



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE

**ESTUDO DE PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS NAS REGIÕES DA
ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL E ANTÁRTICA**

Herbert Ricardo Gonzales Lopes

Relatório de Iniciação Científica - PIBIC

INPE
São José dos Campos
2000

**ESTUDO DE PULSAÇÕES GEOMAGNÉTICAS NAS REGIÕES DA
ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL E ANTÁRTICA.**

**Bolsista: Herbert Ricardo Gonzales Lopes
Aluno da Universidade Estadual Paulista - Bolsa PIBIC/CNPq**

**Orientador: Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra
Pesquisador professor DGE/INPE**

**Orientador: Dr. José Marques da Costa
Pesquisador DGE/INPE e professor UNITAU**

Aos meus orientadores:

Dr. Severino Guimarães Dutra e Dr. José Marques da Costa
pelo apoio que estou tendo para a realização deste projeto

RESUMO

O Estudo de Pulsações Geomagnéticas nas Regiões da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e Antártica é de grande interesse científico. Resultados recentes obtidos por outros pesquisadores têm mostrado uma alta correlação entre a ocorrência de micropulsações, medidas em várias estações geomagnéticas, na superfície terrestre, com as variações na velocidade do vento solar. Medidas efetuadas com equipamentos instalados na superfície terrestre permitem estudar processos físicos que ocorrem a distâncias de 10 raios terrestre ou superiores.

Os dados geomagnéticos obtidos nas Estações Comandante Ferraz, na Antártica, e Santa Maria, na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, foram processados para períodos de atividades geomagnéticas calma e perturbada. Para procura das frequências dominantes usou-se o método da transformada rápida de Fourier (FFT). Na seleção dos dados utilizou-se parâmetros solares e do campo geomagnético, principalmente as variações do índice Kp. Das análises das variações diurnas pode-se também determinar períodos magneticamente calmo e perturbados. Micropulsações dos tipos Pc1(1-5s), Pc2(5-10s), Pc3(10-45s), Pc4(45-150s), Pc5(150-600s) e Pc6(600-2400s) foram observadas nas estações de Comandante Ferraz e Santa Maria.

SUMÁRIO

1.1) Introdução e Justificativa	5
1.2) Objetivos Específicos	6
1.3) Material a ser utilizado no processamento dos dados	7
1.4) Métodos e forma de análise dos resultados	8
1.5) Nomenclatura	9
2) Variação temporal do campo geomagnético	11
2.1) Descrição geral da variação temporal	11
2.2) Variações geomagnéticas	13
2.3) Índices de atividade magnética	14
2.4) Variações perturbadas, tempestades	15
2.5) Variações temporais do campo principal	17
2.6) Campos externos - Tempestade geomagnética	18
2.6.1) Descrição básica de um evento de tempestade geomagnética	19
3) Descrição do método de análise dos dados	20
3.1) O filtro passa banda	20
3.2) O método da análise de fourier	21
3.3) Transformada discreta de fourier	21
3.4) A transformada rápida de fourier	23
3.5) Espectro de potência	24
3.6) Suavização do espectro	26
4) Micropulsações Geomagnéticas	28
4.1) Introdução	28
4.2) Classificação das Micropulsações	29
4.3) Classificação Morfológica	31
4.3.1) Pulsações Contínuas Pc1-2 (T= 0,2-10s)	31
4.3.2) Pulsações Contínuas Pc3 (T= 10-45s)	32
4.3.2.1) Compressional Pc3	33
4.3.2.2) Toroidal Pc3	33

4.3.3) Pulsações Contínuas Pc4(T= 45-150s)	34
4.3.4) Pulsações Contínuas Pc5(T= 150-600s)	35
4.3.4.1) Compressional Pc5	36
4.3.4.2) Toroidal Pc5	36
4.4) Micropulsações Irregulares	37
4.4.1) Pulsações Irregulares Pi1	38
4.4.2) Pulsações Irregulares Pi2	38
4.5) Outras Formas de Atividades Pi	39
4.6) Classificação Genética	39
4.6.1) Pulsações de Baixa Frequência (1-10mHz)	39
4.6.2) Pulsações de Media Frequência (10-100mHz)	40
4.6.3) Pulsações de Alta Frequência (0,1-10Hz)	40
5) Auroras Polares	42
6) Conclusões e Comentários	51
7) Referências Bibliográficas	52

1.1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O campo magnético da Terra é produzido pelo movimento do fluido em alta temperatura existente no seu núcleo. O movimento deste fluido, ionizado devido as altas temperaturas, provoca o aparecimento de correntes elétricas que induzem o campo magnético. Fora da Terra, este campo seria dipolar se não fosse a influência de fontes secundárias que o distorcem e perturbam. A faixa de variação temporal do campo magnético terrestre estende-se desde frações de segundos até mais de milhões de anos. As causas das variações de longo período, como a variação secular, são internas, enquanto que as variações com períodos menores do que alguns dias são de origens externas à Terra. As variações de curto período, são associadas as tempestades geomagnéticas; a variação diurna e as variações de períodos mais curto, chamadas de micropulsações geomagnéticas, estão ligadas direta ou indiretamente à atividades solar.

