

Um Sistema para Controle de Fase e Potência de Microondas

M. V. Figueredo

Fundação Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF,
Av. Tancredo Neves, 100, 56304-100, Petrolina-PE, Brasil
militao.figueredo@univasf.edu.br

M. N. Martins, J. Takahashi e A. A. Malafrente

Universidade de São Paulo - Instituto de Física, Rua do Matão, Travessa R, 187, 05508-900, São Paulo-SP, Brasil
martins@if.usp.br, jiro@if.usp.br, malafrente@if.usp.br

Recebido em 23/05/2005. Aceito para publicação em 05/07/2005.

A partir do uso de dois acopladores direcionais de 3 dB, foi construído um sistema para controle de fase e potência para microondas com potência da ordem de 10 kW. Os ajustes são feitos através do deslocamento de curtos móveis, sendo inédita a configuração para o controle de potência¹. O sistema tem, por exemplo, aplicações em aceleradores de elétrons, possibilitando o ajuste de fase e potência do campo acelerador nas estruturas aceleradoras.

I. INTRODUÇÃO

O sistema de controle apresentado possibilita que um sinal seja controlado em fase e potência, com o uso de um defasador e de um atenuador especiais para alta potência. Estes dispositivos possuem, como componente principal, um acoplador direcional de 3 dB (AD3), do tipo Riblet [1], construído em guia de onda WR 340 e otimizado para 2,45 GHz [2, 3].

O defasador utiliza, além do AD3, curtos móveis especiais para alta potência [4].

O atenuador, baseado no defasador, utiliza circuitos em “T”, associados a cargas refrigeradas a água, capazes de absorver microondas da ordem de 5 kW [4].

Os testes em alta potência mostraram ser possível controlar microondas com 15 kW de potência contínua e frequência de 2,45 GHz, obtendo uma estabilidade de 0,1% em potência e 0,2° em fase. Para a construção deste sistema, foram desenvolvidas no Laboratório do Acelerador Linear (LAL) técnicas de fabricação e caracterização de componentes de microondas. A aplicação imediata do sistema é a rede de microondas de alta potência do acelerador microtron, atualmente em fase de montagem.

Serão apresentados os princípios de funcionamento do sistema de controle, montagens experimentais e os resultados obtidos.

II. O DEFASADOR

O defasador é construído com a utilização de curtos móveis, colocados nas portas 2 e 3 de um AD3, como mostrado na Figura 1. Com esta configuração, as ondas emergentes das portas 2 e 3 do AD3 são refletidas e retornam ao AD3, de forma a se somarem na porta 4 (diferença de fase nula) e a se subtraírem na porta 1 (diferença de fase de 180°). Assim, um

sinal incidente na porta 1 sai na porta 4. A defasagem entre os sinais das portas 1 e 4 depende da distância entre as portas 2 e 3 e os respectivos curtos móveis. Utilizando o tratamento da matriz de espalhamento, matriz S , ao AD3 em associação com os curtos móveis, a expressão que relaciona os sinais nas portas 1 e 4 é dada por [5]:

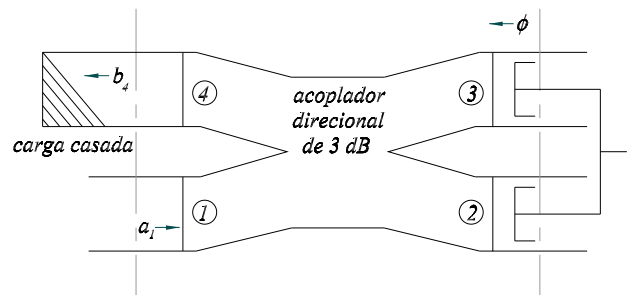


FIG. 1: Defasador de microondas construído a partir de um AD3. A onda b_4 pode ser escrita em função da onda incidente, a_1 , conforme a Equação 1.

$$b_4 = a_1 e^{j(2\phi - \pi/2)} \quad (1)$$

onde:

b_4 : fasor que representa a onda emergente na porta 4;

a_1 : fasor que representa a onda incidente na porta 1;

$j = \sqrt{-1}$:

$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_g} x$: fase introduzida quando os curtos móveis se deslocam de uma distância linear x ; λ_g : comprimento de onda guiado.

