

## MAGNETO-FLUIDODINÂMICA: UMA BREVE COMPRESSÃO DA DINÂMICA IONOSFÉRICA POR MEIOS ANALÍTICOS

Autor (Josué dos Anjos Silva); Co-autor (Byanca Jaqueline Sousa Amorim); Co-autor (Halan Douglas Almeida Braga); Orientador (João Paulo da Silva Alves)

*Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Bragança josue-juka@hotmail.com, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Bragança byamorim02@gmail.com, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Bragança halandouglas@hotmail.com, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém joaopaulocasimir@gmail.com*

### INTRODUÇÃO

A magneto-fluidodinâmica também conhecida como magneto-hidrodinâmica (MHD), é um ramo da Física, “que trata do comportamento de um sistema combinado de campos eletromagnéticos e de um líquido ou gás condutor” (Jackson 1983), especialmente plasmas, ou seja, combina as equações de Navier-Stokes da fluidodinâmica com as de Maxwell do eletromagnetismo.

Por ser uma das camadas mais externas da atmosfera, conforme a figura 1 recebe grande quantidade de radiação solar, o que propicia a criação de íons e suas altas temperaturas constituindo uma região de plasma.

Figura 1: Camadas da atmosfera



Fonte: <http://atm-revolution.blogs.sapo.pt/3418.html>

Ela está sujeita aos campos gravitacional e eletromagnético da terra, influenciando diretamente as partículas desse meio. E ainda, o planeta gira em torno de seu eixo, causando efeitos que também devem ser considerados nessa abordagem, como o de Coriolis e Eötvös.

Este trabalho consiste em utilizar as equações MHD nesta região da atmosfera e buscar respostas para questões relacionadas à dinâmica ionosférica. Segundo Jackson:

“No caso de um fluido, por outro lado, os campos agem não só sobre os elétrons, mas também sobre os átomos ionizados, produzindo efeitos dinâmicos que incluem até o movimento global do próprio meio. Este movimento de massa, por seu turno, provoca modificações dos campos eletromagnéticos. Por isso devemos analisar um complexo sistema acoplado de matéria e de campos” (Jackson, 1983, pág. 362).

## METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado com uso de metodologia do tipo pesquisa bibliográfica (THIOLLENT, 1986). Sua produção se deu por meio da dedução das equações de relevância para a pesquisa: no campo da fluidodinâmica, as Equações de Navier-Stokes e Euler; e as quatro Equações de Maxwell no campo da eletrostática. O entendimento da magneto-fluidodinâmica se deu por meio de orientações via Skype usando o processador textual “LyX” devido a praticidade no desenvolvimento das equações. O uso de livros como: HSU, Hwei P. Análise Vetorial; STEWART, James. Cálculo vol.2; ANTON, Howard; et al. Cálculo; HEWITT, Paul G. Física Conceitual; NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física Básica vol.2; NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física Básica vol.3; HALLIDAY, David; et al. Física 3; REITZ, John; et al. Fundamentos da teoria eletromagnética; JACKSON, John David. Eletrodinâmica Clássica; foram fundamentais para se ter uma noção de forma introdutória da dinâmica ionosférica, onde podem ser aplicadas as equações da Magneto-fluidodinâmica.

## RESULTADOS

Na pesquisa desenvolvida os resultados encontrados acerca dos efeitos relacionados aos fenômenos atmosféricos tiveram uma interpretação analítica apresentando correspondência com os fenômenos ionosféricos. Os resultados que seguem foram obtidos por meio de orientação via skype com base na bibliografia deste trabalho.

Partindo da segunda lei de Newton e da conservação do momento linear chegamos à equação de Euler:

$$\vec{f}_{externa} + \vec{f}_{interna} = \frac{d\vec{j}}{dt}$$

A qual descreve o movimento de translação de um fluido, em que  $\vec{j}$  é a densidade volumétrica de força. Para um fluido em rotação, utilizamos a conservação do momento angular na equação anterior, chegando em:

$$\vec{T}_{externa} + \vec{T}_{interna} = \frac{d\vec{\Gamma}}{dt}$$

Na equação acima  $\vec{T}$  e  $\vec{\Gamma}$  são a densidade volumétrica de torque e a densidade de velocidade angular do fluido, respectivamente. Esta é a equação de Euler para a rotação. Na primeira equação com  $\vec{f}_{externa} = -\nabla P$  (NUSSENVEIG, 2014) e auxílio de cálculo vetorial obtivemos o seguinte resultado:

$$f - \nabla P = \nabla \left[ \frac{1}{2} \nabla(v^2) - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v}) + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right] + \vec{v} \frac{d\rho}{dt}$$

Esta é a equação de Euler modificada. Um caso particular desta é a equação de Bernoulli para escoamento uniforme de fluidos incompressíveis em um campo de forças conservativo:

$$P + \rho gH + \frac{\rho v^2}{2} = constante$$

Outro caso particular da equação de Euler modificada foi deduzido para escoamento com vórtices e circulação. Para isto foi definido a circulação como:  $\vec{\Omega} = \nabla \times \vec{v}$ , que foi aplicado no teorema de Stokes. Após certo labor algébrico chegamos à equação de Navier-Stokes:

$$\nabla \left( \frac{1}{\rho} \right) \times (f - \nabla P) + \frac{1}{\rho} \nabla \times \vec{f} = \nabla \left( \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right) \times \vec{v} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \vec{\Omega} + \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} + \vec{\Omega} (\nabla \cdot \vec{v}) - (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{v} + (\vec{v} \cdot \nabla)$$

