

## Campos Elétricos na Região Ionizada da Atmosfera

V. W. J. H. KIRCHHOFF

*Instituto de Pesquisas Espaciais / CNPq, São José dos Campos, SP*

Recebido em 26 de Outubro de 1977

The properties and origins of the ionospheric electric fields are reviewed. The early theoretical calculations of electric fields, based on the geomagnetic variations are discussed, as well as the most recent measurements made by various techniques. Some of the most striking effects, caused by ionospheric electric fields, are pointed out.

As propriedades e origens dos campos elétricos ionosféricos são revisadas. Discutem-se os primeiros cálculos teóricos, baseados nas variações geomagnéticas, assim como resultados recentes de medidas de campos elétricos, feitas por diferentes métodos. Alguns dos efeitos mais marcantes, causados por campos elétricos ionosféricos, são demonstrados.

### 1. CONCEITO E PROPRIEDADES

A região ionizada da atmosfera superior, a ionosfera, é constituída basicamente de três camadas, cada uma das quais é governada por processos físicos e químicos diferentes. Os limites e a extensão vertical das camadas varia em função de vários parâmetros geofísicos, e os números dados a seguir são apenas aproximados. Define-se a região D, ou camada inferior, entre 70 e 90 km de altura; região E, ou camada intermediária, entre 90 e 150 km; e a região F, acima de 150 km.

Devido às características intrínsecas da ionosfera, um campo elétrico pode se manifestar de diferentes maneiras. Na região F, por exemplo, o campo elétrico  $\vec{E}$  está diretamente ligado ao conceito de velocidade de deriva  $\vec{V}$ , através de

$$\vec{V} = \vec{E} \times \vec{B} / B^2$$

onde  $\vec{B}$  é o vetor indução magnética e  $B$  seu módulo. Já na região  $E$ , o campo elétrico é função de condutividade e corrente, relacionados através da equação  $\text{O}m$  generalizada. De qualquer modo, um campo elétrico essencialmente representa uma força por unidade de carga elétrica. Esta força, aplicada na ionosfera, pode, portanto, alterar o estado de repouso ou de movimento das cargas livres, dando origem a correntes elétricas na região  $E$ , ou simplesmente velocidades de deriva iguais para as cargas positivas e negativas, na região  $F$ .

Medidas diversas revelam a existência de campos elétricos de variação rápida e de variação lenta com o tempo, assim como campos elétricos com variações espaciais de comprimentos característicos, horizontais, desde alguns metros até vários quilômetros. Nesta revisão serão tratados os campos elétricos de variação temporal lenta e de grande escala.

Uma propriedade importante dos campos elétricos é a sua pouca variação com a altura, dentro da ionosfera propriamente dita. Pode-se dizer que o campo elétrico se "propaga" ao longo das linhas do campo magnético, sem atenuação de cima para baixo, ou de baixo para cima<sup>1,2</sup>. Esta característica pode-se ligar ao fato de ser a condutividade elétrica, ao longo do campo magnético, muitas vezes maior do que a condutividade na direção perpendicular ao campo magnético, na região superior da ionosfera. Pode-se, portanto, pensar nas linhas de campo magnético como sendo linhas equipotenciais, o que também implica no fato de que o campo elétrico é praticamente perpendicular ao campo magnético. Como as linhas de campo magnético, cuja forma é, aproximadamente, a de um dipolo, divergem à medida que se afastam da superfície terrestre, o campo elétrico também se modifica, numa transformação que se denominou de mapeamento do campo elétrico<sup>3</sup>.

O termo *deriva* é adicionado à palavra velocidade (isto é, velocidade de deriva ou "drift velocity"), para enfatizar o efeito do campo magnético sobre o movimento de partículas carregadas. Na ausência do campo magnético, a velocidade das partículas seria na direção do campo elétrico aplicado. Devido à presença permanente do campo geomagnético, no entanto, as velocidades se desenvolvem perpendicularmente ao campo elétrico, como é o caso da região  $F$ , por exemplo. Na região superior da ionosfera pode-se, portanto, fazer medidas da velocidade de deriva e daí determi-

nar o campo elétrico. Este é o processo efetivamente usado pela técnica do espalhamento incoerente, que mede a velocidade através do efeito Doppler.

