

Fonte de Microondas de Alta Potência na Configuração Vircator de 1GW/2GHz

Alexandre L. Santos¹, Benedito S. Araújo Filho¹, Joaquim J. Barroso², Homero S. Maciel³

¹Instituto de Aeronáutica e Espaço, 12228-904 S. J. Campos, SP, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 12201-970 S. J. Campos, SP, Brasil

³Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 12228-900 S. J. Campos, SP, Brasil

Resumo — Explora-se com o código Karat a configuração de vircator com dois feixes em contrafluxo. Utilizando a estratégia de simulação com a injeção direta de energia obtém-se um vircator capaz de gerar um sinal de 2 GHz, com potência de 1 GW e rendimento de 32,0%. Com uma estratégia de simulação mais realista, em que o sistema é alimentado por um pulso de tensão e os feixes de elétrons são gerados como consequência do campo elétrico presente e da geometria do sistema, obtém-se um rendimento de 5,0%. Existe a expectativa de melhorar esse rendimento através de ajustes nas dimensões da cavidade ressonante.

Palavras-chaves — vircator, microondas de alta potência, potência pulsada.

I. INTRODUÇÃO

Desde a descoberta da relação de Child-Langmuir [1] e [2] sabe-se que ao se exceder o valor da corrente limite em um diodo tem-se a formação de um catodo virtual. A partir daí vários estudos foram efetuados abordando as características de fluxos de cargas acima dos valores limites. Birdsall e Bridges [3] apresentam uma síntese dos primeiros trabalhos que trataram desse tema, abordando as principais descobertas e avanços obtidos.

Os primeiros trabalhos que apresentaram a utilização da oscilação do catodo virtual para produção de microondas ocorreram em 1977 [4] e 1978 [5]. Com esses dois trabalhos tem-se o início da história do vircator e sua utilização como fonte de microondas de alta potência.

Em relação a outras fontes de microondas, a grande desvantagem apresentada pelo vircator era seu baixo rendimento, inferior a 5%. Assim, as diferentes configurações que foram propostas tinham como objetivo principal elevar esse rendimento, como por exemplo, o reditron (“reflected electron discrimination tube”) que apresentou rendimentos da ordem de 6% [6] e [7], ou mais recentemente o vircator coaxial [8] e [9] e o vircator com dois feixes em contrafluxo [10] e [11] com os quais se obtiveram rendimentos da ordem de 10%.

Alexandre L. Santos, alexandre@iae.cta.br Tel +55-12-3947-4755, Fax +55-12-3947-4797; Benedito S. de Araújo Filho, benedito@iae.cta.br, Tel +55-12-3947-4755; Joaquim J. Barroso, barroso@plasma.inpe.br, Tel. +55 12-3945-6696; Homero S. Maciel, homero@ita.br, Tel +55 12 3947-5934

Nesse trabalho estuda-se a configuração de vircator com dois feixes de elétrons em contrafluxo. Utilizando o código Karat [12] explora-se essa configuração em busca de combinações de parâmetros que resultem em sistemas mais eficientes.

O código Karat utiliza o método PIC (particle in cell) para efetuar a simulação das partículas em um ambiente eletromagnético. Trata-se de um código já consagrado e utilizado em diversas publicações internacionais.

Optou-se por explorar a configuração com dois feixes de elétrons em contra-fluxo pelo fato dessa configuração apresentar um importante diferencial com relação às demais. Em situações favoráveis de operação pode ocorrer a cooperação entre os dois feixes de elétrons com a formação de um único catodo virtual. Nessa situação é possível melhorar consideravelmente o rendimento do dispositivo.

II. PIC - KARAT

Neste trabalho todas as verificações e testes de desempenho baseiam-se em simulações executadas com o código Karat. Este código faz uso da metodologia “PIC” (“particle in cell”) para simular as interações entre partículas e campos eletromagnéticos. A metodologia “PIC” para a solução de problemas eletromagnéticos consiste no acoplamento das soluções das equações do movimento de partículas, juntamente com as equações de Maxwell em uma região discretizada em células. Nessas simulações definem-se macropartículas que representam nuvens de cargas de tamanhos finitos que desenvolvem trajetórias obedecendo à equação da força de Lorentz.