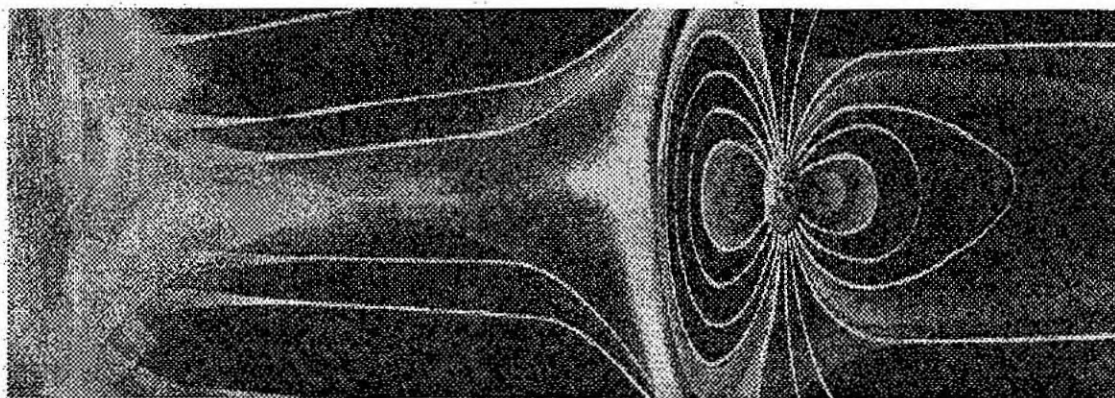


Fig. 1 Interação do Vento Solar com a magnetosfera da Terra.

As micropulsações são flutuações de curto período (usualmente da ordem de segundos a minutos) do campo magnético terrestre. A faixa de período na qual se considera micropulsações está entre 0,2 segundos e 17 minutos, com amplitudes desde frações até centenas de nanotesla.

A interação do vento solar com o campo magnético da Terra é o principal processo de geração das micropulsações, detectadas em toda a magnetosfera, ionosfera e na superfície terrestre. O primeiro estudos levaram a classificar as pulsações

geomagnéticas em duas categorias de acordo com a regularidade e o período das variações. As pulsações com pico espectral muito bem definido foram classificadas como pulsações contínuas (Pc), enquanto as que envolvem grande faixa espectral foram classificadas como pulsações irregulares (Pi).

O estágio do conhecimento sobre micropulsações geomagnéticas na faixa de (0,01-5Hz) indica que as fontes de energia destas ondas podem ser de origem interna ou externa à magnetosfera. As fontes internas incluem, principalmente, as instabilidades associadas à dinâmica das partículas carregadas; entre as fontes externas estão a magnitude e a orientação do campo magnético interplanetário associado ao vento solar.