Deve-se notar que a velocidade de deriva não é, necessariamente, devida apenas à ação de campos elétricos. Pode-se mostrar que, de modo geral,

$$\vec{V} = \frac{\vec{F} \times \vec{B}}{qB^2}$$

onde  $\vec{V}$  é a velocidade de deriva,  $\vec{F}$  a força atuante na partícula de carga  $q$ , e  $B$  o campo magnético. Os dois tipos mais comuns da força  $\vec{F}$  são: o devido ao campo elétrico (predominantes na região F da ionosfera); devido à curvatura do campo magnético, sua diminuição com altura, e gravidade (importantes na magnetosfera).

## 2. ORIGEM DOS CAMPOS ELÉTRICOS

Em geral os campos elétricos ionosféricos são associados à região E, onde são criados pela separação das cargas elétricas por ação dos ventos neutros. Além desses campos elétricos, originados na região E, foram propostos campos elétricos com origem na região F, e campos elétricos magnéticos, ligados ao processo de convecção magnética na magnetosfera, região esta que se estende além da ionosfera.

### 2.1. Campos elétricos da região E

As condutividades ionosféricas variam com a altura de tal modo que a 110 km, aproximadamente, existe uma camada condutora excelente, durante o dia. Esta camada centralizada na região E, é conhecida como a região do dínamo atmosférico. Seu comportamento é semelhante a um dínamo, ou gerador de corrente, quando forças externas, representadas pelos ventos neutros da região, a movimentam no campo geomagnético terrestre. A essas correntes elétricas estão associadas os campos elétricos do dínamo, ou campos elétricos da região E.

Os campos elétricos da região E podem ser estudados através das correntes elétricas que aí se desenvolvem, e que causam as variações magnéticas medidas pelos magnetômetros. A relação é expressa através de

$$\vec{J} = \vec{\sigma} (\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B})$$

onde  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente ( $A/m^2$ ),  $\vec{\sigma}$  é o tensor condutividade  $(\Omega m)^{-1}$ ,  $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico ( $V/m$ ) e  $\vec{U} \times \vec{B}$  é o campo induzido, sendo  $\vec{U}$  o vetor velocidade das partículas neutras ( $m/seg$ ), e  $\vec{B}$  o vetor indução magnética ( $Wb/m^2$ ).

As variações magnéticas mencionadas acima, podem ser usadas para deduzir as correntes do dínamo. As variações obtidas, durante períodos não perturbados magneticamente, contêm uma componente principal chamada  $S_4$ , além de outras representando perturbações em geral menores.

Basicamente, a dedução dos campos elétricos pode ser obtida de dois modos: o primeiro usa as variações do campo magnético  $S_4$  para calcular as correntes<sup>4</sup>, e, em seguida, determina  $\vec{E}$  e  $\vec{U} \times \vec{B}$  impondo as condições de divergência nula de corrente e irrotacionalidade do vetor  $E$ . Os campos elétricos, assim calculados, mas na forma de velocidades de deriva, estão mostrados na Figura 1. O segundo método assume um modelo para os ventos neutros,<sup>5,6</sup> para então determinar campos e correntes. Estes métodos de cálculo são muito trabalhosos e dependem de várias hipóteses simplificadoras.

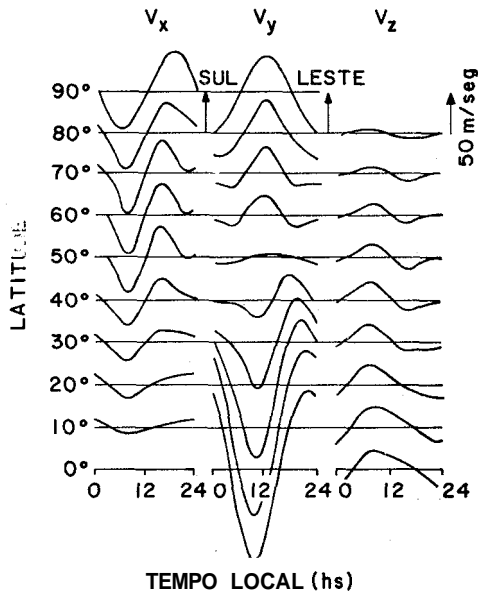


Fig 1 - Variação média da velocidade de deriva em função de tempo e latitude. Resultados teóricos<sup>7</sup>.

Provavelmente, isto explica o fato de nem sempre estarem de acordo com medidas de campos elétricos. Os resultados teóricos obtidos, contudo, foram os primeiros a indicar a variação temporal e latitudinal dos campos elétricos e, como ainda não existem modelos mais completos, têm sido frequentemente usados para comparação com medidas.

