

# CALCULO DA DENSIDADE ELETRÔNICA NA CAMADA F: PRIMEIROS RESULTADOS

*Tomás Ferreira de Freitas<sup>1</sup>, José Ricardo Abalde<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba, IPD, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, [tomas.freitas@ig.com.br](mailto:tomas.freitas@ig.com.br)

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

**Resumo-** O trabalho apresenta os primeiros resultados no cálculo da densidade eletrônica na camada ionosférica F a partir dos dados das intensidades na emissão do oxigênio atômico em 777,4 nm obtidos pelo fotômetro imageador do Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP instalado no Observatório do Pico dos Dias do Laboratório Nacional de Astrofísica e dos parâmetros ionosféricos extrapolados dos dados registrados pela ionosonda digital instalada no Campus Urbanova. Estes últimos parâmetros servem para calibrar em termos absolutos os valores relativos das imagens do fotômetro para um ponto geográfico (coordenada zenital), e em seguida extrapolarmos para toda a área em observação e obtermos a variação espaço temporal do citado parâmetro ionosférico. Este estudo envolve um importante tratamento das imagens obtidas pelo fotômetro imageador e os perfis em altura da frequência de reflexão dados pela ionosonda digital feitos através dos respectivos e sofisticados programas computacionais de ambos equipamentos.

**Palavras-chave:** ionosfera terrestre, densidade de elétrons, emissão OI777,4 nm, fotômetro imageador, camada ionosférica F.

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

## Introdução

O estudo em tempo real das condições do espaço interplanetário, do Sol até a Terra (magnetosfera, atmosfera superior, ionosfera e campo magnético terrestre), é crítico para a qualidade das rádios comunicações. Devemos lembrar que as ondas de rádio são responsáveis pelas comunicações vitais do mundo atual, desde os mais simples sistemas de rádio difusão até os sofisticados sistemas posicionamento e navegação baseados em satélite como o é o GPS, estão sujeita aos fenômenos da atividade solar que interfere na propagação das ondas eletromagnéticas. A ionosfera é a região da atmosfera terrestre localizada numa faixa em altitude de aproximadamente 50 km até mais de 1000 km. Nela moléculas que compõem a atmosfera são ionizadas pela radiação do Sol para produzir um gás ionizado. Durante o dia podem estar presentes quatro regiões denominadas: camada D (de 70 km a 90 km), camada E (de 90 km a 150 km), camada F1 (de 150 km a 200 km) e camada F2 (de 200 km a 1000 km). A mesosfera é a região da atmosfera, entre 50 km e 90 km aproximadamente, onde a temperatura decresce com a altura. A termosfera é a camada seguinte e mais extensa da atmosfera terrestre onde a temperatura cresce com a altura até o limite máximo que é a temperatura exosférica, esta camada se situa entre os 90 km e 300km.

Durante o entardecer a densidade eletrônica na ionosfera começa a decair devido à recombinação dos pares íons / elétrons e com o anoitecer, as camadas D e E desaparecem e as regiões F1 e F2 se unem numa única camada F2. O tempo de vida dos íons e elétrons gerados pela radiação solar durante o dia é maior na camada F2, sendo uma das razões pela qual esta camada permanece presente à noite. Tempos de vida típicos dos elétrons nas regiões E, F1 e F2 são, respectivamente, 20 segundos, 1 minuto e 20 minutos (Tascione, 1988). Devemos observar também que a distribuição de alguns componentes atmosféricos são afetados pela fotoionização e pelas reações químicas que acontecem nesta região da atmosfera terrestre.

A mais importante característica da ionosfera em termos de rádio comunicação é sua habilidade de refletir as ondas de rádio de baixa frequência. Vários métodos tem sido usados para estudar a ionosfera terrestre e o instrumento mais amplamente usado para este propósito é a ionosonda, que é um radar de alta frequência na faixa de 1 Mhz a 20 MHz aproximadamente que emite verticalmente uma onda de rádio na forma de pulsos.

