



Desenvolvimento de um código para simulações tipo *particle-in-cell*

Bruno Silveira Nunes¹, Alexandre Bonatto², Roger Pizzato Nunes¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

²Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, Porto Alegre, RS, Brasil

¹bruno_silveira_nunes@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

A natureza complexa de problemas encontrados em física de plasma há tempos tem motivado o interesse em simulações computacionais. Ao longo das últimas décadas, tais simulações vêm desempenhando um papel importante na validação de modelos e no desenvolvimento de experimentos envolvendo plasmas. De fato, simular todas as partículas de um plasma é computacionalmente inviável, porém o algoritmo *particle-in-cell* (PIC) permite obter uma boa aproximação do resultado real, utilizando-se do conceito de macropartículas.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um código para simular plasmas, através do método PIC. Inicialmente, o código simulará sistemas unidimensionais e eletrostáticos. A validação do código será realizada comparando-o com um sistema físico passível de descrição analítica.

2. CÓDIGO PARTICLE-IN-CELL

O código é subdividido em 5 etapas principais (vide figura 1):

1. Criação e distribuição das partículas no sistema;
2. Pesagem das partículas nas células;
3. Cálculo do campo e do potencial elétrico;
4. Movimentação das partículas;
5. Registro dos resultados.

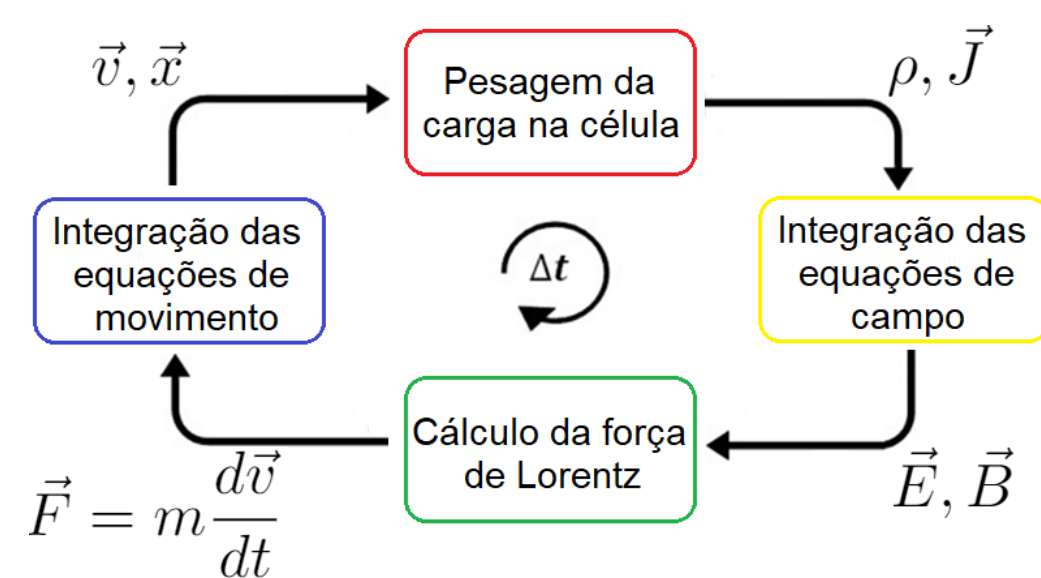


Figura 1: Laço temporal típico do código PIC

3. SISTEMA ANALISADO E REFERENCIAL TEÓRICO

Prótons e elétrons são distribuídos através de uma função de densidade de carga elétrica constante η_0 , em uma fração do espaço simulado. Os dois tipos de partículas são deslocados por uma distância δ .

As densidades de partículas de ambas espécies desse sistema constam na figura 2.

