



Modelo numérico da baixa ionosfera

Christiano Garnett Marques Brum; Pedrina Moraes Terra dos Santos, Mangalathayil Ali Abdu; Jonas Rodrigues de Souza; Inez Stasciarine Batista; José Henrique Fernandez e Fábio Augusto Vargas

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This work presents lower ionosphere simulations performed by the *BLIC* model (Brum Lower Ionosphere Chemistry model) compared with the Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model-Enhanced (*SUPIM-E*) simulations of the South Atlantic Magnetic Anomaly region (SAMA) and Sodankylä Ion Chemistry model (*SIC*) simulations and rocket data over the Andoya (Norway) region. These results show a good consistence in the simulations for the different regions and conditions. The simulations performed for the SAMA region showed excellent agreement, mainly with the ionospheric E region height peak. Therefore, below this peak, it was found a little difference between the electronic density profile simulations during solar minimum activity condition, produced by the different sources of ionization radiation sources used by the *SUPIM-E* and *BLIC* models. Also, good agreement was found among *SIC*, *BLIC* simulations and rocket data over the Andoya region, mainly under 90km high. Over this altitude it was verified a small difference in the profiles computed by *BLIC* and the profiles computed by *SIC* and obtained by rocket experiment due to the chose precipitated electron spectrum.

Resumo

Este trabalho apresenta simulações da baixa ionosfera executadas pelo modelo aqui denominado *BLIC* (Brum Lower Ionosphere Chemistry model) comparados com resultados do modelo Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model -Enhanced (*SUPIM-E*) para região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (Cachoeira Paulista) e resultados do modelo Sodankylä Ion Chemistry (*SIC*) e registro de foguete para a região de Andoya (Noruega). Os resultados apresentam boa consistência nas distintas regiões e nas condições simuladas. As simulações da região de Cachoeira Paulista demonstraram excelente concordância, principalmente em relação ao pico da região E ionosférica. Entretanto abaixo deste pico, foi encontrada uma pequena discordância entre as simulações durante a baixa atividade solar, resultante das diferentes fontes radiação ionizantes noturnas utilizadas pelos dois modelos (*BLIC* e *SUPIM-E*). Boa concordância também foi encontrada entre as simulações do modelo *BLIC*, *SIC* e o registro de foguete para a mesma localização geográfica, principalmente para as

altitudes abaixo de 90km. Acima desta altitude constatou-se uma pequena diferença no perfil de densidade eletrônica calculado por *BLIC* e o perfil calculado por *SIC* devido a diferença do espectro de elétrons precipitantes utilizados nos dois modelos.

1 – Introdução

Este trabalho apresenta a descrição e alguns resultados do modelo numérico desenvolvido para simulações da baixa ionosfera (*BLIC*), o qual simula as interações físicas e químicas da baixa ionosfera (de 50 a 120km de altitude) supondo que o sistema esteja em um estado estacionário e eletricamente neutro. A simulação física dos fenômenos abordados pelo modelo é relativamente simples se comparado ao seu balanceamento químico. Os processos de precipitação de elétrons e de raios cósmicos galácticos na baixa ionosfera e os processos de fotoionização estão incluídos neste modelo.

2 - Descrição do modelo

A concentração dos constituintes da atmosfera neutra (O , O_2 , N , N_2 , H e H_e) e a temperatura necessárias às simulações (em função da altitude, hora e localização geográfica), são obtidas do modelo MSIS-90 (Hedin, 1991). As concentrações moleculares do CO_2 e H_2O são calculadas a partir das taxas de mistura de 3.10^4 e 1.10^6 , respectivamente, em relação à concentração molecular total da atmosfera neutra (Turunen, Matveinen e Ranta, 1996). A concentração do NO também é obtida através de uma taxa de mistura (em função da altitude e hora local) fornecido por Barth et. al. (1996). Para os demais constituintes da atmosfera neutra (NO_2 , $O_2(^1\Delta_g)$, O_3 , OH e HO_2) são utilizados valores fixos de concentrações moleculares (Turunen, Matveinen e Ranta, 1996).

