

ESTUDO DO MOVIMENTO DE PARTÍCULAS CARREGADAS EM CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS CRUZADOS

BERNARDO PINTO SILVEIRA¹:

JOEL PAVAN²

¹*Universidade Federal de Pelotas – be10silveira@hotmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – joel.pavan@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

A compreensão do movimento de partículas carregadas é essencial na física dos plasmas e pode abrir portas para as aplicações espaciais como o projeto e operação de propulsores de foguetes. A dinâmica dessas partículas carregadas, que são submetidas a campos elétricos e magnéticos simultaneamente, é controlada por equações de movimento complexas, que podem desempenhar um papel importante na exploração espacial.

Além disso, as equações de movimento, que explicam como as partículas carregadas em plasmas reagem a campos elétricos e magnéticos, podem ter muitas aplicações científicas e tecnológicas.

Em particular, quando uma partícula carregada é submetida a campos eletromagnéticos cruzados, constantes, uniformes e perpendiculares, ela descreve uma trajetória do tipo cicloide. Essa trajetória decorre da combinação do movimento linear imposto pelo campo elétrico e do movimento curvo imposto pelo campo magnético.

A compreensão desse fenômeno é relevante para estudar o transporte de energia, o momento linear e o deslocamento das partículas em plasmas. Além disso, fornece uma base conceitual essencial para a análise desses sistemas dinâmicos e complexos.

Adicionalmente, a configuração de campos cruzados pode ser relevante para foguetes espaciais, onde a propulsão é obtida pela aceleração de partículas carregadas, geralmente íons, em um plasma ionizado. A trajetória dessas partículas aceleradas em campos eletromagnéticos determina a eficiência do propulsor e, portanto, a capacidade dos foguetes de explorar o espaço.

2. METODOLOGIA

Iniciamos o estudo revisando a literatura sobre o movimento cicloide de partículas carregadas na física de plasmas. Isso incluiu revisões de recursos acadêmicos, livros e artigos científicos pertinentes. Para obter uma compreensão sólida das bases teóricas e práticas do movimento cicloide em plasmas, examinamos, sobretudo, livros como "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion" de F. F. Chen e "Fundamentals of Plasma Physics" de J. A. Bittencourt.

Essas fontes forneceram informações pertinentes, incluindo conceitos essenciais, equações e teorias sobre o movimento cicloide, que permitiram estabelecer noções básicas sobre as equações de movimento da força de Lorentz, que descrevem a trajetória de partículas carregadas em campos eletromagnéticos.

Após isso, realizamos um estudo sobre métodos numéricos, como métodos de diferenças finitas, que podem ser usados para calcular numericamente o

movimento de partículas em campos elétricos e magnéticos e o implementamos no trabalho através de simulações realizadas na linguagem de programação FORTRAN, sendo capazes de obter resultados para a evolução do movimento das partículas carregadas em campos elétricos e magnéticos com o auxílio das equações de movimento através da força de Lorentz para cada componente x, y, z, sendo representadas da seguinte forma:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m}(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{e} \quad \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt},$$

onde, em unidades arbitrárias, q é a carga elétrica da partícula com o valor $q=1$, m é a massa da mesma partícula com o valor $m=1$, \vec{E} é o vetor campo elétrico onde foi utilizado a coordenada E_z com o valor para o seu campo $E_z=1$, \vec{B} o vetor campo magnético onde foi utilizado a coordenada B_x com o valor também $B_x=1$, \vec{v} sendo o vetor velocidade e \vec{r} o vetor posição da partícula em questão utilizando $\vec{v}=0$ e $\vec{r}=0$ para seus valores iniciais.

A simulação feita com as equações acima foram comparadas com o resultado algébrico conhecido dado por:

$$x(t) = \frac{E_0}{B_0} \left[t - \frac{1}{\Omega_c} \sin(\Omega_c t) \right] \quad \text{e} \quad y(t) = \frac{E_0}{B_0} \frac{1}{\Omega_c} [1 - \cos(\Omega_c t)],$$

onde Ω_c é a frequência de cíclotron dada por $\Omega_c = qB/m$.

Essas equações paramétricas descrevem a trajetória de uma partícula em forma de cicloide enquanto ela se move ao longo da curva. À medida que t varia, a partícula percorre a curva e gera a forma característica de uma série de arcos conectados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista a realização da revisão bibliográfica do livro “*Fundamentals of Plasma Physics* do autor BITTENCOURT, J. A.” e da implementação do algoritmo para realizarmos as simulações necessárias, percebemos que os resultados obtidos através das simulações são consistentes com as previsões teóricas baseadas na revisão da literatura (BITTENCOURT, 2004). A seguir, é mostrada a imagem do gráfico obtido através da literatura para uma trajetória cicloide de uma partícula carregada com campos cruzados ($E_z \times B_x$).