## 2.2. Campos elétricos da região F

Rishbeth<sup>7</sup> sugeriu que campos elétricos podem ser criados também na região F, especialmente à noite. As correntes elétricas  $\vec{J}$  da região F,  $\vec{J} = Nq\vec{v}$  (onde  $N$  é a densidade eletrônica e  $q$  a carga), fornadas pela ação dos ventos termosféricos (a velocidade  $\vec{V}$ ), são, em geral, muito pequenas e desprezíveis com relação às correntes da região E. No entanto, à noite, quando a ionização da região E diminui muito, sua contribuição pode ser apreciável. Nos casos em que estas correntes não podem fechar seu circuito, cargas de polarização criarão um campo elétrico do tipo de polarização que se oporá à passagem da corrente, mas que, ao mesmo tempo, dará origem a derivas do tipo Hall.

Num sistema de coordenadas em que  $x$  aponta para a leste magnético,  $y$  para o norte magnético e  $z$  para cima, a velocidade de deriva dos íons, induzida pelos ventos termosféricos  $U_x$  e  $U_y$ , será

$$V_x = -U_y \sin I \frac{v}{w}$$

$$V_y = U_x \frac{v}{w}$$

onde  $I$  é o ângulo de inclinação do campo magnético,  $v$  é a frequência de colisão entre íons e partículas neutras,  $w$  a giro-frequência e o índice, indica a componente perpendicular ao campo magnético. Além disso, foi imposta a condição de que a mobilidade Hall é muito maior que a Pedersen, e igual a  $1/Bq$ .

As correntes elétricas associadas a essas velocidades serão

$$J_x = Nq U_y \sin I \frac{v}{w}$$

$$J_y = Nq U_x \frac{v}{w}$$

onde  $N$  é a densidade iônica e  $q$  a carga do elétron, e  $v_i/\omega_i > v_e/\omega_e$ . Se estas correntes não conseguirem fechar seu circuito, os campos elétricos de polarização serão estabelecidos em sentido contrário ao das correntes na direção em que prevalece a condutividade Pedersen  $Nq\nu/\omega B$ , e serão iguais a

$$E_x = U_y B \sin I$$

$$E_y = U_x B$$

Estes campos elétricos, por sua vez, causarão derivas do tipo  $\vec{E} \times \vec{B}/B^2$ , dadas por

$$V_x = U_x$$

$$V_y = U_y \sin I$$

o que implica em velocidades de deriva, na região F, da ordem de grandeza dos ventos termosféricos, e na mesma direção destes.

### 2.3. Campos elétricos magnetosféricos

Nas regiões polares, além do sistema  $S_q$  de correntes, já mencionadas para médias e baixas latitudes, existe um outro sistema de correntes designado por  $S_q^p$ , onde  $p$  quer dizer polar. Uma representação esquemática é mostrada na Figura 2. A diferença fundamental é que essas correntes são criadas por campos elétricos que se originam na magnetosfera. Estes campos

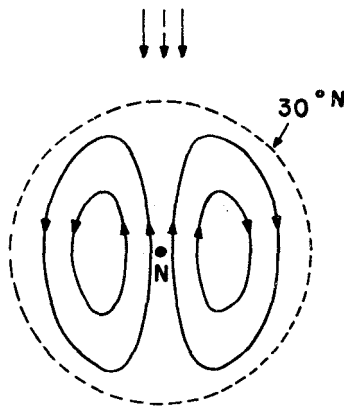


Fig.2 - Representação esquemática do fluxo polar de correntes elétricas, no hemisfério norte,  $S_q^p$ . A projeção central (N) representa o polo norte. As setas representam a direção do vento solar.

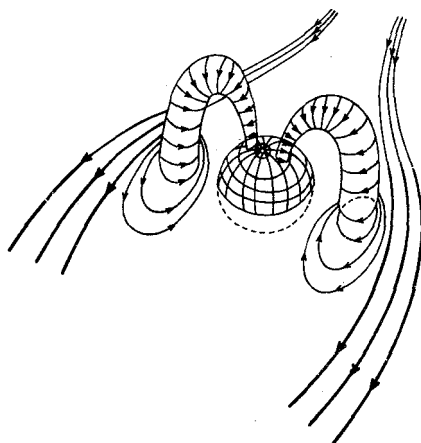


Fig.3 - Magnetosfera terrestre do hemisfério norte, mostrando as evoluções das linhas de campo geomagnético acompanhando a convecção magnetosférica (A e B). C e D, em termos de corrente elétrica, correspondem à Figura 3. Segundo Ratcliffe<sup>21</sup>.