A química desta região ionosférica é extremamente complexa devido ao grande número de íons positivos e negativos neste meio imersos. A resolução do balanceamento químico deste modelo utiliza 25 íons positivos e 10 íons negativos, cujos processos de produção e perda são descritos por 175 reações químicas (Figura 1).

A seguir são apresentadas as formulações matemáticas, físicas e químicas empregadas no modelo da baixa ionosfera desenvolvido para este trabalho.

2.1 – Equação de continuidade

Devido à elevada densidade da região ionosférica estudada, o transporte pode ser desprezado e as concentrações individuais dos íons podem ser obtidas diretamente pela equação da continuidade sem o termo de transporte, ou seja:

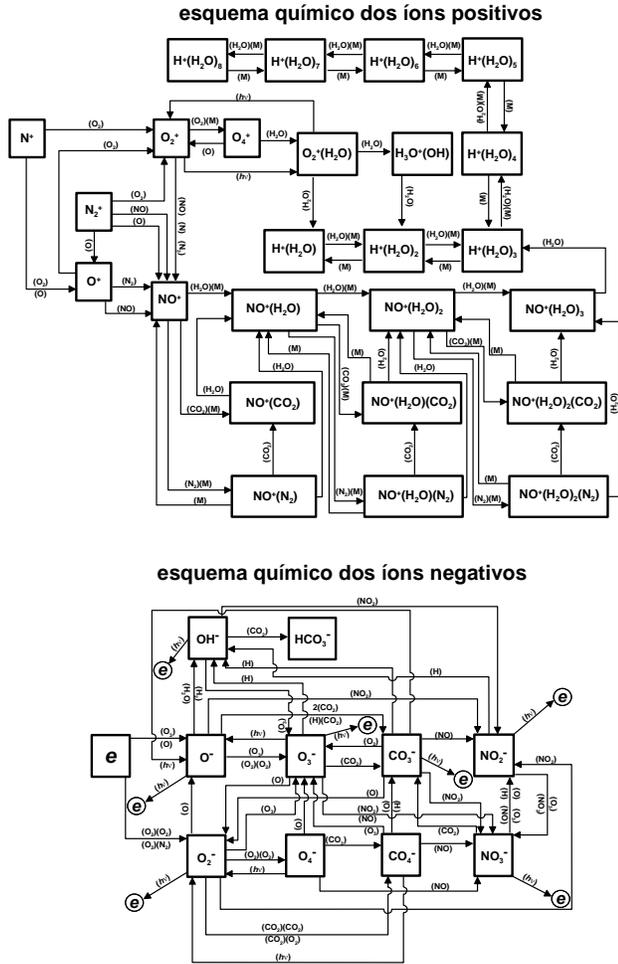


Figura 1 – Representação esquemática das reações químicas da baixa ionosfera envolvendo as séries dos íons positivos e íons negativos.

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = P_i - L_i \quad (1)$$

onde n_i , P_i e L_i são a concentração, taxa de perda e taxa de produção do íon i , respectivamente. A densidade eletrônica, supondo a condição de neutralidade de cargas, é obtida através da relação:

$$Ne = \sum_{positivos} n_i - \sum_{negativos} n_i \quad (2)$$

O cálculo de equilíbrio elétron-íon em função do tempo é dado pela relação que descreve a densidade eletrônica em função da densidade eletrônica no estado estacionário (Ne_{est}), o valor inicial da densidade eletrônica no instante $t-\Delta t$ (Ne_0) e as taxas de recombinação dissociativa (α_D) e de neutralização mútua (α_i), como:

$$Ne = Ne_{est} \frac{1 + [(r_0 - 1)/(r_0 + 1)]e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 - [(r_0 - 1)/(r_0 + 1)]e^{-\frac{t}{\tau}}} \quad (3)$$