Técnicas ópticas são também muito utilizadas no estudo da dinâmica da mesosfera, termosfera e ionosfera. As linhas de emissão do oxigênio atômico (OI 557,7nm; OI 630,0nm e OI 777,4 nm)

são das mais utilizadas neste procedimento. A emissão OI 557,7 nm vem do processo de recombinação dissociativa ( $O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O^+$  e  $O_2^+ + e \rightarrow O + O^*(^1S)$ ), seguido do processo radiativo ( $O^*(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu$  ( $\lambda = 557,7$  nm)). A emissão OI 630,0 nm vem do processo de recombinação dissociativa ( $O_2^+ + e \rightarrow O + O^*(^1D)$ ), seguido do processo radiativo ( $O^*(^1D) \rightarrow O(^3P) + h\nu$  ( $\lambda = 630,0$  nm)). A emissão OI 777,4 nm vem do processo de recombinação radiativa ( $O^+ + e \rightarrow O^* + O^*$ ), seguido do processo radiativo ( $O^*(^5P) \rightarrow O^*(^5S) + h\nu$  ( $\lambda = 777,4$  nm)) (Abalde et al., 2001, Bittencourt, 1995; Sahai et al, 1981). Estas emissões nos permite estudar a dinâmica espaço temporal da ionosfera; o calculo da densidade eletrônica, a altura do pico da camada F, a velocidade da deriva das irregularidades ionosféricas e outros parâmetros. Como os mecanismos destas três emissões são diferentes, elas nos fornecem informações das densidades do plasmas em altitudes diferentes da atmosfera terrestre; assim a emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm nos dão indicação da densidade eletrônica na base e no pico da ionosfera, regiões separadas de 50 km a 80 km. A intensidade da emissão OI 630,0 nm é proporcional ao produto das concentrações do  $O^+$  e do  $O_2$  e provem de uma estreita faixa abaixo do pico da camada F (~250-300 km) onde o  $O_2$  é mais abundante. A intensidade da emissão OI 777,4 nm depende da raiz quadrada do pico da densidade eletrônica centrada numa faixa próxima ao pico da camada F (~300-380 km), portanto podemos assumir que o perfil da distribuição vertical da densidade eletrônica é diretamente proporcional à raiz quadrada da intensidade da emissão em OI 777,4 nm (Tinsley e Bittencourt, 1975; Sahai et al, 1981; Bittencourt et al., 1983).

$$n_m(e) = (J_{777,4})^{1/2}$$

O uso das imagens na emissão OI 777,4 nm nos permite determinar a densidade eletrônica da camada F.

### Observação e Instrumentação

Observações na emissão OI 777,4 nm usando um fotômetro imageador vem sendo feitas no Observatório do Pico dos Dias do Laboratório Nacional de Astronomia – LNA, Brasópolis - MG (22° 32'04" S, 45° 34' 57" W) a partir de setembro 2002. Simultaneamente, vêm sendo realizadas observações ionosféricas, usando uma ionossonda digital, em São José dos Campos, (23° 12' 36"S, 45° 51' 36"W) desde de julho de 2000.

### O fotômetro imageador

O imageador de alta resolução espacial "all-sky" é um telescópio da empresa Keo Consultants que possui uma lente do tipo "olho de peixe"

permitindo uma visão de 180° no espaço considerado (lente telecentrica All-Sky Mamiya 24 mm). Os raios divergentes que compõe as imagens obtidas são colimados para passar pelo filtro apropriado; de uma serie de sete filtros de interferência que a roda de filtros de oito posições possui: oxigênio atômico OI 557,7; OI 630,0 e OI 777,4 nm, oxigênio molecular  $O_2$  865,3 nm, sódio NaD 589,3 nm, nitrogênio  $N_2$  427,7 nm e OH banda 9,4. Com este instrumental temos, em especial, imagens espaços-temporais da emissão do oxigênio atômico OI 777,4 nm que permitira obter dados detalhados e melhorar o conhecimento da morfologia e da dinâmica da densidade eletrônica região F da ionosfera em uma ampla região que abrange desde a região equatorial ate as baixas latitudes (Anomalia Equatorial Ionosféricas), dada a ampla cobertura das imagens do fotômetro imageador.

