

# ESTUDO DA IONOSFERA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Valdir Gil Pillat<sup>1</sup>, Paulo Roberto Fagundes<sup>2</sup>, José Augusto Bittencourt<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mestrando em Física e Astronomia, Univap, Universidade do Vale do Paraíba, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, email: [valdirgp@yahoo.com.br](mailto:valdirgp@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Orientador, Univap, Universidade do Vale do Paraíba, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, email: [fagundes@univap.br](mailto:fagundes@univap.br)

<sup>3</sup> Orientador, INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1758, Jd. da Granja, São José dos Campos, SP, 12201-970, email: [jabittencourt@hotmail.com](mailto:jabittencourt@hotmail.com)

**RESUMO** - Este trabalho tem por objetivo mostrar alguns resultados gerados pelo programa computacional "Low-Latitude Ionosphere Model", ou "LION Model", que, como principal função, simula matematicamente os efeitos físicos e químicos, e o comportamento dinâmico da ionosfera tropical acima de 120 km de altitude. Através deste modelo computacional é possível gerar um ambiente ionosférico dinâmico com características regionais, reproduzindo de forma realista a densidade e a velocidade dos elétrons e íons, e suas variações com altitude, latitude, longitude e tempo, em função da estação do ano e ciclo solar. Como resultados, o programa grava um arquivo contendo as distribuições espacial e temporal das densidades e velocidades dos elétrons e dos vários íons, o qual é analisado através de gráficos gerados no próprio programa.

**Palavras-chave:** ionosfera, simulação numérica, modelo ionosférico, ionosonda digital, Visual Basic

**Área do Conhecimento:** I - Ciências Exatas e da Terra

## INTRODUÇÃO

A ionosfera pode ser classificada conforme a variação vertical da sua densidade eletrônica. Sua formação, nesse caso, deve-se à produção de pares íons/elétrons, principalmente por absorção da radiação solar em raios X, ultravioleta (UV) e extremo ultravioleta (EUV), acarretando, também, aquecimento da atmosfera. Íons de elevada energia cinética também podem produzir ionização por colisão. Já a perda de íons e elétrons deve-se à recombinação dos pares íons-elétrons [4]. Os processos eletrodinâmicos exercem grande influência no transporte e distribuição da ionização. De acordo com o perfil de densidade eletrônica, a ionosfera pode ser dividida como mostra a Figura 1.

a) **Região D** – Situa-se entre 70 e 90 km de altitude e desaparece à noite, devido à rápida recombinação íon-elétron. As radiações ionizantes na parte superior (80 – 90 km) da região D são os raios X e a radiação UV *Lyman- $\alpha$*  (1216 Å), que ionizam as moléculas de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e NO em torno dos 85 km. Raios cósmicos são responsáveis por ionização adicional nas alturas inferiores. A produção dos íons negativos é realizada através do processo de junção eletrônica (*attachment*). A perda dos íons negativos ocorre através dos seguintes processos:

1) elétrons formam íons negativos que são destruídos por separação associativa (*photo-detachment*), durante o dia;

2) decaimento colisional iônico (*associative detachment*):  $O + O^- \rightarrow O_2 + e$ ;

3) neutralização mútua:  $O^- + A^+ \rightarrow O + A$ .

Esta camada tem a capacidade de refletir os sinais de baixa frequência. As altas frequências passam através dela e são fortemente atenuadas [3].