onde $r_0 = Ne_0/Ne_{est}$ e τ é a constante de tempo (Banks e Kockarts, 1973b). A constante de tempo é calculada em

função da taxa de neutralização mútua, da taxa de recombinação dissociativa e da proporção dada pela razão entre os íons negativos e a densidade eletrônica ($\lambda = n^-/Ne$), este último condicionado a hora local. Utilizou-se um valor constante para α_i , ($6.10^{-8} \cdot cm^{-3} \cdot s^{-1}$), enquanto α_D é obtido pela relação:

$$\alpha_D = 5.10^{-21} n(O_2) + 3.10^{-20} n(O) + \frac{2.10^{-19} n(O_2)}{2.10^{-11} n(O_2) + 10^{-8} Ne_0} + 10^{-12} \quad (4)$$

2.2 – Taxas de produção

A taxa de perda iônica é basicamente atribuída aos processos químicos inerentes ao processo de formação da ionosfera desta região. No entanto as taxas de produção iônica adotadas neste modelo (excluindo os gerados pelas interações químicas) podem ser atribuídas a três “agentes” diferentes, representadas por:

$$P_i = Q_{fi} + Q_{rcg} + q_z \quad (5)$$

onde Q_{fi} é a taxa de produção por fotoionização para o componente neutro i , Q_{rcg} é a taxa de ionização para o componente neutro i atribuído aos raios cósmicos galácticos e q_z taxa de ionização para o componente neutro i atribuído a precipitação eletrônica.

2.2.1 – Taxa de fotoionização

A fotoionização é a produção de pares de íons pela radiação incidente na atmosfera terrestre e pela radiação oriunda do produto secundário de processos físicos e químicos ionosféricos, como a radiação liberada nas interações físicas da precipitação de partículas energéticas de origem solar e/ou galáctica, por exemplo. A taxa de fotoionização do componente i para uma radiação de uma determinada faixa de comprimento de onda pode ser obtida a partir da relação:

$$Q_{fi} = \sigma_{fi}^i(\Delta\lambda) n_i \phi_{\alpha}(\Delta\lambda) e^{-\tau_{i,z}} \quad (6)$$

onde $\sigma_{fi}^i(\Delta\lambda)$ é a seção transversal de fotoionização do constituinte i para uma determinada faixa de comprimento de onda $\Delta\lambda$; n_i é a concentração do constituinte i ; $\phi_{\alpha}(\Delta\lambda)$ fluxo de radiação incidente fora da atmosfera; e $\tau_{i,z}$ a profundidade óptica dependente da altitude z e do constituinte i .

Geralmente $\sigma_{fi}^i(\Delta\lambda)$ e $\phi_{\alpha}(\Delta\lambda)$ podem ser obtidos da literatura na forma de tabelas ou funções obtidas através de observações experimentais. No entanto, a profundidade óptica da radiação de um dado comprimento de onda é obtido pela relação:

$$\tau_{i,z} = \sum n_{i,z} H_{i,z} \sigma_{\alpha_i}(\Delta\lambda) \sec \chi_z \quad (7)$$

onde $n_{i,z}$ é a concentração do gás ionizável i dependente da altitude z , $H_{i,z}$ é a altura de escala local dependente do constituinte e da altitude, $\sigma_{\alpha_i}(\Delta\lambda)$ é a seção transversal de absorção de radiação de uma determinada faixa de comprimento de onda $\Delta\lambda$ (ou comprimento de onda específico) e χ_z é o ângulo zenital na altitude z .

A altura de escala do constituinte i em função da altitude ($H_{i,z}$) é obtida por (Davies, 1966):

$$H_{i,z} = \left(\frac{An.k_B}{g_0} \right) \left(1 + \frac{z}{R_T} \right) \frac{T_z}{M_i} \quad (8)$$

onde An é o número de Avogrado; k_B é a constante de Boltzmann; g_0 a aceleração da gravidade padrão (9,807 m.s⁻²); T_z a temperatura em função da altitude e M a massa molecular do constituinte i .