elétricos, e suas respectivas velocidades de deriva, estão ligados ao processo denominado de convecção magnetosférica<sup>8,9</sup>. Quando o plasma se movimenta nas regiões mais extensas da magnetosfera, onde a frequência de colisão é desprezível, leva consigo as linhas de campo magnético. A Figura 3 mostra como os deslocamentos de plasma na magnetosfera são transferidos ao longo das linhas do campo magnético até a ionosfera da região polar.

As partículas carregadas seguem as linhas de campo magnético em movimento, enquanto a frequência de colisão for menor do que a giro-frequência. Em alturas mais baixas, esta condição deixa de ser válida - para íons, em torno de 140 km e, para elétrons, a 80 km. Neste intervalo de altura, portanto, os elétrons acompanham o movimento rotatório das linhas magnéticas, mas não os íons. As correntes resultantes, que fluem em direção oposta ao movimento dos elétrons, constituem o sistema polar de correntes  $\#_q$  da Figura 2.

Durante atividade magnética acima da normal, os campos elétricos em latitudes médias sofrem alterações apreciáveis, tanto em magnitude quanto em direção, causado pela então maior influência do campo elétrico magnetosférico (Figura 4). A interpretação é que na magnetosfera se desenvolve um campo elétrico dirigido de leste para oeste; na região do meridiano oposto à projeção solar, responsável pelo deslocamento da plasmapau-

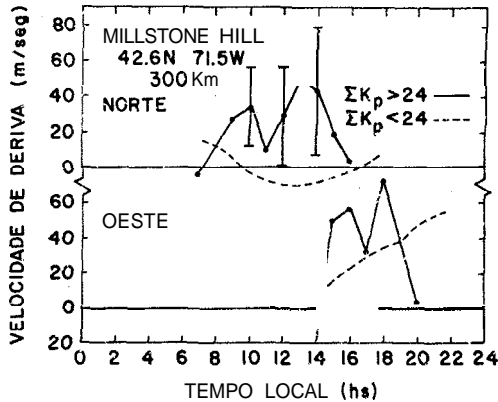


Fig.4 - Variações temporais da velocidade de deriva medidas durante atividade magnética e comparação com períodos não perturbados.

sa em direção à superfície da Terra. O mapeamento deste campo elétrico da magnetosfera para a ionosfera<sup>3</sup>, resulta em velocidades de deriva para o norte e para oeste, respectivamente às 12 e 18 horas de tempo local.

### 3. EFEITOS PROVOCADOS BELOS CAMPOS ELÉTRICOS

Os principais efeitos causados na ionosfera, pelos campos elétricos, são de ordem dinâmica, isto é, sua influência está diretamente ligada ao transporte de matéria ionizada. Em latitudes médias, sua contribuição no equilíbrio de forças é relativamente pequena durante períodos magnéticos calmos, podendo tornar-se o termo dominante em períodos magneticamente perturbados.

O conhecimento dos campos elétricos (velocidades de deriva) é importante para o cálculo dos ventos termosféricos, para os quais a força de colisão, entre íons e partículas neutras, representa a força principal de reação contra o gradiente horizontal de pressão, que é a força geradora dos ventos termosféricos. Esta força por unidade de massa, é expressa por  $\nu(U-V)$  onde  $\nu$  é a frequência de colisão entre partículas neutras e íons,  $U$  a velocidade do vento, e  $V$  a velocidade de deriva dos íons.

O campo elétrico tem provavelmente um papel importante na formação da camada E esporádica<sup>10</sup>. A teoria de formação desta camada<sup>11</sup>, calcula



a velocidade de deriva vertical dos íons provocada pela ação dos ventos da região E e indica que há ocasiões em que, a certa altura, a velocidade é convergente, provocando assim um acúmulo de íons numa camada relativamente estreita. A teoria, até recentemente, desprezava o efeito de campos elétricos. Pode-se mostrar, no entanto, que a inclusão da velocidade de deriva, gerada pelo campo elétrico, modifica consideravelmente a velocidade resultante<sup>12</sup>, podendo modificar a altura do acúmulo e, geralmente, favorecendo a formação da camada.