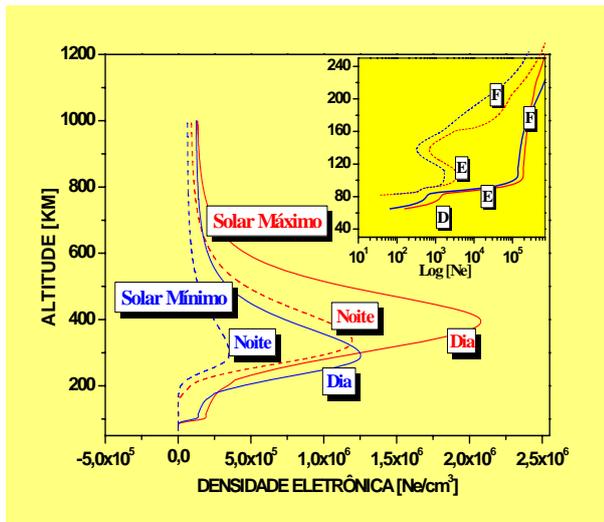
b) **Região E** – Situa-se entre 90 km e 150 km de altitude. A taxa de recombinação iônica, nesta camada, é rápida depois do pôr-do-sol e ela desaparece durante a noite. A parte inferior da região E (90–100 km) tem como radiação ionizante os raios X, sendo que acima dos 100 km de altitude a ionização ocorre pela radiação na faixa do UV e das linhas EUV, tal como *Lyman- $\beta$*  (1025,7 Å). Assim como na região D, os íons dominantes são NO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> e O<sub>2</sub><sup>+</sup>. A produção dos íons é feita através do processo de fotoionização ( $N + h\nu \rightarrow N^+ + e$ ) e a perda é realizada principalmente pela recombinação dissociativa ( $O_2 + e \rightarrow O + O$  e  $NO^+ + e \rightarrow N + O$ ). Esta camada tem a capacidade de refletir sinais de frequências mais altas do que as que são refletidas pela camada D.

c) **Região F** – Situa-se acima da camada E e está subdividida em F1 e F2. O nível de ionização nestas camadas é elevado, comparado com as camadas D e E, e apresenta uma variação grande durante o transcorrer de um dia. Durante o dia o processo de fotoionização do oxigênio atômico é a principal fonte de íons (O<sup>+</sup>) e elétrons. Assim como as camadas D e E, a camada F1 é observada apenas durante o dia e estende-se de 150 a 200 km de altitude, sendo a radiação UV o maior agente ionizante [3]. A camada F2 estende-se de 200 km a até, aproximadamente, 1000 km, e apresenta um pico ao redor de 300 km. Acima do pico da camada F2, a densidade diminui aproximadamente exponencialmente até unir-se

com a magnetosfera e perder sua identidade. Ao contrário das outras regiões, esta é caracterizada por ionização atômica que produz igual número de elétrons e íons atômico positivos. A recombinação química é descrita como segue:

Na região F1 a produção de íons é realizada pelo seguinte processo: íons  $O^+$  transferem carga para NO e talvez para  $O_2$ . A perda é realizada pela recombinação dissociativa.

Na região F2 a produção é realizada através de fotoionização, como na camada F1, mas limitando este processo está a transferência de carga, com uma lei de recombinação do tipo “*attachment*”.



**Figura 1** – Camadas ionosféricas em função do horário e ciclo solar.

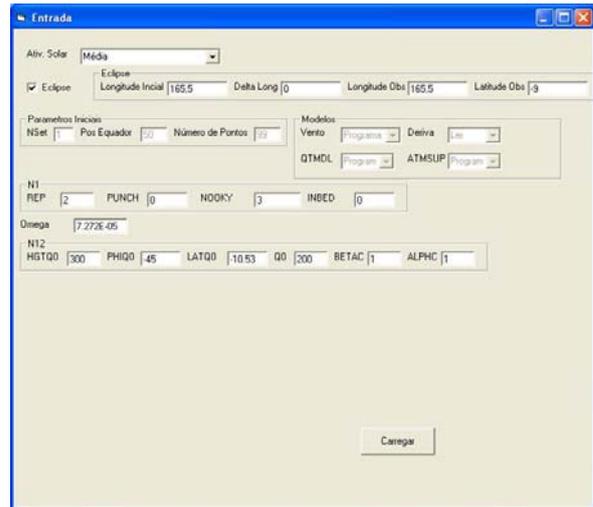
O objetivo deste trabalho é comparar os efeitos que ocorrem na ionosfera em baixas latitudes com os resultados gerados pela simulação matemática do modelo desenvolvido pelo Dr. J. A. Bittencourt.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O programa computacional “LION Model” é uma versão modificada do modelo original do Dr. J. A. Bittencourt [2], desenvolvido em Fortran. Este programa foi reescrito em Visual Basic [1], o qual possui um desenvolvimento voltado a janelas e, com isso, é possível melhorar a interface do programa com o usuário.

