

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE PLASMAS ESPACIAIS VIA PARTÍCULAS (PIC-codes)

DÉBORA PIEGAS PAVANI¹; FERNANDO JAQUES RUIZ SIMÕES JUNIOR²

¹Universidade Federal de Pelotas – de.pavani@hotmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – fernando.simoese@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Acompanhando a atividade solar pode-se constatar que a principal origem de tempestades magnéticas são os fenômenos solares. Dependendo do tipo de estrutura, nuvens magnéticas ou CME (ejeção de massa coronal) há uma chance maior de entrada de partículas energéticas nossa magnetosfera.

Em momentos onde há intensa atividade solar, há possibilidade de que grandes nuvens de plasma sejam ejetadas a partir do Sol, criando assim ondas de choque que ao se propagarem na direção radial a partir do Sol aceleram partículas (WARMUTH & MANN, 2005) que dão origem a emissão de rádio com frequências próximas a frequências local de plasma e seus harmônicos. Essa emissão de rádio tem significativa importância pois precede a chegada de partículas muito energéticas.

Na busca de evitar danos gerados por essas partículas em sistemas tecnológicos como sistemas de navegação e comunicação, a física de plasma espacial e clima espacial visa compreender melhor os mecanismos associados aos fenômenos acima apresentados.

Buscando compreender o mecanismo físico de geração de ondas, foram realizadas simulações computacionais através de um código de simulação via partículas unidimensional KEMPO-1D (MATSUMOTO & OMURA, 1985) modificado para incluir vários feixes de elétrons (SIMÕES JR., 2008; SIMÕES JR., et al. 2010).

2. METODOLOGIA

Para a realização dos estudos, foi feito inicialmente uma introdução ao código, buscando uma melhor compreensão de suas subrotinas e da física envolvida no problema.

O código utilizado foi o KEMPO-1D (Kyoto ElectroMagnetic Pic cOde), que utiliza a técnica PIC (particle-in-cell), no código são calculadas as equações de Maxwell e movimento de forma auto consistente, isto é, são calculados os efeitos dos campos eletromagnéticos sobre as partículas e os campos gerados pelos movimentos das próprias partículas já que estas são elétrons e íons. Após rodar a simulação, a análise dos resultados foi realizada através do IDL (Interactive Data Language).

As equações básicas que são calculadas no código são:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho / \epsilon_0, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},\end{aligned}$$

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}).$$

As equações acima são as equações de Maxwell e a força de Lorentz, respectivamente.

Foram realizadas três diferentes casos nas simulações, onde o caso 1 foi utilizado para servir de referência para a comparação com outros dois. No caso 2 foi alterado a frequência de plasma do feixe e no caso 3 a velocidade térmica do feixe foi alterada.

Para cada caso foram gerados seis resultados: energia elétrica, energia magnética, energia cinética, energia total, relação de dispersão dos modos paralelos de plasma com propagação para frente para trás.

Os resultados gerados são fundamentais para análise do sistema, como por exemplo a energia total, que quando constante significa um sistema sem fontes ou perdas de partículas e campos. Já o diagnóstico de relações de dispersão apresenta os diferentes tipos de ondas encontrados no sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos resultados obtidos, pode-se analisar caso a caso comparando entre eles o obtido em cada gráfico gerado, que podem ser observados nas figuras abaixo.

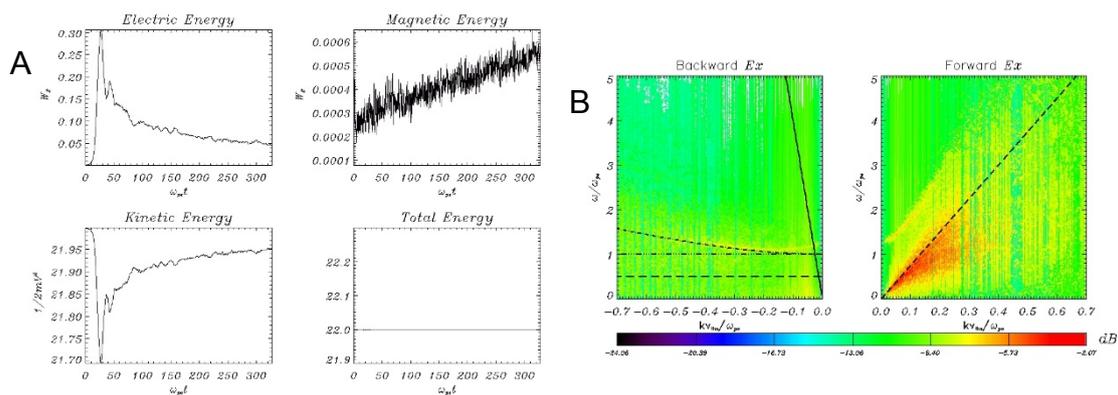


Figura 1: Resultados da simulação obtidos para o caso 1 onde respectivamente tem-se representados as energias elétrica, magnética, cinética e total (quadro A)). Relação de dispersão do caso 1 com ondas se propagando para a frente (forward) e para trás (backward) (quadro B))

Quando comparamos as energias do caso 1 (Figura 1 A) com o caso 2 (Figura 2 A), podemos observar que as energias do sistema não são muito modificadas, o que é de se esperar uma vez que a variação da frequência de plasma implica na variação da densidade do plasma. A frequência foi modificada de $\omega_{pe} = 0,735$ para $0,525$.

Comparando os diagramas de relação de dispersão ($\omega \times k$) Figuras (1B) e (2B), é possível observar que a variação da frequência para o caso 2 modifica o modo de feixe linear (Figura 1 B – modo forward), para o chamado modo de feixe modificado (Figura 2 B – modo forward). Os outros modos de plasma permanecem praticamente inalterados.