Na Fig. 1 tem-se o fluxo básico de uma simulação PIC similar a utilizada pelo código Karat. Inicialmente um conjunto de partículas computacionais é especificado com condições iniciais consistentes, passando então a deslocar-se de acordo com as equações do movimento de Newton-Lorentz.

Usualmente para a solução da equação do movimento utiliza-se o esquema “leap-frog” em que se analisam a posição da partícula e a velocidade de deslocamento no intervalo de tempo. Tendo-se o deslocamento das partículas faz-se um tratamento das colisões utilizando uma estratégia de Monte Carlo. Trata-se também a ocorrência de emissões secundárias.

Para determinar a força sobre a partícula, prever a carga da célula e a densidade de corrente necessária para a solução das equações de Maxwell, estabelece-se um esquema de

interpolação entre as células da discretização e as partículas consideradas.

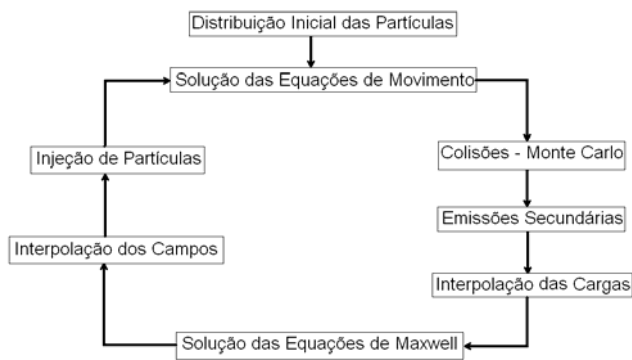


Fig. 1 – Fluxograma básico de uma simulação PIC

Após a resolução das equações de Maxwell um esquema de interpolação similar deve ser empregado entre as células e os campos elétrico e magnético, os quais serão utilizados na obtenção das forças sobre as partículas no ciclo seguinte da simulação. Antes do início do próximo ciclo consideram-se as novas partículas injetadas no sistema.

O código possui também rotinas de análise da consistência dos resultados, baseados principalmente na análise do balanço energético do sistema.

III. VIRCATOR DE FEIXE DUPLO

A Fig. 2 mostra a configuração de vircator estudada. No corte XZ observam-se os dois catodos, simetricamente afastados da cavidade ressonante cilíndrica. Esses catodos emitem os feixes de elétrons que penetram na cavidade ressonante formando em seu interior um catodo virtual. No corte YZ observa-se a cavidade ressonante cilíndrica com a abertura para extração do sinal de microondas. O sinal de microondas gerado é então conduzido por um guia de onda até um absorvedor, que representa a carga casada com o guia.

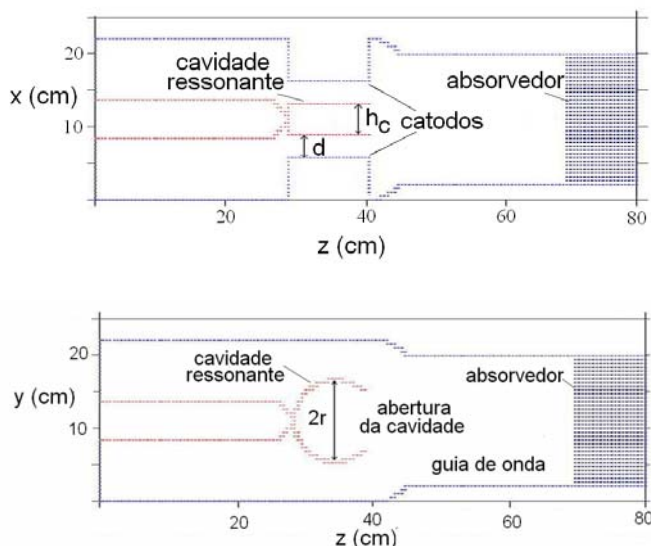


Fig. 2 – Geometria da vircator com dois feixes em contra-fluxo

Esta configuração está projetada para operar em 1,6 GHz, apresentando a cavidade ressonante com um raio de 7,0 cm e o guia de onda com um raio de 10,0 cm. Outros parâmetros da geometria podem variar entre uma simulação e outra, como é o caso da altura e da abertura da cavidade ressonante,

da distância, d , que separa cada um dos catodos da face da cavidade e do raio dos catodos, que definem o raio dos feixes de elétrons.