No campo da eletrostática demosmos as elegantes quatro equações de Maxwell em suas versões atuais, que nos limites da mecânica clássica descrevem muito bem o eletromagnetismo. Estas são equações bem conhecidas da literatura. São elas: lei de Gauss para os campos elétrico e magnético, as duas primeiras; lei da indução de Faraday e lei de Ampère com a correção de Maxwell, que garante a conservação da carga (equação da continuidade), são as outras duas. As equações MHD são resultado da união das equações desses dois domínios da Física.

Mas, se tratando da ionosfera, não temos qualquer fluido, e sim o plasma ionosférico. Plasma é considerado o quarto estado da matéria, pois não é sólido nem líquido, tão pouco gasoso. A ionosfera ou exosfera é uma camada que se situa em altitudes entre 80 e 400 km. Essa camada apresenta uma grande densidade iônica. Um plasma é um gás eletrizado (Hewitt. 2011). Devido à grande quantidade de íons nessa faixa da atmosfera e às altas temperaturas essa é considerada um plasma. Para entender, de forma introdutória, como esse plasma se comporta dentro de um campo eletromagnético começamos introduzindo um elétron na presença de um campo eletromagnético externo. Isto nos levou às seguintes equações:

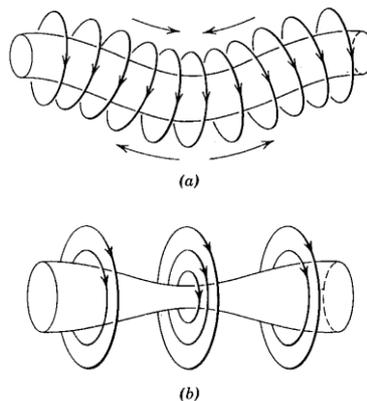
$$\left( x(t) - \frac{v_{0y}}{\Omega_0} \right)^2 + y^2(t) = \left( \frac{v_{0y}}{\Omega_0} \right)^2$$

Comparando com a equação do círculo, temos que  $x_c = R = \frac{v_{0y}}{\Omega_0}$  e  $y_c = 0$ .

## DISCUSSÃO

Com os dados desta produção em andamento, podemos perceber que as entidades físicas que constituem a ionosfera são fortemente afetadas por campos elétrico e magnéticos, alterando bastante sua trajetória, como podemos ver com a última equação. Os fluidos estão inseridos nos campos magnético e gravitacional. Assim, é natural que seu comportamento seja anômalo, principalmente se tratando de plasmas, já que estes são muito sensíveis a campos eletromagnéticos. Diante destes levantamentos, o desenvolvimento desta breve discussão mostra como as formulações da magnetofluidodinâmica podem nos fornecer subsídios para compreender melhor os fenômenos atmosféricos sem necessidade de pesquisa *in loco*. O que não exclui essa modalidade de pesquisa. A figura 2(a) mostra em três dimensões como seria a trajetória de elétron na presença de um campo eletromagnético externo para  $E \neq 0$ , enquanto que a 2(b) ilustra sua trajetória para  $E = 0$ .

Figura 2: (a) trajetória do elétron para  $E \neq 0$ . (b) para  $E = 0$ .



Fonte: Eletrodinâmica Clássica, pág. 372

## CONCLUSÕES

Esses resultados nos mostram de forma bastante resumida, pois analisamos o comportamento apenas de um elétron num campo eletromagnético, que a magneto-fluidodinâmica é uma ótima ferramenta de investigação da atmosfera, uma vez que os resultados alcançados nos fornecem uma ideia de como se dá a dinâmica ionosférica. Vale ressaltar que este trabalho mostra apenas uma faceta da dinâmica ionosférica pois ainda não incluímos a contribuição de outras forças como a gravitacional, Coriolis e Eötvös, pois nossa produção está em andamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTON, Howard; et al. **Cálculo**. 8ª Edição - Porto Alegre: Bookman, 2007.

HALLIDAY, David et al. **Física 3**. Editor LTC; Edição 2014.

HEWITT, Paul G. **Física Conceitual**. 11ª Edição - Porto Alegre: Bookman, 2011.

HSU, Hwei P. **Análise Vetorial**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1972.

JACKSON, John David. **Eletrodinâmica Clássica**. Editora Guanabara Dois; edição de 1983.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica vol.2**. Editora Edgard Blucher; Edição 2014.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica vol.3**. Editora Edgard Blucher; Edição 2015.

Santana, Ana *et al.* **Camadas da atmosfera terrestre**. Disponível em <<http://atm-revolution.blogs.sapo.pt/3418.html>> Acesso em 28 de abril de 2016.

STEWART, James. **Cálculo vol.2**. Editora Cengage; Edição 2013.

THIOLLENT, Michel. Metodologia da pesquisa - ação. 2. ed. São Paulo: Cortez, 1986.