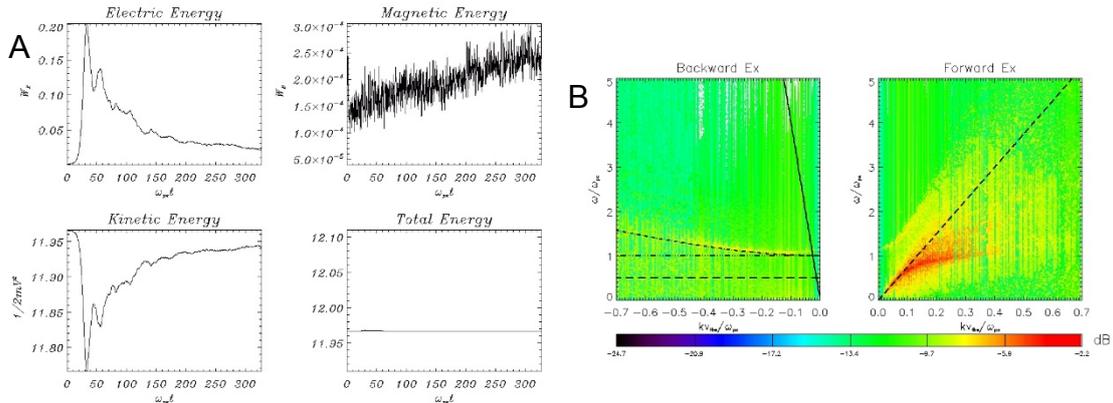


Figura 2: Resultados da simulação obtidos para o caso 2 onde respectivamente tem-se representados as energias elétrica, magnética, cinética e total (quadro A). Relação de dispersão do caso 2 com ondas se propagando para a frente (forward) e para trás (backward) (quadro B).

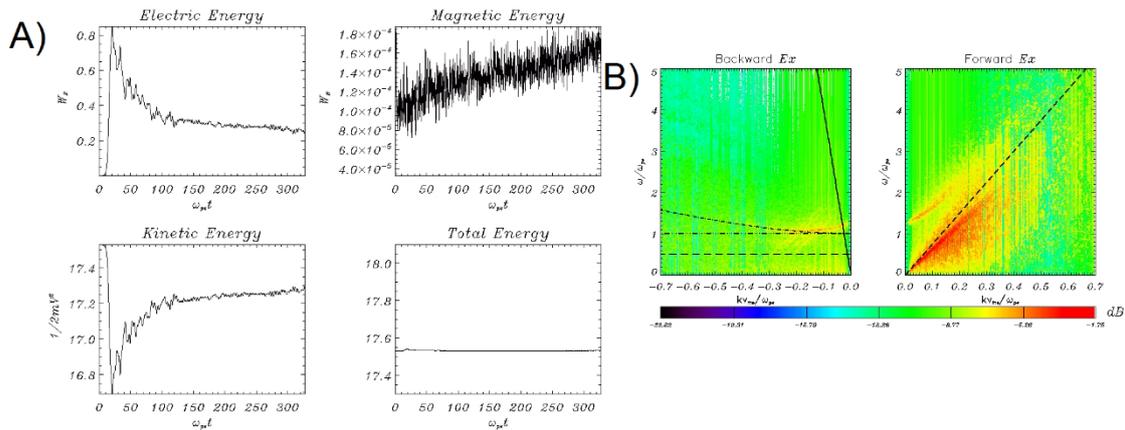


Figura 3: Resultados da simulação obtidos para o caso 3 onde respectivamente tem-se representados as energias elétrica, magnética, cinética e total (quadro A). Relação de dispersão do caso 2 com ondas se propagando para a frente (forward) e para trás (backward) (quadro B).

Para o terceiro caso foi alterado como parâmetro inicial da simulação a velocidade térmica do sistema, que inicialmente era 2,54 e passou para 1,0. Neste caso também observamos as energias do sistema aparentam o mesmo comportamento (Figura 3B).

Quando comparamos os diagramas de relação de dispersão (ω_{xk}) Figuras (1B) e (3B), é possível observar que a variação da velocidade térmica para o caso 3 não modifica o modo de feixe linear (Figura 1 B – modo forward), apenas torna o feixe mais intenso (Figura 3 B – modo forward).

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais três diferentes casos variando parâmetros específicos que definem um plasma. Foram alterados

os parâmetros iniciais em busca de diferentes resultados para análises sobre instabilidades e fenômenos associados a interações feixe-plasma. Foi possível realizar a análise dos diagnósticos e estudar sobre o processo físico que envolve a geração de ondas através do código.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Matsumoto, H. & Omura, Y., *Particle simulation of eletromagnetic waves ans its application to space plasmas*, **Computer Simulation of Space Plasma**, p. 43-116, 1985.

Omura, Y. & Matsumoto., *Technical guide to one-dimensional eletromagnetic particle code*, **Computer Space Plasma Physics: Simulation Techniques and Software**, p. 304, 1993.

Simões Jr, F.J.R, Alves, M. V.,Costa e Gaelzer, R., *One-Dimensional Electromagnetic Simulation of Multiple Electron Beams Propagating in the Space Plasmas*, **Journal of Geophysical Research**, 115, 2010.

Simões Jr, F.J.R. **Simulação computacional de emissões eletromagnéticas em plasmas espaciais**. 2008. Tese (Doutorado em geofísica Espacial) – Curso de Pós-graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Warmuth, A. & Mann, G., *The application of radio diagnostics to the study of the solar drivers of space wather*, **Space wather: The physics Behind a Slogan**, p. 51-70, 2005.