Variam-se esses parâmetros no intuito de se obter as combinações mais favoráveis para se operar com rendimentos superiores a 10%. Com base no apresentado em [13], tem-se a TABELA I, que estabelece para cada parâmetro as correspondentes faixas de variação que asseguram altos rendimentos.

TABELA I PARÂMETROS E SUAS FAIXAS OPERACIONAIS

Parâmetros	Descrição	Faixa Operacional
r/b	Raio da cavidade / raio do feixe	1 – 2
h_c/r	Altura / raio da cavidade	0,3 – 1,5
Rasgo	Abertura setorial da cavidade	60° - 150°
d/r	d = Distância catodo-cavidade	0,1 – 0,6

IV. INJEÇÃO DIRETA DE ENERGIA

A estratégia de simulação com injeção direta de energia consiste em definir de forma arbitrária o valor da tensão de aceleração dos feixes bem como a intensidade desses feixes. A vantagem dessa estratégia é a flexibilidade para se alterar as características dos feixes, facilitando a investigação da influência que determinados parâmetros dos feixes exercem no desempenho do sistema. A desvantagem é o risco de se utilizar valores de tensões e correntes incompatíveis com a geometria estudada.

Com essa estratégia de simulação chegou-se a uma configuração que apresentou uma eficiência de 32,0%. Essa configuração é composta por uma cavidade com 7,0 cm de raio, 5,0 cm de altura e uma abertura setorial de 150°. A distância d é de 3,0 cm e injeta-se no sistema dois feixes com raio de 5,0 cm, intensidade de 3,18 kA cada e acelerados por um tensão de 553,8 kV.

A potência injetada no sistema é de 3,53 GW. Na Fig. 3 observa-se um pico de potência de microondas gerada de 1,15 GW correspondendo aos 32,0% de eficiência descrita. A Fig. 4 mostra o espectro do sinal do campo elétrico. Vê-se que a frequência de operação do sistema está em 2,1 GHz, acima, portanto, do valor de 1,6 GHz utilizado para especificar o raio da cavidade ressonante. Como a cavidade possui uma abertura, é justificável que exista uma diferença entre a frequência de operação e a frequência utilizada na especificação do raio da cavidade.