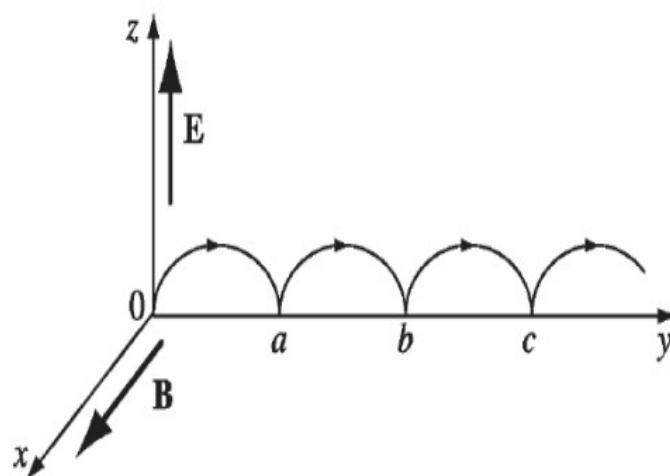


Figura 1: Gráfico da trajetória cicloide da partícula em campos cruzados ($E_z \times B_x$).

Realizando o cálculo numérico, foi possível demonstrar o comportamento cicloide de uma partícula carregada em campos cruzados através das equações descritas na metodologia, gerando um gráfico de campos cruzados ($E_z \times B_x$).

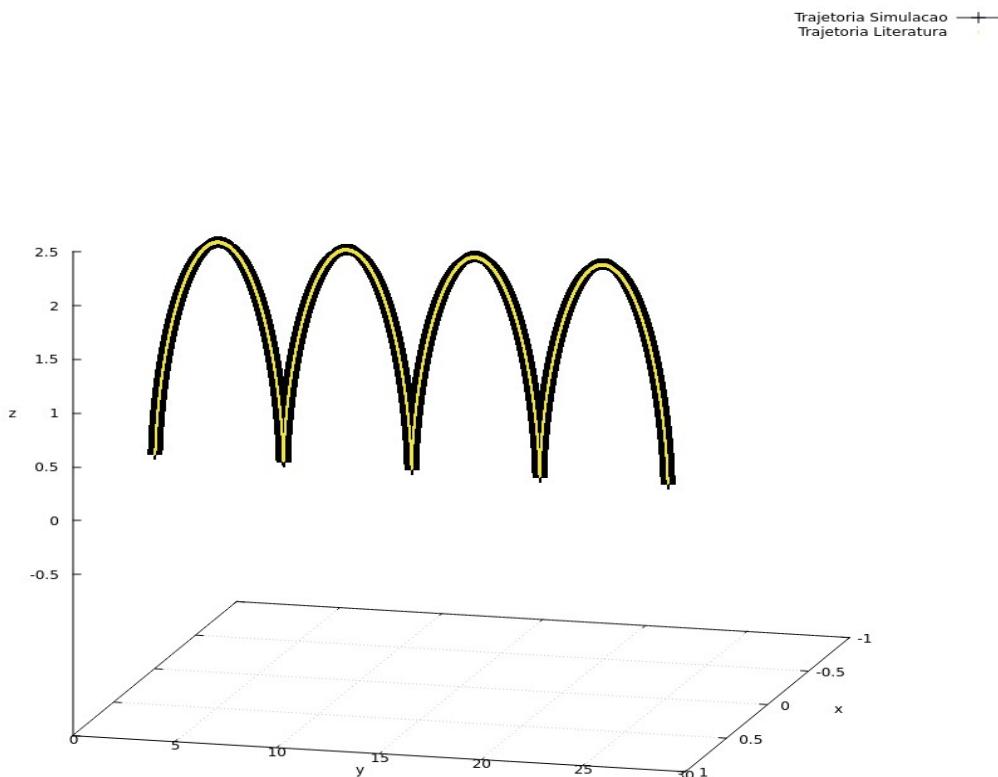


Figura 2: Gráfico da trajetória da partícula carregada em campos cruzados ($E_z \times B_x$) sobreposta à trajetória cicloidal teórica.

4. CONCLUSÕES

Com isso, implementando a teoria revisada, através de simulações numéricas, somos capazes de obter o comportamento das partículas para diferentes valores de campos eletromagnéticos. Sendo esse comportamento muito importante para obter uma compreensão das partículas elementares e das leis fundamentais da física, assim como, realizar a manipulação da trajetória das partículas carregadas em aceleradores de partículas, analisar as propriedades moleculares, sua utilização em mecanismos de geração de energia elétrica, em sua eficiência em uma configuração para propulsores elétricos, além de sua utilização em motores eletromagnéticos para controlar o movimento em sistemas como trens de levitação magnética, também na execução de ressonâncias magnéticas na medicina e muitas outras aplicações.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics**. Springer Science & Business Media, 2004.

CHEN, Francis F. et al. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. New York: Plenum press, 1984.

- GRIFFITHS, David J. **Introduction to electrodynamics**. [s. l.]: American Association of Physics Teachers, 2005.
- DAVIDSON, Ronald. **Methods in nonlinear plasma theory**. [s. l.]: Elsevier, 2012.
- HASEGAWA, Akira. **Plasma instabilities and nonlinear effects**. [s. l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 8.
- FLORKOWSKI, Marek. Effect of Interplay between Parallel and Perpendicular Magnetic and Electric Fields on Partial Discharges. **Energies**, v. 16, n. 13, p. 4847, 2023.
- JESUS, V.L.B de; GUIMARAES, A.P; OLIVEIRA, I.S. Classical and quantum mechanics of a charged particle in oscillating electric and magnetic fields. **Brazilian Journal of Physics**, SciELO Brasil, v. 29, p. 541–546, 1999.