### 3.1. Formação dos eletrojetos

Próximo ao equador magnético, e nas regiões da aurora polar, fluem intensas correntes elétricas que recebem o nome de eletrojetos. Nas regiões mencionadas, a condutividade elétrica apresenta valores superiores ao do plasma ambiente. Por uma questão de geometria, no equador magnético, e por causa de precipitação de partículas, na região auroral, um campo elétrico aí aplicado, causará o aparecimento de um campo elétrico secundário ou de polarização.

Consideremos o exemplo da Figura 5. A região "1" é uma fatia de plasma de condutividades maiores do que as da região "2". Suponhamos agora que um certo campo elétrico,  $E_x$ , está aplicado na região "2". O mesmo estar também aplicado na região "1", porque a componente tangencial do campo se mantém inalterada ao passar de uma região para outra, de condutividade diferente. Este campo elétrico forçará uma corrente Pedersen, na direção x, e uma corrente Hall, na direção y. As correntes serão mais intensas em "1" do que em "2". Entretanto, a componente normal da corrente deveman-

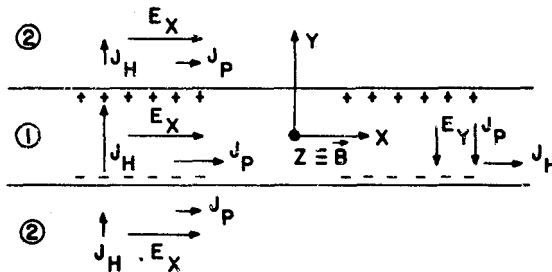


Fig. 5 - Representação esquemática para explicar a formação dos eletrojetos. A região 1 apresenta condutividade maior do que a região 2.

ter-se inalterada ao passar de um meio para outro. Isto só pode acontecer se, em "1", for criado um campo elétrico secundário, também chamado de polarização,  $-E_{Y1}$ , que dará origem a uma corrente Pedersen, na direção  $-y$ , e uma corrente Hall, na direção  $x$ . A corrente Pedersen anulará o excesso da corrente Hall do campo elétrico aplicado,  $E_x$ , na região "1", ao passo que a corrente Hall secundária somar-se-á à corrente Pedersen de  $E_x$ . O resultado final é que uma corrente mais intensa fluirá na direção  $x$ , dentro da fatia de plasma, ao passo que, na direção  $y$ , só teremos a componente Hall, devida a  $E_y$  com a condutividade Hall da região "2".

As equações das correntes para as duas regiões, sendo  $\Sigma_P$  e  $\Sigma_H$  as condutividades Pedersen e Hall respectivamente, são

$$J_x^{(1)} = \Sigma_P^{(1)} E_x - \Sigma_H^{(1)} E_y$$

$$J_y^{(1)} = \Sigma_H^{(1)} E_x + \Sigma_P^{(1)} E_y$$

$$J_y^{(2)} = \Sigma_H^{(2)} E_x$$

e igualando  $J_y$  nas duas regiões, a corrente será

$$J_x^{(1)} = \left[ \Sigma_P^{(1)} + \frac{\Sigma_H^{(1)} (\Sigma_H^{(1)} - \Sigma_H^{(2)})}{\Sigma_P^{(1)}} \right] E_x$$

### 3.2. Modificações em $h_m F2$

Há ocasiões em que os campos elétricos ionosféricos crescem consideravelmente em relação ao seu valor médio, o que geralmente está associado a perturbações magnéticas. Nestes casos, o campo elétrico pode ser responsável por uma variação acentuada na altura da camada ionizada, causada pela componente vertical da velocidade de deriva.

Um exemplo típico deste efeito está representado na Figura 6, onde mostramos as variações simultâneas da altura do pico de ionização,  $h_m F2$ , e a componente sul-norte, perpendicular ao campo magnético, da velocidade de deriva, medidos em Millstone Hill. As curvas tracejadas representam a média aproximada dessas variações para dias não perturbados magneticamente. Os traços contínuos representam medidas<sup>13</sup> relativas a um dia perturbado.