O sistema CCD (CH350 Photometrics) consiste em uma área de 6,45 cm<sup>2</sup> e um arranjo de 1024 x 1024 pixel de 14 bits de profundidade. A alta eficiência quântica (aproximadamente 80% na largura de banda da luz visível), baixa corrente escura (0,5 elétrons/ pixel/ segundos), baixo ruído e alta linearização (0,05%) do instrumento fornece uma excelente qualidade das imagens na emissão OI 777,4 nm com uma resolução de 512 x 512 pixel.

### Ionossonda digital

A Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI) opera numa banda em frequência de 1 a 20 MHz, com incidência vertical e uma banda em altitude entre 90 km e 1000 km aproximadamente. O pulso de saída, com potencia de 600 W, tem uma largura de 40 μs dando uma resolução básica em altitude de 6 km. Operando na sequência Barker os pulso de saída são de 13 x 40 μs sendo codificados em ± 90°. Esta disposição fornece uma potencia efetiva de saída de 13x 600 W = 7,8 kW.

O cartão DDS (Direct Digital Synthesis) produz a forma de onda de saída da frequência do oscilador local e a frequência RF como um número digital de 10 bits. Eles são convertidos em tensão por dois conversores D/A. O cartão DDS também produz uma frequência de referencia de 781 kHz (sinal "I" com fase 0° e sinal "Q" com fase 90°). O transmissor possui um amplificador de potencia do sinal RF e o receptor amplifica e demodula o sinal recebido mediante um amplificador de largura de banda RF, um misturador e um amplificador de banda estreita IF em 781 kHz. O sinal é logo separado e misturado com os sinais de referência "I" e "Q" em 781 KHZ. A saída do misturador é uma tensão DC e é amostrada e digitalizada por um conversor A/D. A amostra digitalizada é

correlacionada com a seqüência Barker, se a codificação Barker estiver sendo usada, e em seguida armazenada no computador. Os pulso recebidos podem ser coerentemente suavizados, para incrementar a razão S/N.

O processo FFT pode ser usado para retirar a parte linear da deriva de fase, quando a ionosfera é altamente irregular, mais a coerência de fase pode ser perdida neste procedimento.

### Analise de dados e resultados

Para a visualização e análise das imagens obtidas pelo fotômetro imageador all-sky do Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP foi utilizado um programa de computador próprio e específico denominado UASDA (Univap All Sky Data Analysis, Valdir e Fagundes, 2004a) que, entre outras funções, faz a linearização das imagens para posteriormente permitir um tratamento qualitativo das mesmas. Um outro programa de computador utilizado foi o UDIDA (Univap Digital Ionosonde Data Analysis, Valdir e Fagundes, 2004b) que facilita a análise dos dados obtidos pelas digissondas CADI do mesmo Grupo, e nos permite obter os valores da altura virtual da base da camada F ionosférica, h'F e da altura máxima virtual de reflexão, hpF2.

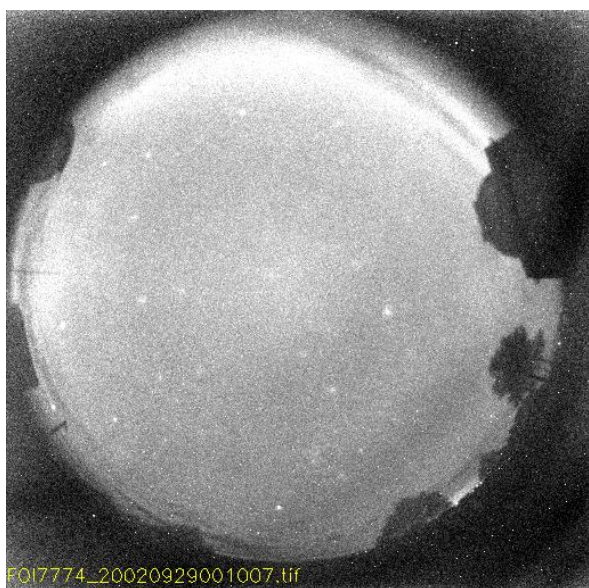


Figura 1 - Imagem crua na emissão OI 777,4 nm do céu na localidade de Brazópolis - MG (Observatório Pico dos Dias do LNA) obtida com o fotômetro imageador all-sky do Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP no dia 28 de setembro de 2002 às 00:10:07.

