carga. Uma vez que não se tem um valor preciso específico determinado para a resistência do plasma que é referida para o conversor através da tocha indutiva. Isso dificulta a determinação do ponto de operação real da estrutura. Como mencionado anteriormente, este parâmetro apresenta valores típicos da ordem de $0,6\Omega$ [6], muito próximos, portanto, da região de máxima potência encontrada para uma impedância característica do par ressonante de 10Ω , valor inicialmente adotado para este projeto.

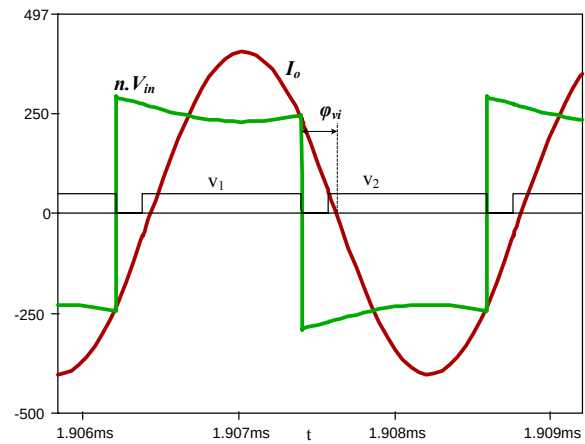


Fig. 10 – Ângulo de defasagem entre a tensão aplicada ao transformador e a corrente ressonante.

Outra característica que precisa ser observada com atenção é o controle da fase entre a corrente de carga e a tensão aplicada pelo conversor (Fig. 10). Em (6) obtém-se a expressão que determina o ângulo entre ambas as grandezas em função dos parâmetros do conversor. A Fig. 11 representa o comportamento dessa defasagem mediante variações de carga e da relação μ_f . A região de operação com comutação suave é mostrada abaixo da reta de 26° , valor mínimo aproximado de defasagem (considerando-se um par-ressonante com $f_o = 410\text{kHz}$) que garante que a corrente de carga não se extinga por completo antes do fim do tempo-morto especificado de 150ns (valor mínimo possível de ser obtido com a utilização dos drivers especificados) [1].

$$\phi_{vi} = \text{fase} \left\{ \frac{j\mu_f \frac{1}{z_o}}{1 + j\mu_f \frac{R_o}{z_o} - \mu_f^2} \right\} \quad (6)$$

Dito isto, percebe-se que existe um compromisso entre todos os parâmetros de projetos a serem determinados para garantir uma operação segura e, ao mesmo tempo, eficiente do conversor. A começar

pela determinação da característica de variação da resistência referida do plasma.

Determinada a frequência de ressonância apropriada, têm-se o ângulo mínimo de defasagem que deve ser obedecido para que o tempo-morto entre os acionamentos dos IGBT's seja respeitado. O controle deste ângulo, a partir da variação da razão μ_f , também interfere na potência transferida, o que implica na especificação de um valor mínimo desta relação.

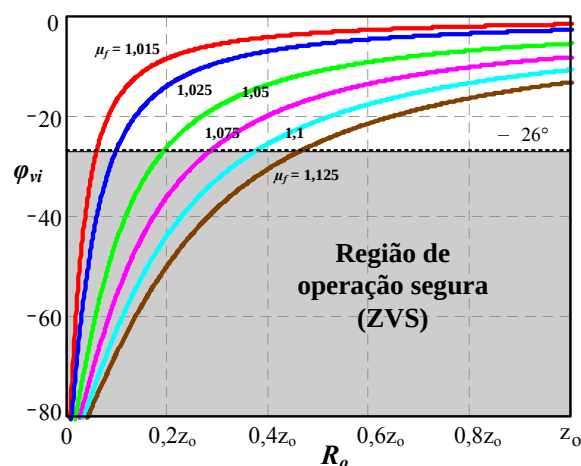


Fig. 11 – Ângulo de defasagem entre tensão e corrente em função da resistência do plasma.

O controle do ângulo de fase entre tensão e corrente no par ressonante é realizado por meio de um algoritmo PLL, implementado através do DSP [1].

A frequência de comutação adotada também deve levar em conta as limitações de resolução e velocidade de processamento do DSP utilizado. De modo que se deve garantir a operação do conversor com uma aproximação máxima de frequências que não implique no risco de fazê-lo atravessar a faixa que delimita a região de operação em modo de comutação ZVS.

Este é, portanto, o primeiro parâmetro a ser definido no projeto do conversor, para que, a partir dele, se possa determinar a relação de transformação mais apropriada e, então, seguir com o projeto de todo o sistema. Garantindo que o mesmo seja capaz de fornecer os níveis de potência desejados, a partir do controle pelo nível CC da tensão de entrada, sem comprometer os dispositivos semicondutores.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, o projeto encontra-se em fase de montagem do circuito conversor. A tocha indutiva está sendo confeccionada e a programação de ambos os DSP's ainda está em fase de implementação. A montagem da fonte de alimentação com correção de fator de potência e dos seus sistemas auxiliares está sendo concluída. O protótipo em fase de implementação pode ser visualizado na Fig. 12. Os grandes desafios encontrados atualmente estão na obtenção de um modelo confiável para a operação da

tocha e na caracterização da resistência referida do plasma. Além da obtenção do programa a ser utilizado no DSP e o entendimento acerca de suas limitações de resolução, precisão e confiabilidade, para que se possa determinar os parâmetros mais adequados de operação do sistema e seguir com o projeto do par ressonante e do transformador de alta frequência. Os resultados experimentais são esperados para o fim do ano.



Fig. 12 – Protótipo parcialmente montado em laboratório.

A análise matemática e a metodologia de projeto aqui apresentadas foram verificadas e validadas por meio de simulações numéricas em *PSpice/OrCad*, que apontam para um desempenho satisfatório do conversor. A metodologia mostrou-se eficiente e os modelos deduzidos se mostraram confiáveis e condizentes com as características do sistema observadas por simulação.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dubut, J. P. et al. "High frequency converter based on resonant inverters for exciting a 50kW inductive coupled plasma torch". COBEP'05, pp. 71-76, 2005.
- [2] Governo Federal do Brasil. "Compilação da legislação ambiental existente, relativa à destinação final de resíduos sólidos". Brasília, Brasil, 2003.
- [3] Guimarães, A. M. F. et al. "Control system for using in a plasma inertization plant". COBEP'05, pp. 433-437, 2005.
- [4] Lopes, M. D. et al. "A high performance 62kW ZCT SVM PFC power supply for use with a AC plasma torch", COBEP'05, pp. 490-495, 2005.
- [5] Gudmundsson, J. T.; Lieberman, M. A. "Magnetic induction and plasma impedance in a cylindrical inductive discharge", Plasma Sources Sci. Technol. 6, pp. 540-550, 1997.
- [6] Kwan J. W. et al. "Frequency Power System For Inductive Heating in Ion Sources", 15th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, pp. 743-746, 1993.