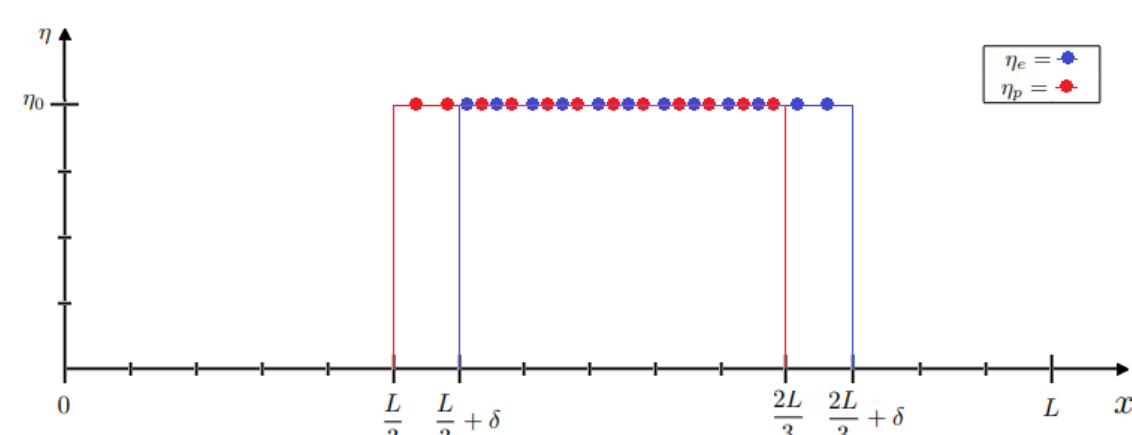


Figura 2: Representação esquemática do sistema analisado

Seja $\eta_e = \eta + \delta\eta$ a densidade de elétrons (móveis) e $\eta_p = \eta$ a densidade de prótons (fixos). Pode-se demonstrar que a equação diferencial para uma pequena variação de elétrons $\delta\eta$ induzida pelo deslocamento δ é dada por

$$\frac{\partial^2 \delta\eta}{\partial t^2} = -\frac{q^2 \eta}{m \epsilon_0} \delta\eta$$

A solução desta equação diferencial é uma função harmônica com a seguinte frequência angular

$$\omega_p = \sqrt{\frac{q^2 \eta}{m \epsilon_0}} \quad (1)$$

4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Foram adotados as seguintes quantidades iniciais:

- Tamanho do sistema: $L = 1\text{m}$
- Número de células: $N_{cel} = 1.000$
- Deslocamento entre espécies: $\delta = 0,01\text{m}$
- Tempo final da simulação: $T_f = 500\text{ns}$
- Intervalo de tempo: $\Delta t = 0,1\text{ns}$
- Tempo de registro dos dados: $T_s = 0,1\text{ns}$
- Número de macropartículas por espécie: 10.000
- Velocidade inicial das macropartículas: $v_i = 0\text{m/s}$
- Densidade de elétrons: $\eta_e = 1,242 \cdot 10^{12}\text{m}^{-3}$
- Densidade de prótons: $\eta_p = 1,242 \cdot 10^{12}\text{m}^{-3}$

Uma maneira de se visualizar o que ocorre nas diversas posições do sistema é utilizar partículas de prova. A figura 3 mostra a posição destas partículas em função do tempo.