A Figura 1 apresenta um exemplo das imagens obtidas com o fotômetro imageador instalado no Observatório do Pico dos Dias do Laboratório Nacional de Astrofísica – LNA em Brazopolis – MG no dia 28 de setembro de 2002 às 00:10:07 horas na emissão OI 777,4 nm obtidas com o uso de filtros de interferência. A tonalidade de cinzas

observadas na figura esta diretamente relacionada com a intensidade das emissões ionosféricas nessa freqüência, onde as regiões de baixas intensidades são as partes mais escuras e as regiões de maiores intensidades são as partes mais claras na concentração da emissão do oxigênio atômico.

A Figura 2 é uma área central de aproximadamente 1000 km X 1000 km da imagem da Figura 1 já linearizada que nos permite trabalhar com áreas em sua verdadeira dimensão.

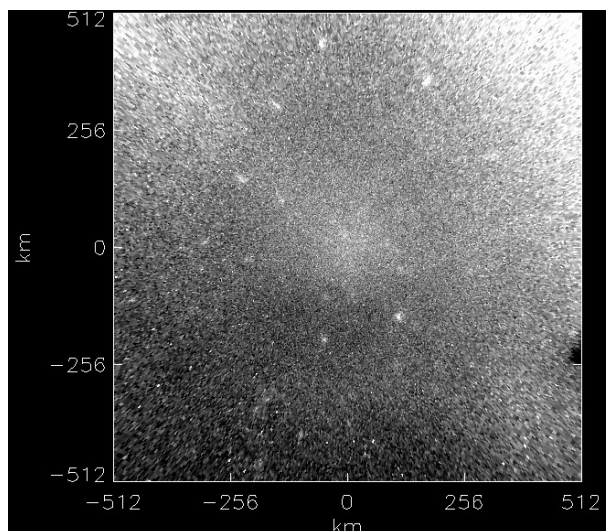


Figura 2 – Imagem, numa área de 1024 km X 1024 km, na emissão OI 777,4 nm obtida com o fotômetro imageador do Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP no dia 28 de setembro de 2002 às 00:10:07 e após ser linearizada usando o programa UASDA.

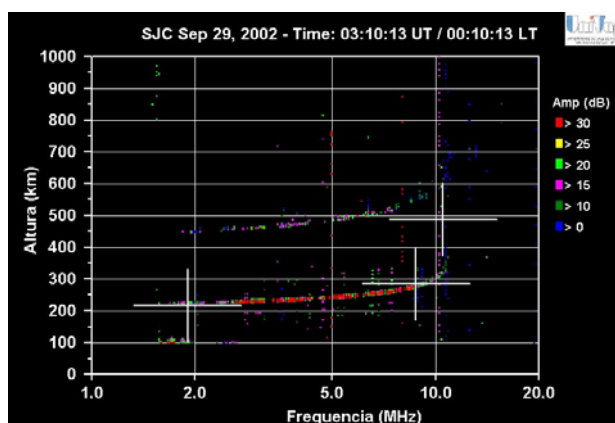


Figura 3 – Ionograma obtido na digissonda do Grupo de Física e Astronomia da UNIVAP no dia 28 de setembro de 2002 às 00:10:07 em São Jose dos Campos – SP.

A Figura 3 é o ionograma (altura virtual versus freqüência) obtido na digissonda do Grupo de Física e Astronomia instalada no Campus Urbanova em São Jose dos Campos – SP da UNIVAP para a mesma data: 29 de setembro de 2002 às 00:10:07 horas.

Com a utilização do programa de computador próprio denominado UDIDA (Univap Digisonda Data Análisis, Valdir e Fagundes, 2004b) valores nos permitem obter os valores da altura virtual da base da camada F ionosférica (h'F), a frequência crítica (foF2) e a altura do pico da camada (hpF2), os dois últimos valores necessárias para calibrar em termos absolutos a imagem da Figura 2 que mostra valores relativos da intensidade da emissão OI 777,4 nm.

