



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE HARMÔNICOS ELETROSTÁTICOS EM PLASMAS ESPACIAIS VIA PIC-CODES

MACHADO, FERNANDA CLENIR HERNANDES¹; SIMÕES JR., FERNANDO JAQUES RUIZ²; GAELZER, RUDI³

¹*Universidade Federal de Pelotas - fechm@hotmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas - fernando.simoes@ufpel.edu.br*

³*Universidade Federal de Pelotas - rudi@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

Fenômenos eruptivos transientes ocorrem com frequência na superfície solar. Como exemplo, a ejeção de massa coronal e as explosões solares (flares) podem ser consideradas um dos grandes responsáveis pelas falhas de equipamentos de comunicação (satélites), sistemas de navegação (GPS) e também podem representar um grande perigo à astronautas em bases espaciais em virtude da exposição às partículas muito energéticas. As redes elétricas de cidades próximas aos pólos também podem ser afetadas pela atividade solar (BAKER, 2005).

Durante uma explosão solar, vários feixes de partículas energéticas são injetados no meio interplanetário. Estes feixes de partículas se propagam na direção radial a partir do sol ao longo das linhas de campo magnético. Quando os feixes entram em contato com o plasma ambiente induzem ondas de Langmuir, estas ondas interagem com o plasma ambiente e são convertidas não linearmente em radiação próxima a frequência local de plasma e seus harmônicos (YOON, 2000; YOON et al., 2003; GAELZER et al., 2003).

A propagação de feixes de elétrons em um plasma, a geração de ondas de Langmuir e conseqüentemente a emissão de rádio constituem um dos fenômenos básicos da física de plasma. Dentre as emissões de rádio, destacam-se as Emissões Solares Tipo III (GURNETT et al., 1993; LIN et al., 1986), estas emissões tem origem em feixes de elétrons que são acelerados durante as explosões solares, estes elétrons interagem com o plasma ambiente gerando ondas de Langmuir e emissões de rádio na coroa solar e no meio interplanetário. Neste trabalho serão utilizadas simulações computacionais para investigar a geração não linear de harmônicos eletrostáticos das ondas de Langmuir pela interação feixe-plasma (SIMÕES JR. et al., 2010). Para tanto, serão realizadas múltiplas injeções de feixes de partículas com diferentes densidades e temperatura. Como conseqüência da evolução não linear do sistema feixe-plasma, são geradas emissões eletrostáticas no modo de Langmuir (modificado pelo feixe), ondas de Langmuir retro-espalhadas e ondas de Langmuir harmônicas. Os parâmetros numéricos são baseados em valores típicos da região de interesse (ANDERSON et al., 1985).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, serão utilizadas simulações computacionais via código PIC (Particle In Cell). Será utilizado o código KEMPO 1D (Kyoto university's ElectroMagnetic Particle cOde) (OMURA E MATSUMOTO, 1993), que foi modificado para receber múltiplas injeções de feixes de elétrons (SIMÕES JR., 2008). O código

KEMPO 1D é constituído por várias sub-rotinas, que calcula as equações de Maxwell, de movimento e a equação de continuidade, de forma auto-consistente, isto é, levando em conta os campos eletromagnéticos externos e os campos eletromagnéticos produzidos pelo movimento das próprias partículas do plasma. Os parâmetros de plasma normalizados para os três casos inicialmente estudados são apresentados na Tabela 1.

	Simulação 1			Simulação 2			Simulação 3		
	Plasma de Fundo	1° Feixe	2° Feixe	Plasma de Fundo	1° Feixe	2° Feixe	Plasma de Fundo	1° Feixe	2° Feixe
W_p	1,0	0,35	0,105	1,0	0,35	0,245	1,0	0,35	0,455
Q_m	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
V_{pe}	1,0	2,54	2,54	1,0	2,54	2,54	1,0	2,54	2,54
V_{pa}	1,0	2,54	2,54	1,0	2,54	2,54	1,0	2,54	2,54
VD	0,1	7,5	7,5	0,1	7,5	7,5	0,1	7,5	7,5
PCH	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
np	512 x 2048	256 x 2048	256 x 2048	512 x 2048	256 x 2048	256 x 2048	512 x 2048	256 x 2048	256 x 2048

Tabela 1: Parâmetros de entrada normalizados.