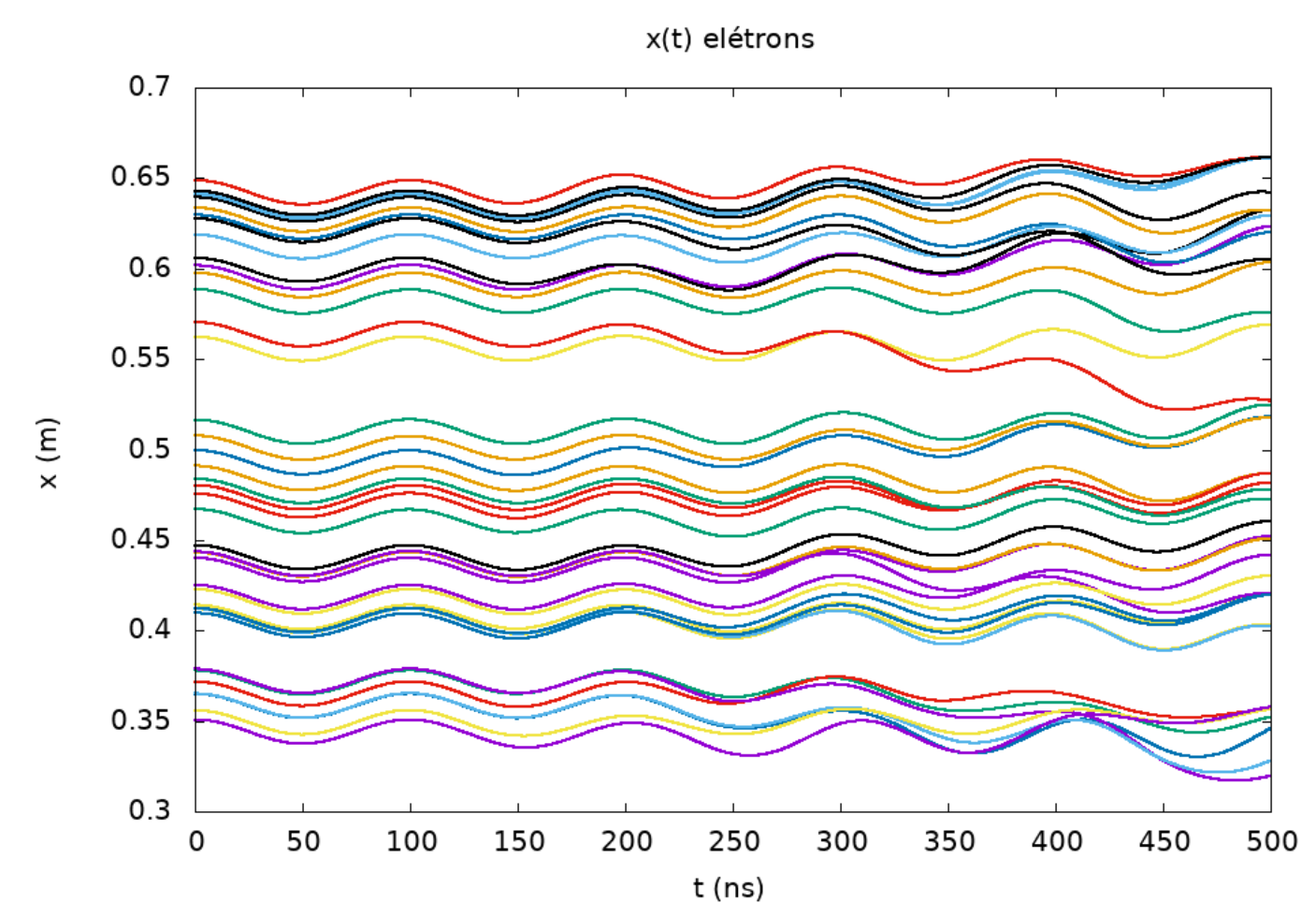


Figura 3: Evolução temporal da posição de 41 elétrons de prova

Foi realizada uma análise estatística dos períodos de oscilação das partículas da figura 3. O resultado está apresentado na tabela 1.

Tabela 1: Média dos períodos de oscilação dos 41 elétrons de prova

	1ª Oscilação	2ª Oscilação	3ª Oscilação
$T(\text{ns})$	$99,8 \pm 0,2$	$100,1 \pm 1,3$	$100,4 \pm 2,1$

5. CONCLUSÃO

Este resultado é compatível com o previsto analiticamente, haja vista que ao se utilizar as quantidades da seção 4 na equação (1) resulta num período de $T = 100\text{ns}$, período este que está evidenciado qualitativamente nas oscilações dos elétrons na figura 3 e quantitativamente nos dados da tabela 1.

6. REFERÊNCIAS

1. Charles K. Birdsall, A. Bruce Langdon, Plasma physics via computer simulation-IOP (1991);
2. Philipp K. Janert, Gnuplot in Action: Understanding Data with Graphs, Manning Publications (2016);
3. Isaac Amidror, Mastering the Discrete Fourier Transform in One, Two or Several Dimensions Pitfalls and Artifacts, Springer-Verlag London (2013);