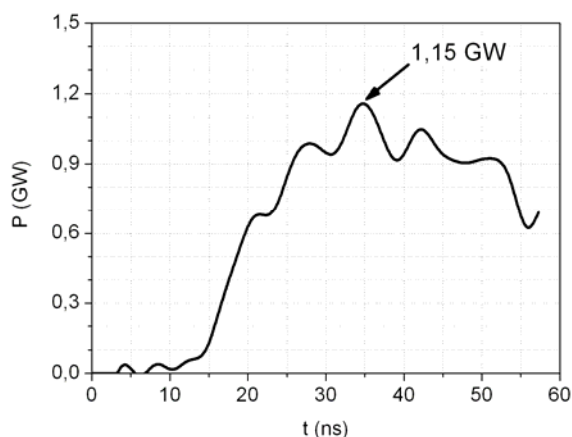


Fig. 3 – Potência de microondas gerada

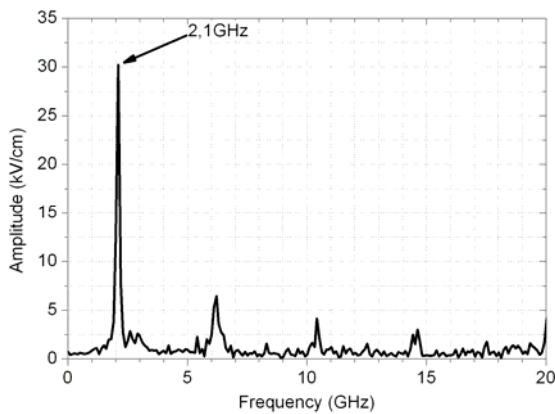


Fig. 4 – FFT do sinal do campo elétrico

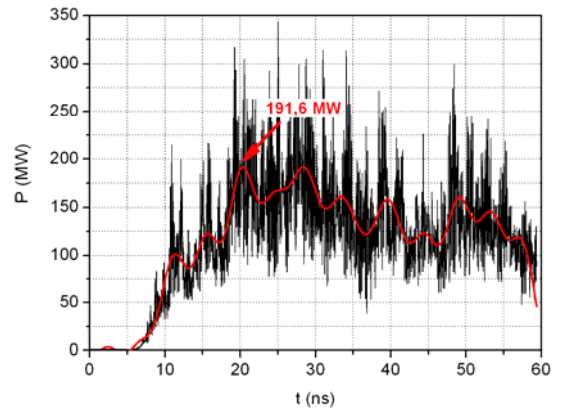


Fig. 6 – Potência de microondas gerada

V. FEIXE ACELERADO

Nessa estratégia de simulação alimenta-se o sistema com um pulso de tensão, que possui um tempo de subida de 5 ns. Os feixes são gerados de forma consistente com o campo elétrico presente e com a geometria do sistema.

Simulando a mesma configuração descrita no item anterior, com a qual obteve-se 32% de rendimento, tem-se o sistema operando com dois feixes, cuja corrente total e a tensão de aceleração são mostrados na Fig. 5.

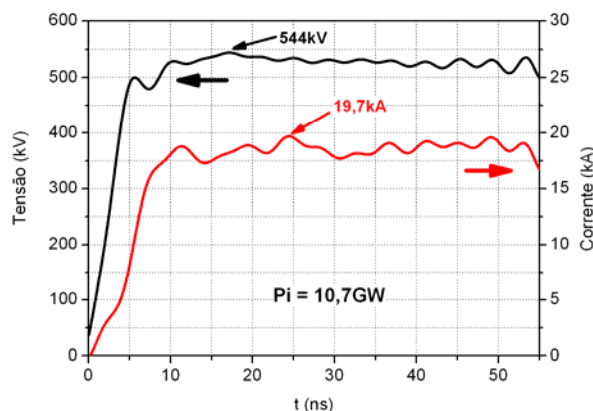


Fig. 5 – Tensão de aceleração e corrente total dos feixes

Nota-se que o valor da corrente total está próxima de 20,0 kA, ou seja, 10,0 kA para cada feixe, uma corrente bem superior ao valor de 3,18 kA definido arbitrariamente na simulação com injeção direta de energia.

A potência de Saída é dada na Fig. 6. Obtém-se uma potência de saída de 191,6 MW, bem inferior que os 1,15 GW obtidos com a estratégia de simulação anterior. Comparando com a potência de entrada de 10,7 GW tem-se um rendimento de apenas 1,8%.

Resta verificar se a queda de rendimento, observada entre as duas estratégias de simulação, deve-se somente à alteração na relação entre a tensão de aceleração e a corrente dos feixes, ou se outros fatores, relacionados à dinâmica do feixe, podem ter contribuído para esse baixo rendimento.

Na Fig. 7 tem-se o espectro do campo elétrico do sinal de microondas gerado. A frequência de operação está em 2,6 GHz, pouco maior que os 2,1 GHz observados anteriormente.