O algoritmo do fluxo do espectro na faixa do EUV utilizado neste modelo ionosférico foi obtido pelo modelo EUVAC desenvolvido por Richards, Fennelly e Torr (1994), o qual é baseado em medidas do espectro de referência solar EUV F74113. O cálculo da irradiância é obtido a partir da relação obtida entre o valor do índice F10,7cm do dia ($F10,7_d$) e a média de 80 dias adjacentes do mesmo, mais o índice do dia a ser calculado (total de 81 dias – ($F10,7m_{81}$)). Esta relação é obtida por:

$$P = (F10,7m_{81} + F10,7_d) / 2 \quad (9)$$

Assim, através de P , o cálculo da irradiância de diferentes comprimentos de ondas compreendidos no espectro do EUV é obtido através da Equação 10, onde as constantes $F74113_{(\Delta\lambda)}$ e $A_{(\Delta\lambda)}$ são tabeladas (Richards, Fennelly e Torr, 1994).

$$F_{(\Delta\lambda)} = F74113_{(\Delta\lambda)} [1 + A_{(\Delta\lambda)} \cdot (P - 80)] \quad (10)$$

Na Figura 2 são apresentadas as variações do fluxo de radiação no espectro de EUV em diferentes condições de atividade solar (representadas pelo índice P).

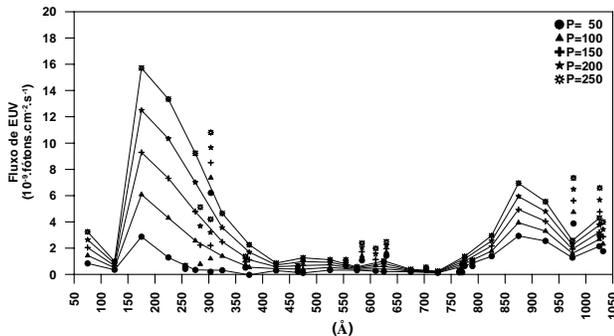


Figura 2 – Variações do fluxo de radiação no espectro do EUV para diferentes condições de atividade solar, representada por P (Equação 8).

As simulações durante o período noturno utilizam como fonte de radiação a radiação geocoronal e interplanetária. A parte superior da atmosfera neutra terrestre é composta de hidrogênio e hélio e é denominada de geocorona. A geocorona dispersa as linhas de emissão do ultravioleta do lado iluminado da Terra (principalmente o $Ly-\alpha$, $Ly-\beta$, H_e584Å e H_e304Å) as quais são transportadas para o lado noturno através de múltiplos espalhamentos. Embora o fluxo de radiação destas linhas do ultravioleta transportado para o lado noturno seja muito menor do que a intensidade do mesmo do lado diurno, são ainda importantes fontes de ionização das regiões D e E da ionosfera. Nesterov (1974) relaciona a

intensidade dos fluxos de $Ly-\alpha$ e $Ly-\beta$ noturno como sendo 1 e 0,4 por cento dos valores obtidos durante o meio dia local, respectivamente. Entretanto, neste trabalho são usados valores fixos dos fluxos de radiação de 3.10⁸, 8.10⁵, 1.10⁵ e 7.10⁵ fótons.cm⁻².sr⁻¹.s⁻¹ para $Ly-\alpha$, $Ly-\beta$, H_e584Å e H_e304Å noturna, respectivamente (Tohmatsu, 1990).