A Figura 4 apresenta uma imagem espacial da densidade eletrônica da região F na área considerada onde se pode observar a posição geográfica de ambos observatórios. A tonalidade de cinzas na figura esta indicando a densidade eletrônica (número de elétrons por centímetro cúbico) em termos da frequência da região F; regiões de baixa densidades são as partes mais escuras e as regiões de maior densidades são as partes mais claras. Na Figura 5 apresentamos seis cortes horizontais com o perfil de densidade eletrônica expresso em frequência (MHz). As posições dos citados cortes estão indicadas por traços na cor verde na Figura 4.

A relação entre frequência e partículas por unidade de volume, nos valores da densidade eletrônica, podem ser obtidos da relação:

$$(2 \pi f)^2 = \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \quad [\text{rad} / \text{s}]$$

onde  $f$  é a frequência dada em Hz,  $n_e$  é o número de partículas por  $\text{m}^3$ ,  $e$  é a carga do elétron,  $m_e$  é a massa do elétron e  $\epsilon_0$  é a permissividade absoluta. Dessa expressão podemos tirar a relação:

$$n_e = 1,24 \times 10^4 f^2,$$

onde a frequência  $f$  é dada em MHz, a densidade  $n_e$  em número de partículas por  $\text{cm}^3$ .

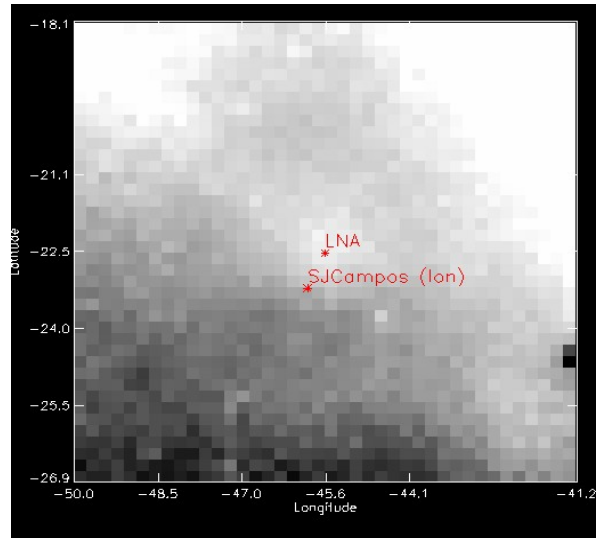


Figura 4 – Imagem da densidade eletrônica da região F ionosférica numa área de 1024 km X 1024 km, com centro no Observatório Pico dos Dias do LNA em Brazópolis - MG. Se indica também a posição geográfica da digisonda instalada no Campus Urbanova da Univap em São José dos Campos - SP.