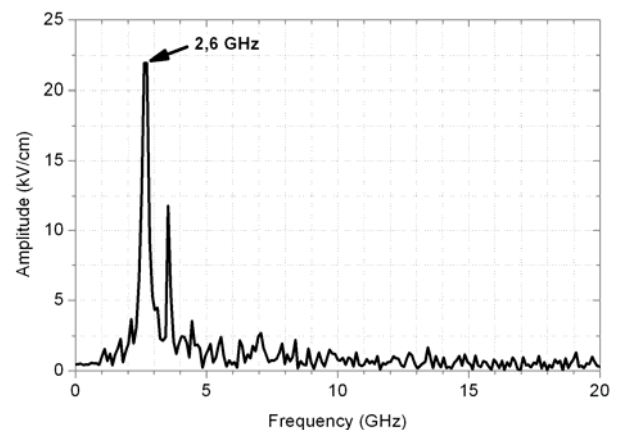


Fig. 7 – FFT do sinal do campo elétrico

VI. FEIXE ACELERADO COM CORRENTE LIMITADA

Para verificar se a queda no rendimento do vircator deve-se ou não somente à relação entre a tensão de aceleração e a corrente do feixe, repetiu-se a simulação com feixe acelerado considerando-se, entretanto, um limite na capacidade de emissão de corrente dos catodos. Essa consideração é válida, uma vez que, em uma situação real, essa capacidade de emissão possui de fato um limite.

Como o objetivo é comparar as duas estratégias de simulação, estipulou-se um limite de emissão de 3,18 kA para cada catodo, ou seja, uma corrente total de 6,36 kA. Dessa forma estabelece-se uma relação entre tensão e corrente próxima a da simulação que obteve rendimento de 32%.

A Fig. 8 mostra a evolução da tensão de aceleração e da corrente total dos feixes. Verifica-se de fato uma situação de operação bem próxima aos 6,36 kA e 553,8 kV simulados no item IV.

Na Fig. 9 tem-se a potência do sinal de microondas gerado. Comparando os 17,6 MW do sinal de saída com os 3,78 GW de potência na entrada, chega-se a um rendimento de 0,5%. O baixo rendimento obtido indica que outros fatores, e não a mera relação entre tensão de aceleração e corrente do feixe interfere no rendimento.

A Fig. 10 mostra o espectro do campo elétrico do sinal gerado. O sinal possui uma componente em 2,3 GHz, condizente com as frequências observadas nas outras simulações, entretanto possui uma componente mais intensa

em 4,1 GHz. Trata-se de um sinal em banda larga, típico de vircators com baixo rendimento.