2.2.2 – Taxa de ionização por precipitação de elétrons

O modelo *BLIC* utiliza o cálculo da taxa de produção de pares de íons devido à precipitação de elétrons proposta por Rees (1963). Este cálculo foi desenvolvido considerando uma distribuição isotrópica para o feixe de elétrons incidentes. A distribuição da dissipação de energia por elétrons monoenergéticos, com uma distribuição isotrópica na faixa de 0° a 80°, é apresentada na Figura 3, onde a relação z/R é definida como profundidade de penetração atmosférica normalizada e $F(z/R)$ é a função de dissipação relativa do mesmo parâmetro.

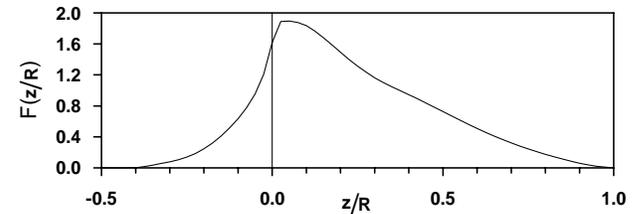


Figura 3 – Função de distribuição de dissipação de energia normalizada. Feixe de elétrons incidentes com distribuição isotrópica de 0° a 80°.

A taxa de ionização por unidade de volume (q_z) por fluxo unitário de elétrons incidentes (Φ_e) é dada por (Rees, 1963):

$$\frac{q_z}{\Phi_e} = \frac{\varepsilon_0 / r_0}{\Delta E_{ion}} F(z/R) \frac{n(M)_z}{n(M)_R} \quad (11)$$

onde ε_0 é a energia inicial do elétron, ΔE_{ion} a perda média por par de íons formado, $n(M)_z$ e $n(M)_R$ são a densidade numérica de átomos ionizáveis nas profundidades atmosféricas z e R , respectivamente. r_0 é denominado de *range* (em atm-cm) no topo da atmosfera e $F(z/R)$ é a função de distribuição normalizada da dissipação de energia.

A profundidade atmosférica é obtida dividindo-se a pressão local pela aceleração da gravidade, tendo como unidade g.cm⁻² enquanto que R , no intervalo de energia de 1 a 300 keV, está associado à energia inicial ε_0 por

$$R = 4,57 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_0^{1,175} \quad (12)$$

devido a energia inicial do elétron ser expressa em keV e R em g.cm⁻².

O total da taxa de produção de ionização por precipitação de elétrons é transportado para os principais constituintes ionizáveis de acordo com a magnitude de suas seções transversais de ionização e concentração dos mesmos. Deste modo, a partir do cálculo de pares de íons-elétrons (q_z) produzidos por precipitação de elétrons proposta por

Ress (1963), a taxa de produção para os íons mais ionizáveis N_2 , O_2 e o átomo de O é dado por (Rees, 1989):

$$p_e(N_2^+) = 0,76q(N_2) \quad (13)$$

$$p_e(O_2^+) = 0,66q(O_2) \quad (14)$$

$$p_e(O^+) = 0,33q(O_2) + q(O) \quad (15)$$

onde

$$q(N_2) = q_z \frac{0,92n(N_2)}{0,92n(N_2) + n(O_2) + 0,56n(O)} \quad (16)$$

$$q(O_2) = q_z \frac{n(O_2)}{0,92n(N_2) + n(O_2) + 0,56n(O)} \quad (17)$$

$$q(O) = q_z \frac{0,56n(O)}{0,92n(N_2) + n(O_2) + 0,56n(O)} \quad (18)$$

2.2.3 – Taxa de ionização por raios cósmicos galácticos

A inclusão da taxa de produção de pares de íons por raios cósmicos galácticos é baseada em um modelo empírico convenientemente parametrizado da taxa da produção de pares de íons por raios cósmicos galácticos (Heaps, 1978). Este modelo tem como parâmetros de entrada a latitude (ϕ), a altitude e o nível da atividade solar, e como condição de contorno a densidade do meio (M). Assim sendo, a produção de pares de íons originada pela precipitação de raios cósmicos galácticos (Q_{CR} - $s^{-1}.cm^{-3}$) para uma localidade acima da latitude 53° e para uma dada densidade numérica atmosférica maior que 3.10^{17} (cm^{-3}), é dada por:

$$Q_{CR} = (X_1 + X_2 \sin^4 \phi) \beta \cdot 10^{17(1-X_3)} M^{X_3} \quad (19)$$

para X_1 igual a $1,74.10^{-18}$ e X_2 igual a $1,93.10^{-17}$ e $2,84.10^{-17}$ para a atividade solar máxima e mínima, respectivamente. A constante X_3 é obtida pela relação:

$$X_3 = 0,6 + 0,8|\cos(\phi)| \quad (20)$$

Para as mesmas condições latitudinais, porém para M menor que $3.10^{17} cm^{-3}$, a taxa de produção de pares de íons pela precipitação de raios cósmico galácticos passa a ser:

$$Q_{CR} = (X_1 + X_2 \sin^4 \phi) M \quad (21)$$

Estas taxas de ionização são inicialmente efetivas na produção de pares de íons para os componentes neutros majoritários da baixa ionosfera (N_2 e O_2).

Além dos processos até aqui descritos, este modelo calcula ainda a absorção ionosférica do ruído cósmico à 30MHz e as frequências de colisão entre íons-elétrons, este último utilizado no cálculo da absorção ionosférica.

3 - Solução numérica do modelo da baixa ionosfera

O formato deste modelo é uma seqüência de expressões algébricas as quais fornecem, após um certo número de iterações, o perfil da concentração eletrônica da baixa ionosfera, todos os seus íons (positivos e negativos),

taxas de produção por fotoionização, taxas de produção por precipitação de elétrons e as taxas de produção por raios cósmicos galácticos.

Este modelo inicia-se com o cálculo das concentrações dos constituintes da atmosfera neutra que são fornecidos pelo modelo MSIS90 e os demais constituintes neutros de valores fixos. Dos resultados fornecidos pelo MSIS90, são calculadas as produções de pares de íons por fotoionização dos principais íons ionizáveis (O_2^+ , O^+ , NO^+ , N^+ e N_2^+). Simultaneamente são calculados os pares de íons formados pela precipitação de elétrons e pelos raios cósmicos galácticos. Estes íons são transportados para o balanceamento químico no termo de produção da equação de continuidade associado ao seu respectivo íon.

Para o balanceamento químico foi utilizado um esquema iterativo para resolver todas as concentrações das espécies iônicas simuladas (Swider, 1996). Utilizando uma concentração eletrônica inicial (Ne_i) (obtida através do cálculo dos pares de íons por fotoionização, precipitação de partículas e raios cósmicos galácticos) calcula-se as concentrações dos íons negativos e a soma dos mesmos ($NSUM$). Em seguida são calculadas todas as concentrações dos íons positivos e a sua somatória ($PSUM$). Então uma nova concentração eletrônica é obtida por:

$$Ne = \frac{1}{2} \frac{Ne_i \left(1 + \frac{NSUM}{Ne_i} \right) + PSUM}{\left(1 + \frac{NSUM}{Ne_i} \right)} \quad (22)$$

Esta seqüência é repetida até que a diferença da concentração Ne_i e Ne seja menor que 2%. Geralmente são necessárias em torno de 11 interações para alcançar este valor. Esta seqüência de interações é aplicada apenas ao primeiro perfil de Ne calculado. Os demais perfis são calculados através das taxas de recombinação em função do tempo (equações 3 e 4).

4 – Resultados e discussões

O modelo desenvolvido foi comparado com o modelo SUPIM-E Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model -Enhanced) desenvolvido por Terra, (2005) e com registro obtido por foguete na região Andoya (Noruega) e a respectiva simulação pelo modelo SIC (Sodankylä Ion Chemistry, Turunen et. Al, 1996). As data, horários, localizações geográficas, condições geomagnéticas (índice kp) e solares (fluxo solar F10,7cm) das simulações propostas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Cenários das simulações propostas.