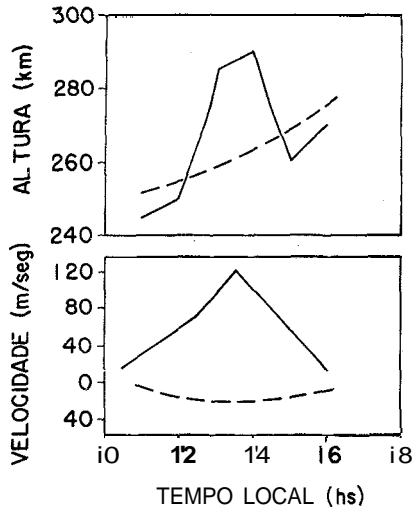


Fig.6 - Variação com o tempo da altura do pico de densidade eletrônica da região F para dias normais (linha tracejada) e para um dia perturbado (linha cheia) e as respectivas velocidades de deriva para norte e perpendiculares a B. Medidas por radar.

Notar que um aumento considerável na velocidade de deriva é acompanhado, quase que simultaneamente, por uma elevação de cerca de 30 km do pico de densidade eletrônica.

#### 4. MEDIDAS DE CAMPOS ELÉTRICOS

As primeiras medidas diretas de campos elétricos ionosféricos são relativamente recentes (-1960). Antes disso, nosso conhecimento sobre os campos elétricos era baseado apenas nos efeitos que causam: movimentos de íons e elétrons, correntes elétricas, e derivas de irregularidades ionizadas. As velocidades de deriva podem ser da ordem de grandeza de algumas centenas de metros por segundo, correspondentes a campos elétricos de dezenas de milivolts por metro. Campos elétricos de alguns milivolts por metro são típicos na região das correntes  $S_4'$ , em latitudes médias, ao passo que, nas altas latitudes, os campos podem atingir valores da ordem de 100 mv/m.

#### 4.1. Deposição da nuvens artificiais na ionosfera

O método de depositar nuvens artificiais na alta atmosfera<sup>14</sup>, foi um dos primeiros a Fornecer medidas de campos elétricos. Compostos especiais de bário, levados a grandes alturas em foguetes e aí liberados, tornando-se excitados e ionizados quando expostos à luz solar, tornada-se uma nuvem bem visível do solo, durante o crepúsculo. Uma nuvem neutra também é criada no processo. O movimento desta está relacionado com o vento local, ao passo que o deslocamento da porção ionizada se deve aos campos elétricos. Uma série de fotografias tomadas do solo, em vários ângulos, permite a determinação dos vetores velocidade de deriva e vento.

#### 4.2. Provas de potencial

Outra técnica, para a medida de campos elétricos *in situ*, faz uso de sensores especiais acoplados a veículos espaciais, que medem diretamente a diferença de potencial entre dois sensores esféricos separados por alguns metros de distância. Os sensores são projetados para possuírem exatamente as mesmas características geométricas e elétricas, de tal modo que se anule a perturbação criada pelos sensores por sua presença no plasma. Assim, a diferença de potencial medida deverá ser a mesma do plasma não-perturbado. Essa técnica foi muito usada nas regiões de altas latitudes, onde os campos elétricos são mais irregulares que os de latitudes médias e bem mais intensos<sup>15,16</sup>.

#### 4.3. Propagação de baixa frequência

Os movimentos perpendiculares às linhas magnéticas, a grandes distâncias da superfície da Terra, na plasmaesfera, podem ser deduzidos a partir dos assobios ("whistlers"). Estes são sinais eletromagnéticos de baixa frequência (áudio), originados nas descargas elétricas naturais (relâmpagos) e que podem propagar-se ao longo das linhas do campo geomagnético. Os "whistlers" foram inicialmente usados para determinar densidades eletrônicas na magnetosfera, mas podem ser usados também para determinar o movimento radial dos dutos de ionização, que representa a componente leste-oeste do campo elétrico. As medidas, em geral, se situam entre 3,5 e 5,5 raios terrestres, no plano equatorial. Os resultados assim obtidos<sup>17</sup>, po-

dem ser mapeados para a ionosfera e, portanto, podem ser comparados com resultados de outras técnicas.

#### 4.4. Espalhamento incoerente

Os radares de espalhamento incoerente, em geral, são capazes de medir vários parâmetros ionosféricos simultaneamente, entre os quais a velocidade dos íons através do desvio Doppler no espectro de frequência. Sua vantagem principal, com relação às outras técnicas, é que, em princípio, pode fazer medidas ininterruptas, no mesmo local e em várias altitudes. Entre as desvantagens está o seu alto custo de construção e operação, o que, provavelmente, explica o pequeno número de radares existentes<sup>20</sup>.