III. O ATENUADOR

De acordo com a Figura 1 devem se formar ondas estacionárias nas portas 2 e 3 do AD3. Isto ocorre porque os sinais

¹Pedido de patente no INPI sob número 0.305.540-0 em 10/12/2003. Publicado na Revista Brasileira de Propriedade Industrial - RPI no 1736, pág. 59 em 13/04/2004.

a_2 e a_3 (que entram no AD3 pelas portas 2 e 3) são iguais, em amplitude, aos sinais b_2 e b_3 (que saem do AD3 pelas portas 2 e 3, desprezando-se as perdas no processo de reflexão). As ondas estacionárias nas portas 2 e 3 são dadas pela combinação dos sinais a_2 e b_2 (na porta 2) e a_3 e b_3 (na porta 3). No entanto, os sinais que irão se combinar em fase na porta 4 são a_2 e a_3 , dados por $a_2 = -e^{j2\phi}b_2$ e $a_3 = -e^{j2\phi}b_3$.

A maneira de se controlar a potência que sai pela porta 4 (b_4) é por meio do controle da amplitude dos sinais a_2 e a_3 . Isto é obtido com a introdução das junções em “T”, em conjunto com cargas para a absorção da potência excedente. A junção em “T”, que possui três portas, é caracterizada por sua matriz de espalhamento, 3×3 . No caso de uma junção com a porta central paralela ao campo \vec{E} , os termos da matriz são identificados por α , δ e γ [5]. Aplicando o tratamento da matriz S ao circuito atenuador, mostrado na Figura 2, encontra-se a seguinte relação entre o sinal que sai e o que entra no atenuador:

$$b_4 = \alpha a_1 - \frac{\delta^2 a_1 e^{j2\phi}}{1 + \alpha e^{j2\phi}} \quad (2)$$

E a relação entre as potências é dada por:

$$\left| \frac{b_4}{a_1} \right|^2 = \frac{[2 \cos(2\phi)(\alpha^3 - \alpha\delta^2) + \alpha^2 + \alpha^4 + \delta^4 - 2\alpha^2\delta^2]}{[2 \cos(2\delta) + 1 + \alpha^2]} \quad (3)$$

Através da Equação 3 pode-se notar que a relação entre as potências pode ser alterada, variando o termo independente ϕ (associado ao deslocamento dos curtos móveis), uma vez que os parâmetros α e δ são característicos da junção “T”. Assim, com o deslocamento dos curtos, é possível controlar a potência absorvida no atenuador, Figura 2.

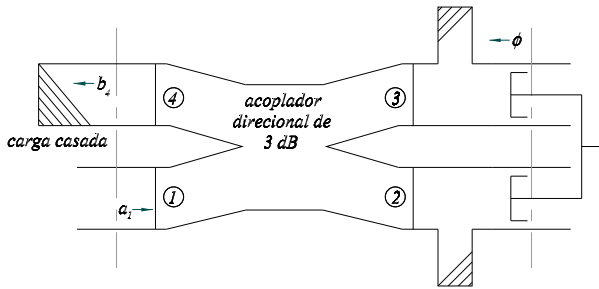


FIG. 2: Atenuador de microondas construído a partir de um AD3. Notar que a onda b_4 pode ser escrita em função da onda incidente, a_1 .

IV. SISTEMA DE CONTROLE DE FASE E POTÊNCIA

O Sistema de Controle de Fase e Potência (SCFP) é feito utilizando-se os circuitos atenuador e defasador ligados em série, como na Figura 3.

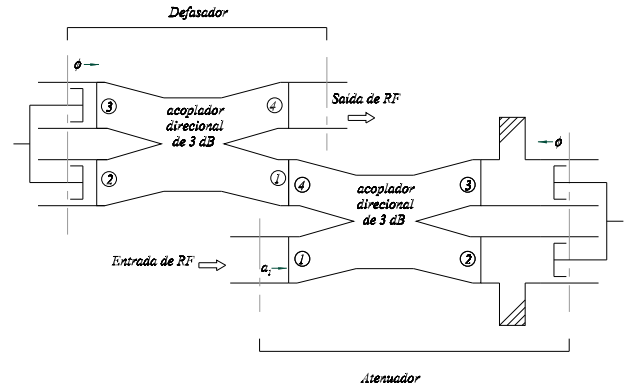


FIG. 3: Defasador e atenuador ligados em série, possibilitando o controle do nível de potência e fase da microonda.

Em testes de baixa potência, em torno de 10 mW, foi possível atenuar ao máximo o sinal, obtendo uma curva de atenuação à qual foi ajustada a expressão 3, conforme a Figura 4. Os valores encontrados foram: $\alpha = 0,250(4)$ e $\delta = 0,746(3)$. Estes valores mostram-se compatíveis com simulações feitas através de elementos finitos no programa HFWorks [7].