	Cachoeira Paulista	Andoya (Noruega)
Localização Geográfica	22,5°S; 45,0°W	69,3°N; 16,1°E
Data de referência	16/11/96	23/11/01
Horário de referência	00:00LT	00:00LT
Fluxo Solar (F10,7 cm) (W.m ⁻² .Hz ⁻¹)	72.2	172.9
Índice kp	1*	3*

As simulações mostradas na Figura 4 apresentam os perfis gerados pelo *SUPIM-E* e pelo modelo *BLIC* para o mês de novembro durante períodos de baixa e alta atividade solar (anos de 1996 e 2001, respectivamente) para a região de Cachoeira Paulista. É possível observar a boa concordância entre os dois modelos, corroborado pela concordância do pico da região E em ambos os cenários simulados. Verifica-se também que durante a alta atividade solar os dois modelos descrevem de maneira bem próxima à baixa ionosfera, e que durante a baixa atividade solar o *SUPIM-E* apresenta uma densidade eletrônica muito maior abaixo do pico da região E por um fator de aproximadamente 3. Tal diferença pode estar associada ao fluxo de radiação noturno utilizado pelos dois modelos. O modelo *Supim-E* utiliza os valores de irradiância das faixas *Ly- α* , *Ly- β* , $H_e584\text{\AA}$ e $H_e304\text{\AA}$ fornecidos por Strobel et al. (1974) dependentes da altitude e do ângulo zenital solar enquanto que o modelo proposto utiliza valores fixos dos mesmos parâmetros, ou ainda aos processos de perda para a série de íons negativos inclusos no modelo *BLIC*, os quais não estão na formulação do modelo *Supim-E*.

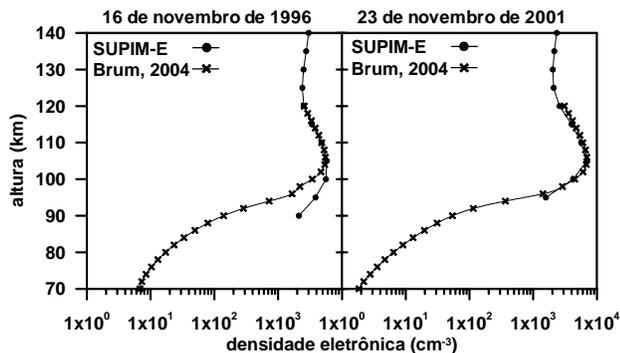


Figura 4 – Perfis teóricos de densidade eletrônica calculados às 0h local pelo modelo *BLIC* e pelo *SUPIM-E* para a estação de Cachoeira Paulista

A Figura 5 apresenta um perfil de foguete obtido no dia 28 de novembro de 1980 na região de Andoya (Noruega), e as respectivas simulações do modelo *SIC* e *BLIC*. O modelo *BLIC* utilizou as condições aeronômicas do dia mais o perfil do espectro de precipitação de elétrons dado por Turunen et al (1996), também referente ao dia em questão. Os resultados mostram-se consistentes na parte inferior da baixa ionosfera, onde a proximidade dos resultados teóricos apresentam-se bem próximos ao perfil registrado pelo foguete. Entretanto, acima de aproximadamente 90km de altura, o resultado do modelo *BLIC* distancia-se do obtido pelo modelo *SIC* e mais ainda do perfil experimental. Tal fato pode ser explicado pelo perfil do fluxo de elétrons precipitantes utilizado pelo modelo *BLIC*, o qual é uma aproximação exponencial do obtido por Turunen et al (1996).