#### Análise do Pico da camada F

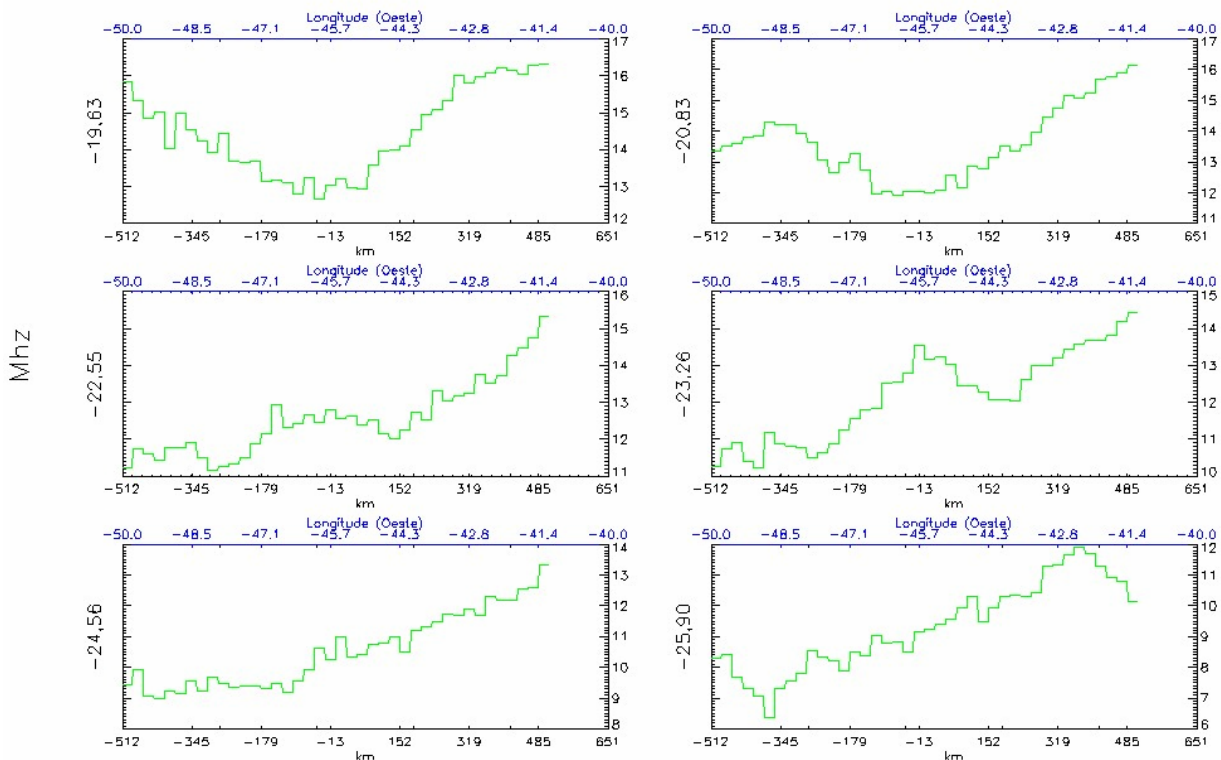


Figura 5 – Perfis de densidade eletrônica, expressos em frequência, dos seis cortes indicados por traços da cor verde na Figura 4.

## Discussão e conclusões

Os primeiros cálculos apresentados foram feitos para cinco noites calmas onde a densidade eletrônica se apresenta com variações suaves como o previsto. Os resultados obtidos são coerentes com os valores disponíveis na literatura específica. Para validar o novo sistema de cálculo implementado no programa UASDA é necessário estender o estudo para um número maior de noites e melhorar a apresentação visual dos resultados em vista do objetivo final que é estender estes trabalhos para o tratamento de noites com dados que apresentem uma distribuição espaço - temporal mais irregular como é o caso de noites com irregularidades ionosféricas denominadas bolhas de plasma.

## Referências

- [1] Abalde, J.R., Fagundes, P.R., Bittencourt, J.A. e Sahai, Y., *Observations of equatorial F region plasma bubbles using simultaneous OI 777.4 nm and OI 630.0 nm imaging: New results*, Journal of Geophysical Research, 106(A12): 30331-30336, 2001.
- [2] Bittencourt, J.A. *Fundamentals of Plasma Physics*. Co-Edition FAPESP, 1995.
- [3] Bittencourt, J.A., Teixeira, N.R., Sahai, Y. e Takahashi, H., Mapping of ionospheric F region parameters from atomic oxygen airglow emissions, J. Atmos. and Terr. Phys., 45(10): 697-705, 1983.
- [4] Pillat, V.G. e Fagundes, P.R., Calibração da lente do fotômetro imageador utilizando o programa UASDA – *Univap All Sky Data Analysis*, INIC, 2004a.
- [5] Pillat, V.G. e Fagundes, P.R., *UDIDA – Univap Digital Ionosonde Data Analysis*, INIC, 2004b.
- [6] Sahai, Y., Bittencourt, J.A., Teixeira, N.R., e Takahashi, H., Simultaneous observations of OI 774-A and OI 6300-A emissions and correlative study with ionospheric parameters, J. Geophys. Res., 86(A5): 3657-3660, 1981.
- [7] Tascione, T.F., Introduction to the space Environment, Orbit Book Company, 1988.
- [8] Tinsley, B.A. e Bittencourt, J.A., Determination of F region height and peak electron density at night using airglow emissions from atomic oxygen, J. Geophys. Res., 80: 2333-2337, 1975.