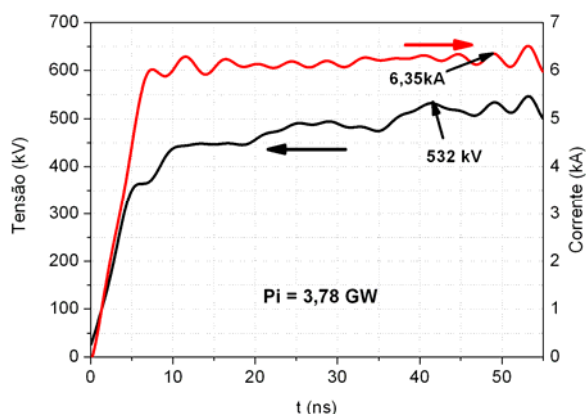


Fig. 8 – Tensão de aceleração e corrente total dos feixes

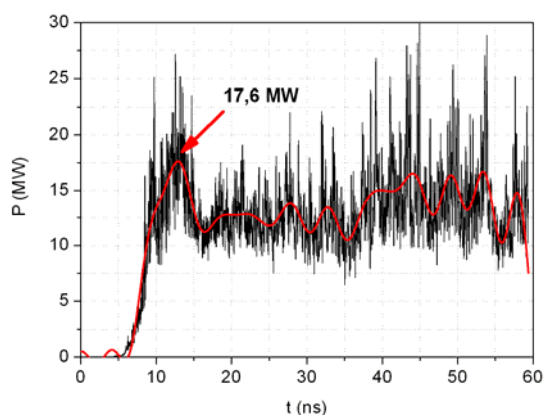


Fig. 9 – Potência de microondas gerada

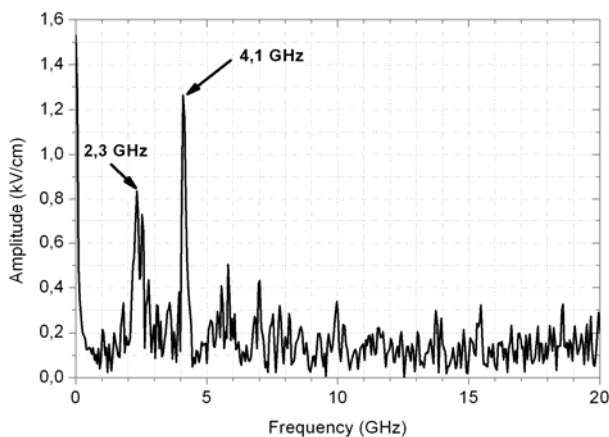


Fig. 10 – FFT do sinal do campo elétrico

Deve-se investigar que outro parâmetro seria o responsável pelo baixo rendimento obtido. A hipótese mais provável é que a diferença na dinâmica do feixe entre as duas estratégias de simulação explique essa discrepância.

Na simulação com injeção direta de energia estabelecem-se a corrente e a tensão de aceleração do feixe. Dessa forma a quantidade de elétrons emitidas é praticamente constante com distribuição de energia uniforme.

Já na simulação com feixe acelerado, tem-se um intervalo de tempo necessário para que os elétrons sejam acelerados. Esse fato faz com que ocorra uma maior variação energética

do feixe. Essa não uniformidade seria a grande responsável pelo baixo rendimento.

Nas Fig. 11 e 12 é mostrada, para um dado instante, a distribuição de momentos das partículas. Observa-se que no caso do feixe arbitrário as partículas são injetadas todas com o mesmo momento. Conforme se deslocam, perdem energia cinética até que as suas velocidades tornam-se nulas na região do catodo virtual.

Já no caso do feixe acelerado observa-se que as partículas partem de um momento igual a zero, aceleram e depois perdem velocidade até a formação do catodo virtual. Esse é um processo mais condizente com a operação real desse dispositivo. Observa-se na Fig. 12 uma intensa dispersão de momento entre os elétrons do feixe. Essa dispersão seria a principal responsável pelo baixo rendimento obtido.

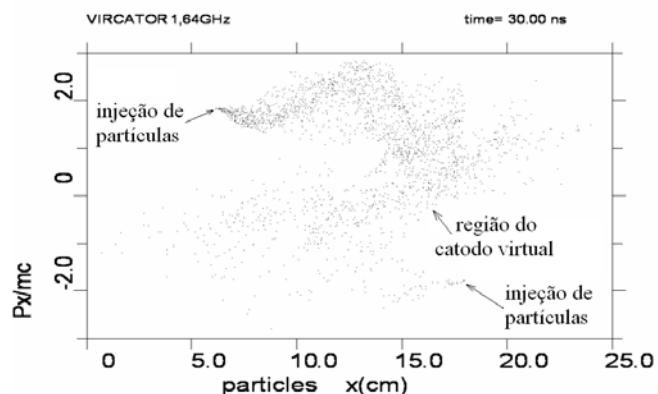


Fig. 11 – Distribuição de momento das partículas – simulação com injeção direta de energia

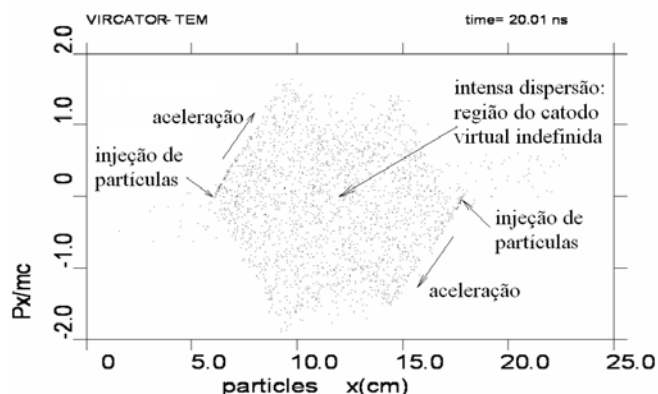


Fig. 12 – Distribuição de momento das partículas – simulação com feixe acelerado

VII. MELHOR CONFIGURAÇÃO – FEIXE ACELERADO

Considerando a estratégia de simulação com feixe acelerado, variaram-se os parâmetros para encontrar combinações que proporcionem um maior rendimento do vircator. O objetivo é se aproximar ao máximo do rendimento de 32% obtido no item IV. Esse é um processo longo que envolve um grande número de simulações.