Algumas melhorias foram introduzidas para facilitar a modificação dos dados de entrada como fluxo solar, deriva ionosférica vertical, velocidade do vento neutro, dia, hora, coordenadas geográficas, atmosfera neutra, e densidade inicial do plasma ionosférico.

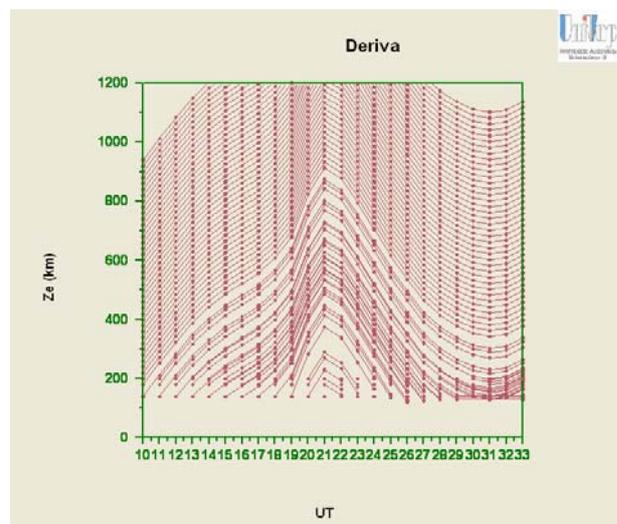
A versão anterior do programa utilizava um único arquivo que continha todos os parâmetros de entrada do modelo. A nova versão possibilita realizar alterações dos parâmetros de entrada de forma independente, utilizando uma interface gráfica, como mostra a Figura 2.



**Figura 2** – Interface gráfica para entrada de dados para gerar a saída do modelo

## RESULTADOS

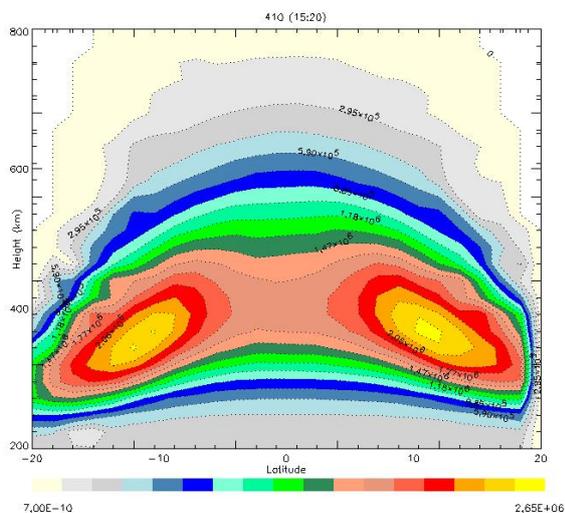
Este programa tem como principal saída as densidades eletrônica e iônica na ionosfera, geradas a partir dos parâmetros inseridos para o fluxo EUV solar, atmosfera neutra, deriva eletromagnética e vento termosférico. Utiliza-se um conjunto de linhas de campo magnético, em diferentes altitudes, necessário para que o modelo possa cobrir toda a região da ionosfera em altitude (120 km a 1000 km). Densidades eletrônicas iniciais, ao longo de cada linha de campo, são estabelecidas como condições iniciais, como também os horários inicial e final para cada linha de campo. A cobertura espacial deste conjunto de linhas de campo é mostrada na Figura 3, em termos da variação temporal das suas altitudes no equador magnético.



**Figura 3** – Exemplo do comportamento temporal das linhas de campo no equador magnético que foram utilizadas pelo modelo para uma determinada deriva vertical.

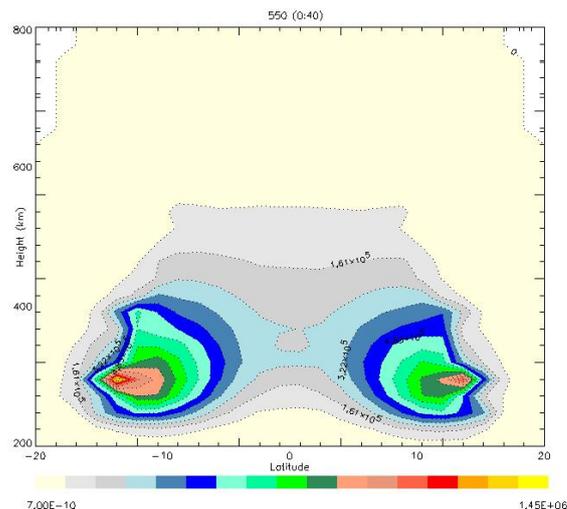
O arquivo com os horários inicial e final, bem como a altitude inicial e a grade temporal são utilizadas para gerar as densidades eletrônicas e iônicas na ionosfera durante todo dia. As figuras abaixo foram construídas a partir de um arquivo de deriva com 40 linhas de campo, com um intervalo de 10 km entre elas e altitude inicial de 140 km, para um período de atividade solar média, no setor longitudinal brasileiro.