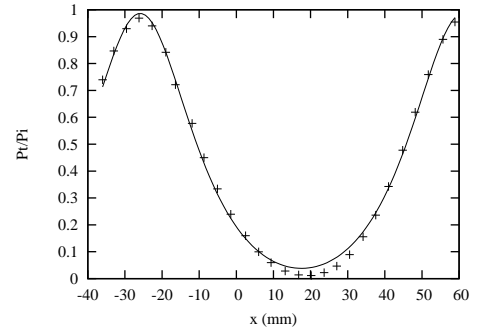


FIG. 4: Curva de atenuação em baixa potência onde é ajustada a expressão 3.

Os testes em alta potência foram realizados na faixa de 13 kW, sendo utilizada uma válvula klystron de 50 kW e cargas refrigeradas a água no circuito do SCFP. Para simular a estrutura aceleradora também foi utilizada uma carga refrigerada a água. Na Figura 5 é apresentado o arranjo utilizado na caracterização. A microonda que sai da klystron passa pelo isolador e pelo monitor de potência, onde amostras das ondas incidente e refletida são retiradas. A amostra da onda incidente é dividida no circuito *splitter*, sendo uma parte enviada ao circuito de controle da klystron. Na saída do circuito SCFP existe uma antena, que monitora o sinal enviado à carga refrigerada a água. A partir desta amostra são obtidas as informações de potência e fase. O sinal é atenuado e sua potência é medida em um medidor de baixa potência,

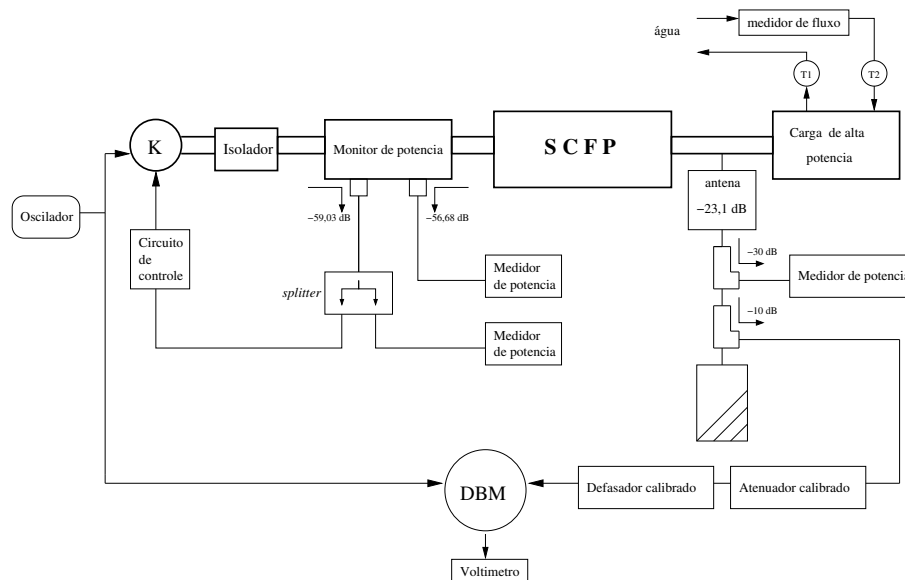


FIG. 5: Montagem para teste em alta potência.

conforme a Figura 5. Para a medida de defasagem é utilizado um circuito Misturador Duplamente Balanceado ou *Double Balanced Mixer* (DBM)[6], cuja saída é um sinal DC proporcional à diferença de fase dos sinais de entrada. A potência dissipada na carga refrigerada a água também pode ser medida através de efeito Joule; para tal, o circuito de refrigeração possui um medidor de fluxo e dois termômetros.

A variação da fase e da potência de microondas foi medida em função do deslocamento dos curtos móveis do defasador e do atenuador. Uma outra característica importante é o valor da reflexão de entrada, quantificada pela razão entre a potência refletida (P_r) e a potência incidente (P_i), medidas na porta de entrada, (P_r/P_i).

As Figuras 6(a) e (b) ilustram a atenuação e a reflexão na entrada, em função da variação da posição dos curtos móveis do atenuador (nestas medidas os curtos móveis do defasador foram posicionados na posição de mínima reflexão). Nos testes em alta potência foi atingida uma potência relativa de 0,6 (atenuação de 40% dos 13 kW da entrada). No entanto é possível atenuar todo o sinal, como demonstrado nos testes em baixa potência, desde que as cargas tenham capacidade de absorver toda a potência desviada para elas. Para o controle da potência de microondas no acelerador microtron, a atenuação máxima será de cerca de 5%, região onde a reflexão é baixa, ($P_r/P_i \approx 0,001$).