A melhor configuração obtida até o momento é composta por uma cavidade com 7,0 cm de raio, 5,0 cm de altura e uma abertura setorial de 150°. A distância d é de 2,0 cm e injetam-se no sistema dois feixes com raio de 2,0 cm. A intensidade do feixe e a tensão de aceleração estão indicadas na Fig. 13.

Na Fig. 14 está o sinal da potência de microondas. Comparando a potência de 465 MW observada na saída com

a potência de entrada de 9,3 GW, obtém-se um rendimento de 5,0%.

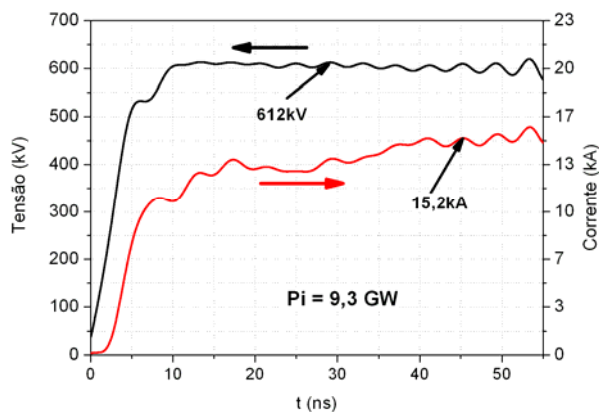


Fig. 13 – Tensão de aceleração e corrente total dos feixes

A Fig. 15 mostra o espectro de frequência do sinal do campo elétrico. Observa-se que o sistema está operando em 5,2 GHz. Essa frequência é muito superior à frequência de ressonância projetada para a cavidade, 1,6 GHz. Isso mostra que a cavidade ressonante não está operando de forma eficaz. O objetivo da cavidade ressonante é realimentar o sistema na frequência de operação, contribuindo assim na elevação do rendimento. Deve-se, portanto, efetuar ajustes na cavidade ressonante para que sua contribuição seja efetiva.

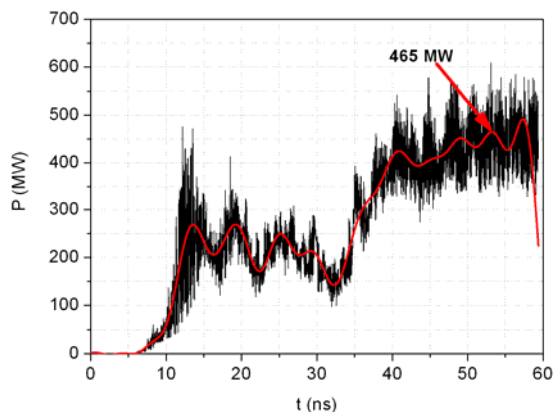


Fig. 14 – Potência de microondas gerada

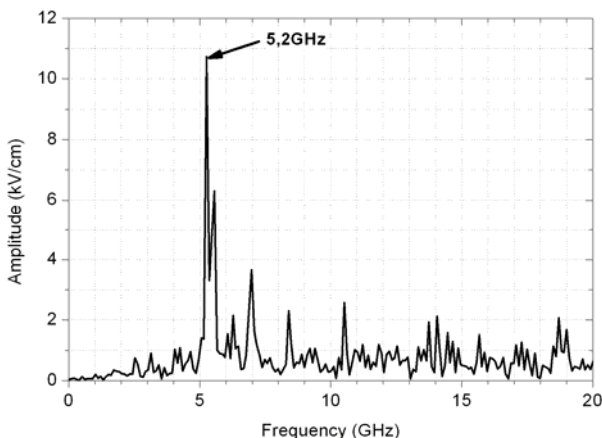


Fig. 15 – FFT do sinal do campo elétrico

VIII. CONCLUSÕES

Para um vircator com dois feixes em contrafluxo efetuou-se a comparação entre duas estratégias de simulação. Na simulação com injeção direta de energia tem-se a definição arbitrária da tensão de aceleração e da intensidade dos feixes. A vantagem dessa estratégia é a flexibilidade para se estudar a influência que as características dos feixes exercem no desempenho do sistema. A desvantagem é a possibilidade de se definir valores de tensão e corrente incompatíveis com a geometria do sistema. Com essa estratégia obteve-se uma configuração com rendimento de 32,0%.