Alguns resultados do modelo ionosférico LION serão mostrados neste trabalho. As Figuras 4 e 5 ilustram os resultados obtidos para a distribuição eletrônica nos instantes 15:20 e 0:40 horas (hora local), respectivamente. No eixo vertical mostra-se a variação com a altitude, e, no eixo horizontal, a variação com a latitude (coordenadas magnéticas). Através da Figura 4 é possível ver a formação de dois máximos de densidade eletrônica situados ao norte e ao sul do equador magnético, entre as latitudes de 15°S - 5°S e de 5°N - 15°N, e entre as altitudes de 300 - 450 km. Estas regiões de maior concentração são conhecidas como anomalia ionosférica equatorial ou anomalia de Appleton. Este fenômeno ocorre durante todo o dia, é intensificado logo após o pôr do sol e decai durante a noite, sendo fortemente dependente da atividade solar e estação do ano.



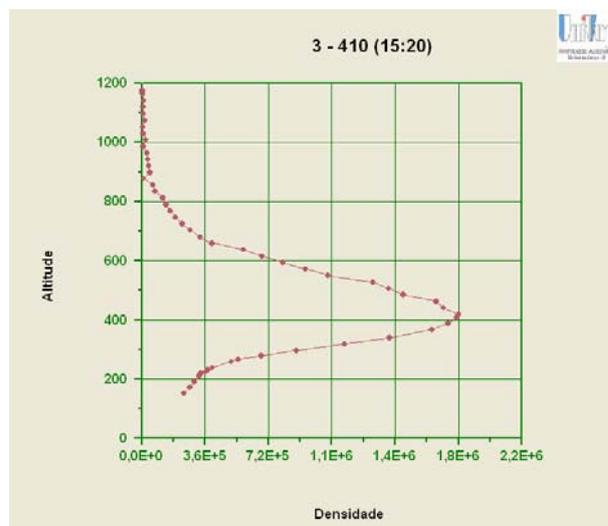
**Figura 4** – Exemplo da variação da densidade eletrônica em função da latitude magnética e altitude para o instante 15:20 horas (hora local).

Através da Figura 5 é possível ver que, neste horário, a anomalia ainda apresenta vestígios da sua forma, mas a concentração eletrônica já está bastante diminuída. Esta diminuição da ionização ao passar da noite ocorre devido à inexistência do processo de fotoionização solar, enquanto que os processos de recombinção química continuam atuando, provocando a neutralização parcial do plasma ionosférico.



**Figura 5** – Exemplo da variação da densidade eletrônica em função da latitude magnética e altitude para o instante 0:40 horas (hora local).

Outro resultado importante observado através do modelo LION é o perfil vertical da densidade eletrônica na ionosfera para uma dada latitude e horário escolhido, como mostra a Figura 6.



**Figura 6** – Perfil vertical da ionosfera na latitude magnética 3°N no instante 15:20 horas.

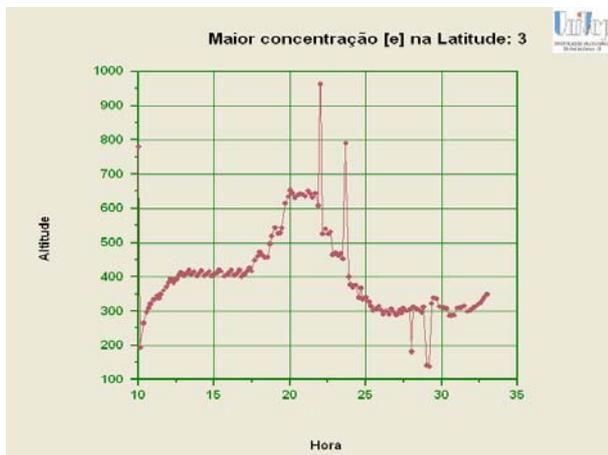
É de interesse comparar os perfis verticais de densidade eletrônica, obtidos pela simulação numérica, com dados ionosféricos experimentais. A comparação com dados de ionossonda pode ser realizada apenas na parte inferior da ionosfera, uma vez que a ionossonda não fornece dados acima do pico da camada ionosférica.