As Figuras 7(a) e (b) ilustram as características da defasagem em função da posição dos curtos móveis do defasador (neste caso os curtos móveis do atenuador foram posicionados na posição de mínima atenuação). Sobre os pontos experimentais foi ajustada a expressão que relaciona a fase ao deslocamento dos curtos ($\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_g}x$). A reflexão possui regiões de mínimo, o que é uma ótima característica porque é possível ajustar o circuito para trabalhar nesta região. Assim tem-se um melhor aproveitamento da potência disponível da fonte de mi-

crondas, no caso do acelerador microtron, uma válvula klystron de 50 kW.

A. Automação

A atuação dos curtos móveis pode ser controlada por meio de um sistema eletrônico. Este sistema se utiliza de amostras do sinal de RF, que geram informações sobre a fase e a potência. A partir destas informações o SCFP atua de modo a corrigir a fase e a potência da microondas fornecida. Na Figura 8 está representado o diagrama em blocos deste sistema de controle.

Uma amostra do sinal é enviada a um diodo detector, que opera na região quadrática, onde a amplitude do sinal de saída é proporcional à potência incidente, tornando-se, portanto, a informação de potência.

Uma segunda amostra é enviada a um *double balanced mixer*, que compara este sinal com um sinal de mesma frequência proveniente de um gerador de referência, fornecendo uma tensão de saída proporcional diferença de fase entre os sinais.

Estes dois sinais, com as informações de fase e potência, são enviados a uma placa de controle, onde sofrem um processo de condicionamento e digitalização, sendo então enviados a um microcontrolador. Este microcontrolador possui uma interface serial para comunicação externa e um sistema de potência para acionamento de motores de passo ligados aos curtos móveis.

Os sinais de fase e potência são comparados com os valores de operação (definidos pelo operador), enviados previamente ao microcontrolador via a interface serial. Caso haja uma diferença entre a amostra e o ponto de operação, um algoritmo Proporcional-Integral (PI) determina a direção e o

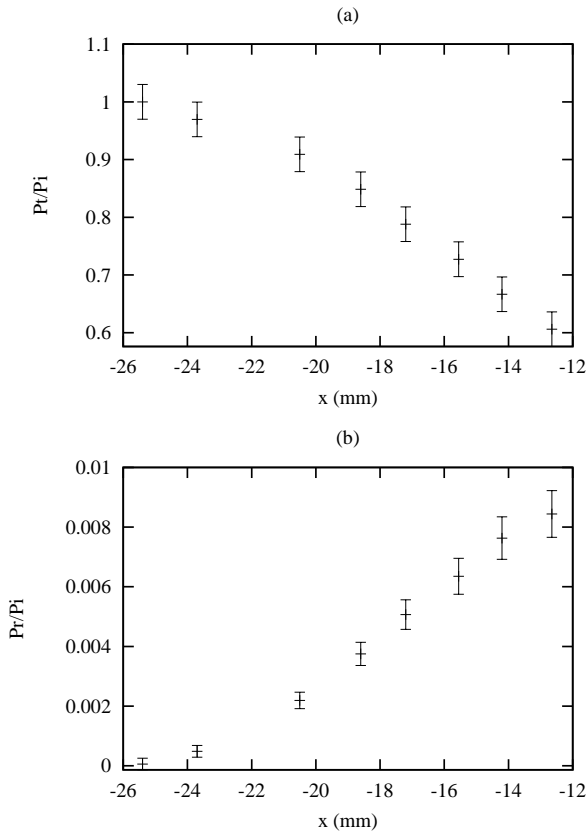


FIG. 6: Atenuação (a) e reflexão (b) em função da posição dos curtos móveis do atenuador.

número de passos necessários para que o motor correspondente leve os curtos móveis do defasador ou do atenuador a uma nova posição.

Como a atuação do atenuador causa uma alteração de fase e o defasador, por sua vez, introduz uma pequena atenuação (influência da TOE), o programa ainda garante que os motores sejam acionados por uma quantidade limitada de passos de cada vez, de modo a manter a estabilidade do sistema. Além disso, para evitar o acionamento excessivo do sistema e conseqüente desgaste das partes mecânicas, um limiar inferior é estabelecido no programa de modo a permitir o movimento dos curtos móveis somente para correções acima de certo número de passos.

O sistema, operando em 13 kW, conseguiu estabilizar a fase dentro de 0,1 grau e a potência em 0,2%, 15 segundos após uma perturbação no sinal de entrada.