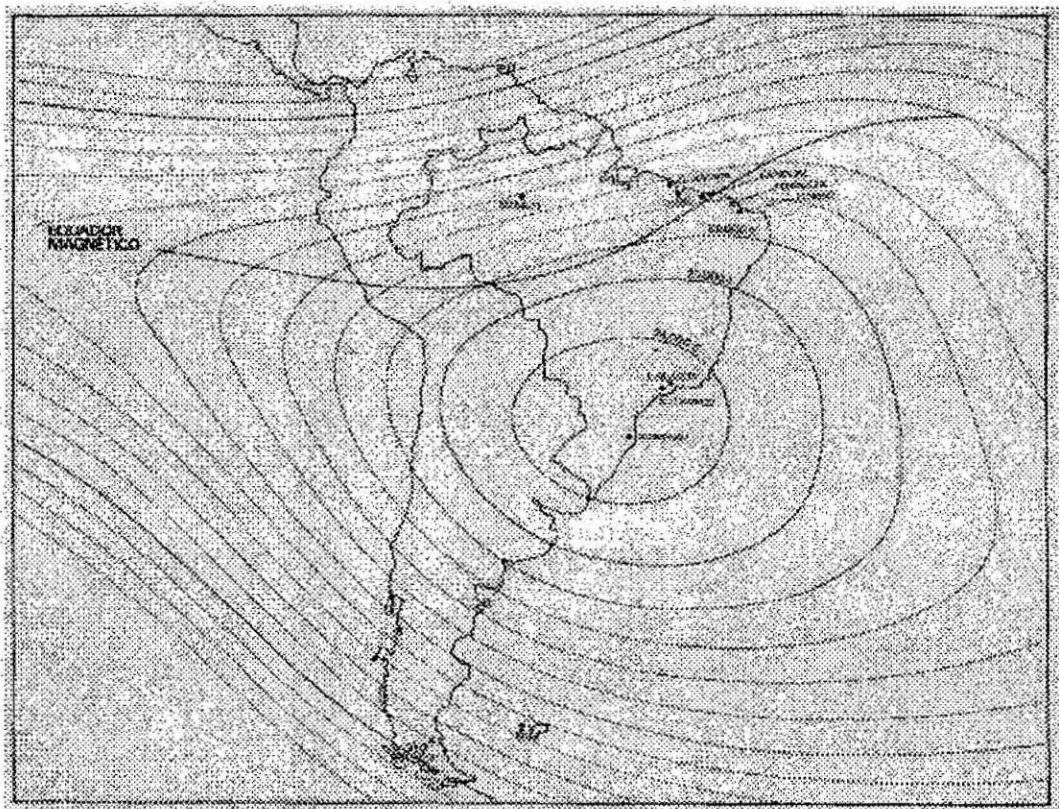


Fig. 2. Regiões da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e Eletrojato Equatorial

1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Através deste estudo pretende-se:

1) Determinar as características das variações geomagnéticas tais como: período, amplitude, duração, fase, os horários de maior ocorrência, observadas nas regiões da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e Antártica;

2) Processamento de dados geomagnéticos com os programas e ferramentas computacionais, que utilizam transformada rápida de Fourier (FFT), para estudos de variações diurnas e pulsações geomagnéticas nas regiões da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e Antártica;

3) Correlacionar as variações geomagnéticas de baixas latitudes/equatoriais com os parâmetros físicos associados a atividades geomagnéticas terrestre e interplanetária;

4) Comparação entre os resultados obtidos da análise das variações geomagnéticas.

1.3 - MATERIAL A SER UTILIZADO NO PROCESSAMENTO DOS DADOS.

O material utilizado nesta pesquisa consta dos dados geomagnéticos, referentes às variações nas componentes H, D e Z medidas nas estações de Santa Maria, a cada 3 segundos, com magnetômetros do tipo *fluxgate* de alta precisão, no período de 1993-1995. Nos estudos referentes a Antártica faz-se-á uso dos dados geomagnéticos coletados na Estação Antártica Comandante Ferraz – EACF, com bobinas magnéticas de alta sensibilidade. Este conjunto de dados geomagnéticos está disponível junto a Linha de Pesquisa e Desenvolvimento Geomagnetismo, da Divisão de Geofísica Espacial, da Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas, do INPE, na forma digital. Os dados são processados com o auxílio de um computador Pentium e uma estação de trabalho Sun, adquiridos com recursos da FAPESP (Geociências: Proc. 92/2766-2; Programa de Infra - Estrutura - Informática: Proc. 94/4703-3).

Faz-se-á também uso de dados sobre os parâmetros físicos do vento solar, medidos com instrumentação a bordo de satélites, no período 1993-1995, que serão obtidos junto ao Centro Mundial de Dados Geomagnéticos, de Boulder, Colorado. O acesso a estes dados será feito via INTERNET.

1.4 - MÉTODOS E FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

1) Processamento e análise preliminar dos dados geomagnéticos de cada estação, para a seleção de espectros medidos durante períodos de atividade geomagnética calma e perturbada. O grau de perturbação da atividade geomagnética será aferida através de consulta aos índices Kp fornecidos pelo Centro Mundial de Dados Geomagnéticos de Boulder.

2) Processamento e análise de espectros selecionados para um mesmo intervalo de tempo. O método de análise inclui a procura de frequências dominantes e a determinação de suas amplitudes, através da utilização da transformada rápida de Fourier.

3) A forma de análise envolve a comparação das características dos espectros, bem como a correlação dos resultados com os parâmetros do vento solar.

4) A interpretação dos resultados e as conclusões da pesquisa foram feitas a luz das teorias existentes sobre variações geomagnéticas em latitudes baixas e equatoriais.

1.5 - NOMENCLATURA

As sete grandezas F , Z , H , I , D , X , e Y (fig. 3) são chamadas de elementos magnéticos, e quaisquer dos três elementos independentes por exemplos (H, D, Z ; H, D, I ; X, Y, Z) especificam o campo geomagnético:

1 - F representa o (vetor) do campo magnético da terra (normalmente chamado de intensidade total do campo) em qualquer ponto. O campo magnético também pode aparecer com a nomenclatura B ;

2 - Z indica a intensidade da componente vertical do campo (considerada positiva no sentido do interior da Terra);

3 - H indica a intensidade da componente horizontal do campo;

4 - I (inclinação ou *dip*), é o ângulo que o campo total, F , faz com a sua componente horizontal, H ; a inclinação é considerada positiva quando a componente Z está no sentido do interior da Terra;

5 - D (denota declinação ou variação magnética), é o ângulo que a componente horizontal do campo faz com o norte geográfico, se D for positivo, significa que a componente horizontal do campo está à leste do norte, e se D for um ângulo negativo, significa que a componente horizontal do campo está a oeste do norte;

6 - X denota a intensidade da componente do campo horizontal na direção norte – sul geográfica;

7 - Y denota a intensidade da componente do campo horizontal na direção leste – oeste geográfica.