### 5. CONCLUSÕES

Em condições de baixa atividade magnética, os campos elétricos ionosféricos são da ordem de 1 mV/m em latitudes médias, um pouco maiores em latitudes baixas, e bem elevados em latitudes altas, onde são frequentes magnitudes de 50 a 100 mV/m. Em condições de elevada atividade magnética, em todas as latitudes, suas variações temporais mudam consideravelmente.

Os campos elétricos, associados à região E, dominam as variações temporais durante o dia, em latitudes médias. Durante a noite, a possibilidade de formação de campos elétricos na região F está sendo investigada. Os campos elétricos magnetosféricos dominam as regiões de latitudes altas, chegando a latitudes relativamente baixas, durante atividade magnética elevada.

Entre os vários efeitos causados por campos elétricos destacam-se: a formação da camada E esporádica, a formação dos eletrojatos, e a modificação na altura do pico da região F.

## REFERÊNCIAS

1. Spreiter, J.R. and B.R. Briggs, "Theory of electrostatic fields in the ionosphere at polar and middle geomagnetic latitudes: J. Geophys. Res., 66, 1731-1744 (1961).
2. Mozer, F.S. and R. Serlin, "Magnetospheric electric field measurements with balloons," J. Geophys. Res., 74, 4739-3754 (1969).
3. Mozer, F.S., "Electric field mapping in the ionosphere at the equatorial plane, Planet. Space Sci., 18, 259-263 (1970).
4. Maeda, H., "World-wide pattern of ionization drifts in the ionospheric  $F$ -region as deduced from geomagnetic variations," Proc. Conf. Ionosphere 1962, Inst. Phys. and Phys. Soc. London, 187-190 (1963).
5. Matsushita, S., "Interactions between the ionosphere and the magnetosphere for  $S_q$  and  $L$  variations," Radio Sci., 6, 279-294 (1971).
6. Stening, R.J., "The electrostatic field in the ionosphere," Planet. Space Sci., 21, 1897-1910 (1973).
7. Rishbeth, H., "The  $F$ -layer dynamo," Planet. Space Sci., 23, 263-267 (1971).
8. Axford, W.I. and C.O. Hines, "A unifying theory of high latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms," Can. J. Phys., 39, 1433-1464 (1961).
9. Axford, W.I. "Magnetospheric convection," Rev. Geophys., 7, 421 - 459, (1969).
10. Rees, D., E.B. Dorling, K.H. Lloyd and C. Low, "The role of neutral winds and ionospheric electric fields in forming stable sporadic  $E$ -layers," Planet. Space Sci., 24, 475-478 (1976).
11. Whitehead, J.D., "The formation of the sporadic  $E$ -layer in the temperate zones," J. Atmosph. Terr. Phys, 20, 49-58 (1961).
12. Kirchhoff, V.W.J.H. and P.P. Batista, "Calculation of the vertical drift of the sodium ion," INPE-994-NT1/082, 1977.
13. Carpenter, L.A. and V.W.J.H. Kirchhoff, "Daytime three dimensional drifts at Millstone Hill Observatory," R. Science, 9, 217-222 (1974).
14. Haerendel, G., R. Luest and E. Rieger, "Motion of artificial ion clouds in the upper atmosphere," Planer. Space Sci., 15, 1-18 (1967).
15. Mozer, F.S. and P. Lucht, "The average auroral zone electric field," J. Geophys. Res., 79, 1001-1006 (1974).
16. Heppner, J.P., "Electric field variations during substorms: OGO-6 measurements," Planet. Space Sci., 20, 1475-1498 (1972).
17. Carpenter, D.L. and N.T. Seely, "Cross-L plasma drifts in the outer plas-

- masphere; quiet time patterns and some substorm effects," J. Geophys. Res., 81, 2728-2736 (1976).
18. Evans, J.V., "Measurements of horizontal drifts in the E and F regions at Millstone Hill," J. Geophys. Res., 77, 2341-2352 (1972).
19. Kirchhoff, V.W.J.H. and L.A. Carpenter, "The day-to-day variability in ionospheric electric fields and currents," J. Geophys. Res., 81, 2737-2742, (1976).
20. Kirchhoff, V.W.J.H., "Princípios básicos em espalhamentos incoerente e sua contribuição para o estudo da física da atmosfera superior: INPE-111 - PE/084, 1977.
21. Ratcliffe, J.A., in *An introduction to the ionosphere and magnetosphere*, Cambridge University Press, 1972.