Na tabela, W_p é a frequência de plasma, Q_m é a razão de carga e massa, V_{pe} e V_{pa} são as velocidades térmicas perpendicular e paralela, respectivamente, VD é a velocidade de deriva, np é o número de partículas de cada espécie que constitui o plasma e PCH é o ângulo de arremesso em relação ao campo magnético ambiente para cada espécie. Os parâmetros numéricos devem ser definidos de tal forma que cumpram as condições de estabilidade numérica, condição de Courant $c\Delta t < \Delta x$ juntamente com a condição $\Delta x < 3\lambda_D$ (BIRDSALL E LANGDON, 1995) onde λ_D é o comprimento de Debye, c a velocidade da luz no vácuo, Δt o passo temporal, e $\Delta x = 1,0$ o tamanho da célula espacial. Nas simulações as frequências, velocidades e posições são normalizadas pela frequência de plasma, velocidade térmica e o comprimento de Debye. A simulação executada até 16.384 passos temporais que equivalem a 327,68 períodos de plasma ($\omega_{pe}t$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A condição inicial de referência para este trabalho é apresentada em SIMÕES JR. et al., (2010) no qual, um primeiro feixe de partículas é injetado em um plasma ambiente para quebrar o estado de equilíbrio e introduzir ondas eletrostáticas no sistema (ver SIMÕES JR. et al., 2010). Para verificar qual o efeito da densidade do segundo feixe de elétrons no processo de emissão de harmônicos do modo eletrostático realizamos três simulações preliminares variando a densidade do segundo feixe. A Figura 1 mostra o resultado preliminar das simulações. A Figura 1A) apresenta a evolução temporal das energias elétrica, magnética, cinética e total. É possível observar que a simulação é realizada sem instabilidade numérica uma vez que não há variação da energia total do sistema (quadro inferior direito). Também é possível observar a troca de energia entre as partículas (energia cinética)

e as ondas (energia elétrica) durante a simulação. Quando comparamos os quadros das energias elétrica e cinética vemos que as partículas são rapidamente aprisionadas pelo intenso campo elétrico das ondas que já estão no sistema, isso é caracterizado pela rápida diminuição da energia cinética das partículas e rápido crescimento da energia elétrica nos primeiros instantes da simulação.

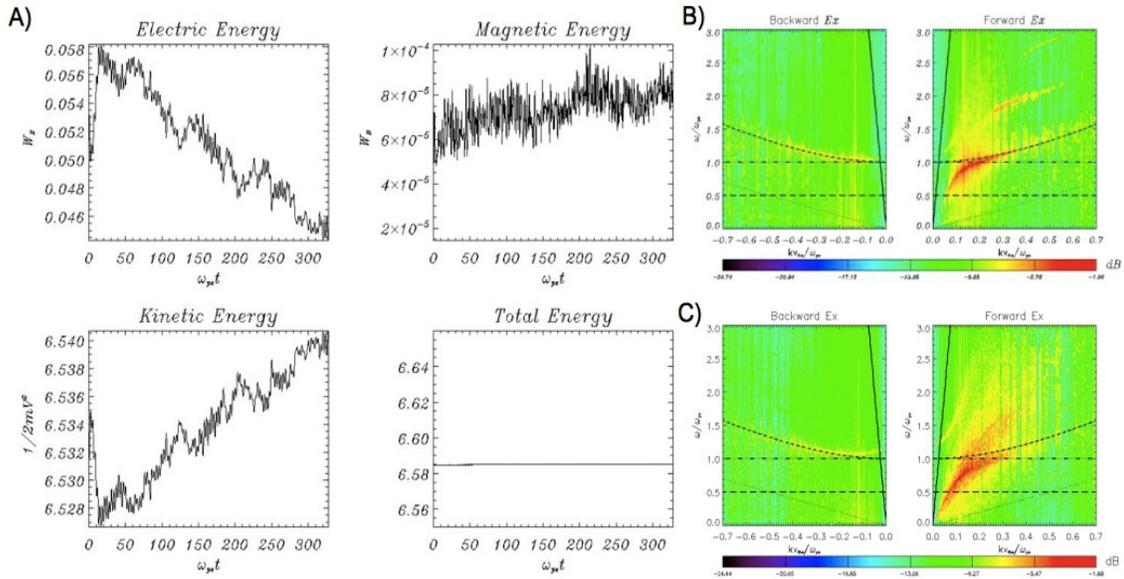


Figura 1: A) Evolução temporal das energias envolvidas na simulação. B) Relação de dispersão para a simulação 1. C) Relação de dispersão para a simulação 3.