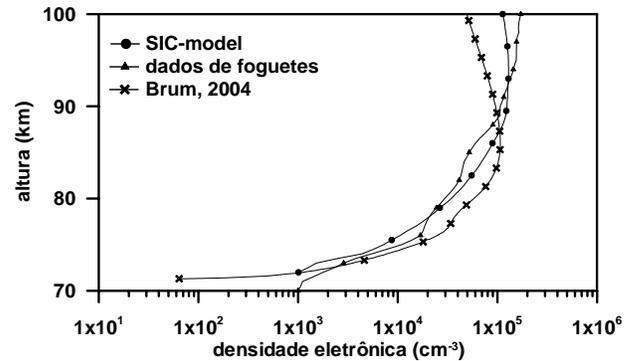


Figura 5 – Perfil de densidade eletrônica obtido no dia 28 de novembro de 1980 por foguete na região de Andoya (Noruega) e seus respectivos perfis teóricos simulados pelos modelos *SIC* e *BLIC*.

Conclusões:

Este trabalho apresenta perfis simulados pelo do modelo *BLIC* confrontados com perfis de densidade eletrônica obtidos experimentalmente e por simulações teóricas de outros modelos existentes (*SUPIM-E* e *BLIC*).

Os resultado alcançados mostraram-se consistentes com aqueles fornecidos pelo modelo *SUPIM-E*, apesar de estarem utilizando fluxos de radiação noturna diferentes. As diferenças entre os resultados obtidos mostraram uma discordância apenas em altitudes abaixo do pico da região E, somente para o período de atividade solar mínima.

Também constatou-se boa consistência na comparação das simulações do modelo *BLIC* com os dados experimentais e teóricos de Andoya. Ao contrário do ocorrido nas comparações com o modelo *SUPIM-E*, os resultados do modelo *BLIC* apresentaram uma diferença maior no comuto da densidade eletrônica em altitudes acima de aproximadamente 90km, estando esta diferença associada a escolha do espectro de energia do elétrons precipitantes na baixa ionosfera.

Agradecimentos:

Os autores deste trabalho agradecem a Fundação de Ampara a Pesquisa do Estado de São Paulo (projetos n^o:04/07695-5 e n^o:04/09432-1) e ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico (CNPq).

Bibliografia:

- Banks, P.M.; Kockarts, G.** Aeronomy. Part A. New York: Academic Press, 1973a.
- Banks, P.M.; Kockarts, G.** Aeronomy. Part B. New York: Academic Press, 1973b.
- Barth, C.A.; Farmer, C.B.; Siskind, E.D.; Perich, J.P.** ATMOS observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere. Journal of Geophysical Research, v.101, n.D7, p.12489-12494, 1996.
- Davies, K.** Ionospheric radio propagation. New York: Dover Publications, 1966. 470 p.
- Heaps, M.G.** Parametrization of cosmic-ray ion-pair production-rate above 18 km. Planetary and Space Science, v.26, n.6, p. 513-517, 1978.

- Hedin, A. E.** Extension of the MSIS Thermospheric Model into the middle and lower atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, v. 96, n.A2, p.1159-1173, 1991.
- Nesterov, V.P.** On the nighttime E-region ionization. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 36, n.11, p.1753-1758, 1974.
- Ress, M.H.** *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- Rees, M.H.** Auroral ionization and excitation by incident energetic electrons. *Planetary and Space Science*, v.11, n.10, p.1209-1218, 1963.
- Richards, P.G.; Fennelly, J.A.; Torr, D.G.** EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. *Journal of Geophysical Research*, v.99, n.A5, p.8981-8992, 1994.
- Swider, W.** Steady-state D-region model. In: Schunk, R.W. *Solar-terrestrial energy program: handbook of ionospheric models*. Logan: Utah State University Press, 1996. p.27-32.
- Tohmatsu, T.** *Compendium of aeronomy*. Tokio: Terra Scientif Publishers Company, 1990.
- Turunen, E.; Matveinen, J.; Ranta, H.** D-region ion chemistry model. In: Schunk, R.W. *Solar-terrestrial energy program: handbook of ionospheric models*. Logan: Utah State University Press, 1996. p.1-25.