Outro resultado do programa é a variação do pico da densidade eletrônica em função da hora local, para uma determinada latitude magnética (Figura 7). Já a Figura 8 mostra a variação da altitude do pico em densidade eletrônica.



**Figura 7** – Exemplo da variação da densidade eletrônica em função da hora local para a latitude magnética 3° N.

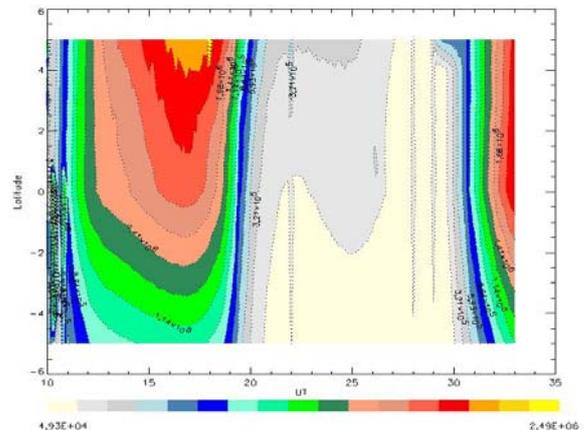
Através da Figura 7 é possível visualizar que a densidade eletrônica aumenta durante o dia até chegar a um pico por volta das 17 horas e a partir deste ponto a densidade começa a cair até chegar a um mínimo por volta das 5 horas, ou seja, a ionosfera aumenta a sua concentração eletrônica com a radiação solar através do processo de fotoionização. Ao anoitecer a radiação solar cessa e então a densidade de plasma diminui em consequência dos processos de recombinação.



**Figura 8** – Exemplo da variação do pico da camada em função da hora local para a latitude magnética 3°N.

Através da Figura 8 é possível visualizar que o pico da camada aumenta até atingir o seu máximo (próximos dos 700 km) por volta das 20 horas e durante o resto do dia se mantêm entre 300 e 450 km. Convém salientar que as variações bruscas que ocorrem no gráfico são decorrentes de flutuações no processo de cálculo numérico para determinadas linhas de campo. Estas devem ser identificadas e descartadas no processo de análise.

Outro resultado interessante é a variação da densidade eletrônica do pico da camada em função da latitude magnética e hora local.



**Figura 9** – Exemplo da variação do pico da camada em função da faixa de latitude entre 5°S e 5°N e da hora local.

Através da Figura 9 é possível observar a assimetria latitudinal do pico da densidade eletrônica para cada instante.

Gráficos análogos a estes podem também ser gerados, pelo modelo LION, para a distribuição espacial e temporal dos íons ionosféricos O+, O2+, NO+, N+ e N2+.

As figuras podem também ser geradas expressando as densidades em escala logarítmica.

## CONCLUSÃO

O programa computacional “LION Model” é uma importante ferramenta para estudar o comportamento da ionosfera em baixas latitudes em função do ciclo solar, estação do ano e condições geofísicas especiais. Uma outra importante aplicação é a realização de comparações com dados experimentais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PERRY, Greg. Aprenda em 24 horas Visual Basic 5. Rio de Janeiro: Campus, 1998
- [2] BITTENCOURT, J. A. The Low Latitude Ionosphere: A Dynamic Computer Model, INPE-5965-RPQ/674, São José dos Campos, 1996.
- [3] MUELLA, M. T. A. H. Ventos Termosféricos Meridionais Inferidos por Meio de Sondagens Ionosféricas. 2004. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2004.
- [4] FÍSICA DA ATMOSFERA. Internet site address: <http://www.df.ufpb.br/gpfa/ricardo/atmosfera.html>. Acesso em 24 nov. 2004.