Após a injeção do segundo feixe com 30% da densidade do primeiro feixe, ocorre uma aproximação não linear dos harmônicos eletrostáticos (comparar com a Figura 5 de SIMÕES JR. et al.,(2010)), esta aproximação pode ser vista na Figura 1B. Quando consideramos o segundo feixe com 130% da densidade do primeiro feixe (simulação 3 – Figura 1c), observamos que os harmônicos são completamente absorvidos. Esta característica deixa clara a dependência da densidade dos feixes no processo de emissão dos harmônicos do modo eletrostático.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais via código PIC para investigar a dependência na densidade dos feixes durante o processo de emissão de harmônicos eletrostáticos em plasmas espaciais. Foi possível visualizar a aproximação de harmônicos eletrostáticos após a injeção de um segundo feixe de partículas com densidade menor que o primeiro feixe (simulação 1).

A partir dos resultados preliminares das simulações feitas neste trabalho, é possível verificar a dependência na densidade do segundo feixe no processo de emissão eletrostática e dar continuidade ao estudo que vem sendo realizado pelo Grupo de Física dos Plasmas da UFPel, considerando múltiplas injeções de feixes de elétrons.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, K. A.; LIN, R. P.; GURGIOLO, C.; PARKS, G. K.; POTTER, D. W.; WERDEN, S.; R´EME, H. A component of nongyrotropic (phase-bunched) electrons upstream from the earth's bow shock. **Physics of Fluids**, v. 90, n. A11, p.10,809–10,814, Nov. 1985.

BAKER, D. N. Introduction to space weather. In: SCHERER, K. et al. (Ed.). **Space weather, the physics behind a slogan**. Berlin: Springer, 2005. cap.1, p. 3-20.

BIRDSALL, C. K.; LANGDON, A. B. **Plasma Physics via Computer Simulation**. 2. ed. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1995.

GAELZER, R.; YOON, P. H.; UMEDA, T.; OMURA, Y.; MATSUMOTO, H. Harmonic Langmuir waves. II. Turbulence spectrum. **The Physics of Plasmas**, v. 10, n. 2, p. 373–381, Feb. 2003.

GURNETT, D. A. et al. Fine structure of Langmuir waves produced by a solar electron event. **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 98, n. A4, p.5631-5637, Apr. 1993.

LIN, R. P. et al. Evidence for nonlinear wave-wave interactions in solar type III radio bursts. **The Astrophysical Journal**, v. 308, n. 2, p. 954-965, Sept. 1986.

OMURA, Y.; MATSUMOTO, H. Kempo1: Technical guide to one-dimensional electromagnetic particle code. In: MATSUMOTO, H.; OMURA, Y. (Ed.). **Computer Space Plasma Physics: Simulation Techniques and Software**. [S.l.]: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), 1993.

SIMÕES JR., F. J. R. **Simulação Computacional de Emissões Eletromagnéticas em Plasmas Espaciais**. Tese (Doutorado) — INPE - 15344-TDI/1380, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Maio 2008.

SIMÕES JR., F.J.R.; ALVES, M. V.; GAELZER, R. One-dimensional electromagnetic simulation of multiple electron beams propagating in space plasmas. **Journal of Geophysical Research – Space Physics**, v. 115, p. A06105, June 2010.

YOON, P. H. Generalized weak turbulence theory. **The Physics of Plasmas**, v. 7, n. 12, p. 4858–4871, Dec. 2000.

YOON, P. H. et al. Harmonic Langmuir waves. I. Nonlinear dispersion relation. **The Physics of Plasmas**, v. 10, n. 2, p. 364–372, Feb. 2003.