A estratégia de simulação com feixes acelerados consiste em alimentar o sistema com um pulso de tensão, sendo que os feixes de elétrons são gerados conforme o campo elétrico presente e a geometria do sistema. Trata-se de uma situação mais próxima da operação real. Até o momento o melhor resultado obtido foi um rendimento de 5,0%. Existe o indício de que este rendimento pode ser melhorado. Nessa configuração observou-se que a frequência de operação está em 5,2 GHz, indicando que a cavidade ressonante, projetada para 1,6 GHz, não está operando de forma adequada. Haverá, portanto, a necessidade de ajustes na cavidade ressonante.

Com relação à diferença de rendimentos observados entre as duas estratégias de simulação, tem-se que o fator mais provável pela ocorrência desse fato é a acentuada não uniformidade dos feixes de elétrons verificada na simulação com feixes acelerados.

REFERÊNCIAS

- [1] C. D. Child, "Discharge From Hot CaO", Phys. Rev. (Series I) Vol 32; Issue 5, pp. 492-511, May 1911.
- [2] Irving Langmuir, "The Effect of Space Charge and Initial Velocities on the Potential Distribution and Thermionic Current between Parallel Plane Electrodes", Phys. Rev. Vol. 21, Issue 4, pp. 419-435, April 1923.
- [3] Birdsall, C. K.; e Bridges, W. B.; "Electron Dynamics of Diode Regions", New York: Academic Press, 1966.
- [4] Mahaffey, R. A.; Sprangle, P.; Golden, J.; e Kapetanacos, C. A., "High-Power Microwaves from a Nonisochronic Reflexing System" Phys. Rev. Lett., Vol. 39, pp. 843 – 846, 1977.
- [5] Didenko, A. N.; Zherlitsyn, A. G.; Sulakshin, A. S.; Fomenk, G. P.; Tsvetkov, V. I.; e Shteyn, Yu. G.; "The Generation of High-Power Microwave Radiation in a Triode System by a Heavy-Current Beam of Microsecond Duration", Sov. Tech. Phys. Lett., Vol. 4, pp. 3 - 6, 1978.
- [6] T. J. T. Kwan and H. A. Davis, "Numerical simulations of the reditron." IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 16, pp. 185-191, Apr. 1988.
- [7] Harold A. Davis, R. R. Bartsch, Thomas J. T. Kwan, E. G. Sherwood, R. M. Stringfield, "Experimental Confirmation of the Reditron Concept" IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 16, pp 192 - 198 . Apr. 1988.
- [8] A. G. Zherlitsyn, "Microwave generation by triode with coaxial-type virtual cathode", Pis'ma Zh. Tekh. Fiz., vol. 16, no. 22, pp. 78-80, 1990 (in Russian).
- [9] Woolverton, K.; Kristiansen, M.; Hatfield, L.L.; "Diode polarity experiments on a coaxial vircator", Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International, Volume 1, pp. 759 – 764, 29 June-2 July 1997
- [10] Jiang, W.; Sato, M.; Shimada, N.; Prasad, S.D.; Yatsui, K.; "Experimental and numerical studies of virtual cathode oscillator", Pulsed Power Conference, 2003. Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International Vol. 1, pp. 451 – 454, 15-18 June 2003.
- [11] W. Jiang, N. Shimada, S. D. Prasad, e K. Yatsui, "Experimental and Simulation Studies of New Configuration of Virtual Cathode Oscillator", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 32, No. 1, pp. 54 - 59 February, 2004.
- [12] Tarakanov, V., "User's manual for code KARAT", Berkeley Research Assoc. Inc. VA, 1992
- [13] Santos, Alexandre Luís dos, "Desenvolvimento de um modelo teórico para osciladores com catodo virtual com dois feixes de elétrons em contrafluxo", CTA/ITA, 103 p., 2007.