V. CONCLUSÕES

O sistema proposto mostrou-se adequado para o controle de microondas de alta potência. Sua utilização imediata é a malha de microondas do acelerador microtron [4], no entanto pode ser utilizado nas mais diversas aplicações, em diferentes combinações de frequências e potências. Por ser modular,

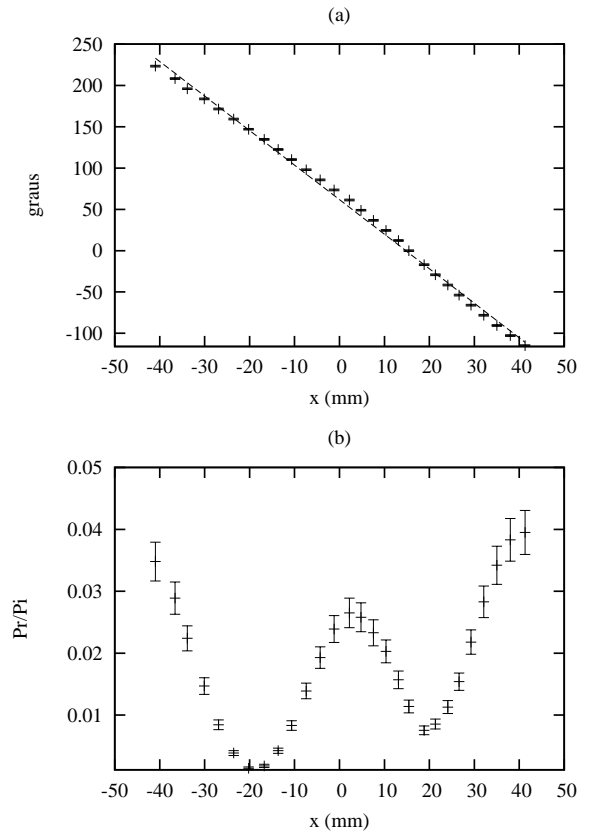


FIG. 7: Defasagem (a) e reflexão (b) em função da posição dos curtos móveis do atenuador.

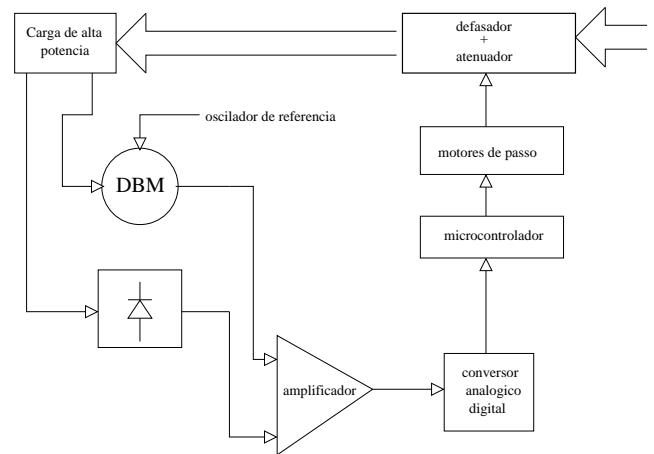


FIG. 8: Diagrama de blocos do Sistema de Controle

pode ser montado a partir de componentes individuais que, dependendo do caso, podem ter versões comerciais acessíveis: acopladores, junções em “T” e curtos móveis.

Com respeito à configuração do atenuador aqui apresentada, mostrou-se satisfatória, sem os inconvenientes de outras configurações como, por exemplo, lâminas de materiais ab-

sorvedores.

Agradecimentos

Este trabalho teve financiamento das agências CNPQ e FAPESP.

-
- [1] H. J. Riblet - *The Short-Slot Hybrid Junction* - Proc. IRE, vol 40, pág 180-184 (1952)
 - [2] Militão Vieira Figueredo - Projeto, Construção e teste de um acoplador direcional de 3 dB em Guia de Onda - Dissertação de Mestrado - IFUSP - (1996)
 - [3] M. V. Figueredo, M. N. Martins e J. Takahashi, Contrôles de Divisão de Potência em um Acoplador Direcional para RF de Alta Potência, em Revista Brasileira de Física Aplicada, vol. 13, no. 1, pág. 17, disponível em <http://www.sbf.if.usp.br>
 - [4] Militão Vieira Figueredo - Projeto, Construção e teste de uma rede de microondas para Alta Potência - Tese de Doutorado - IFUSP - (2002)
 - [5] Jerome L. Altman - *Microwave Circuits* - Van Nostrand Series in Electronics and Communication, 1964.
 - [6] Modelo ZAM-42, catálogo disponível em <http://www.minicircuits.com>
 - [7] <http://www.electromagneticworks.com/main.html>