Medições ou registros do campo magnético da Terra utilizam três componentes, pois é o suficiente para definir um vetor. Das setes possíveis em geral são utilizadas as componentes H, D e Z. No caso da Antártica será utilizado apenas duas componentes magnéticas X e Y.

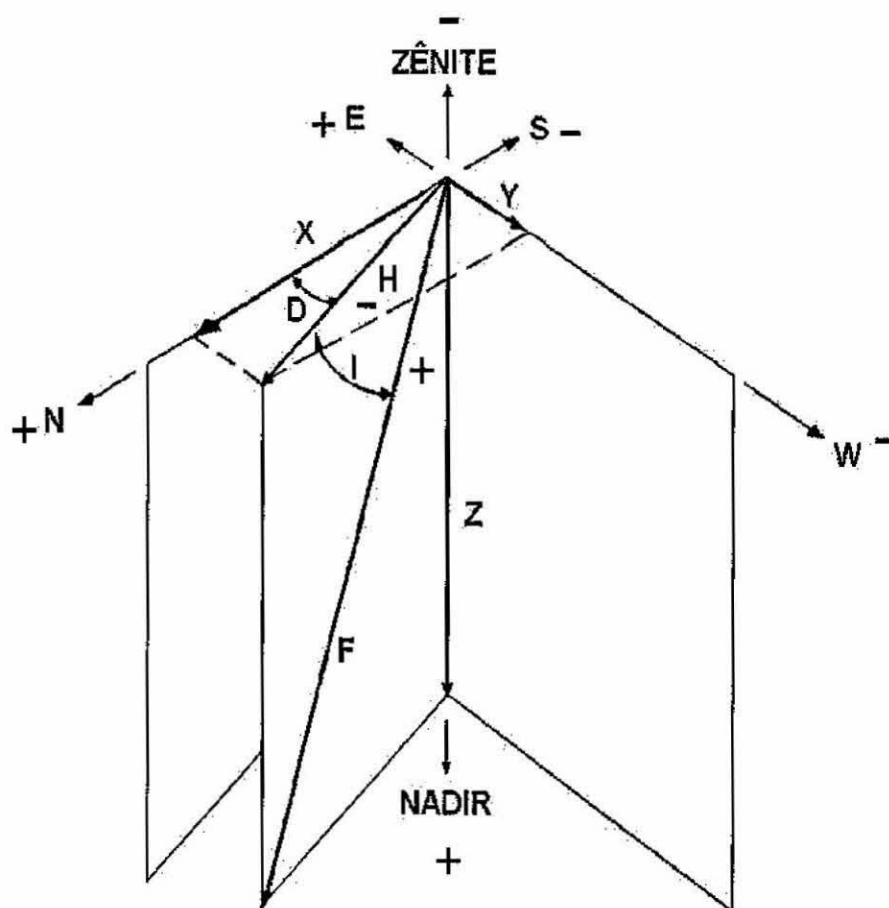


Fig. 3 – As Componentes do Campo Magnético da Terra

F = Intensidade Total

H = Componente Horizontal

Z = Componente Vertical

D = Declinação

I = Inclinação

X = Componente Norte - sul

Y = Componente Leste - Oeste

2 - VARIAÇÃO TEMPORAL DO CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

2.1 - DESCRIÇÃO GERAL DA VARIAÇÃO TEMPORAL

As variações temporais do campo magnético da Terra são as mudanças com o tempo da intensidade ou direção do vetor do campo (ou suas componentes) em um determinado local. No momento são de importância prática por causa dos efeitos que causam em bússola magnética de navegação e por causa das perturbações associadas a propagação de onda de rádio (inclusive "blecautes" de rádio) afetando a comunicação e sistemas de navegação. É preciso o conhecimento da natureza e causas destas variações para entender estes efeitos, aumentar a precisão da previsão sob condições desfavoráveis, e entender outros efeitos que podem dar importância na prática do futuro.

Atualmente vários observatórios permanentes localizados em vários lugares ao redor da Terra, fazem registros contínuos (magnetogramas) da variação da intensidade ou direção de três componentes do campo geomagnético. A precisão por volta de alguns nanoTeslas ($1\text{nT} = 10^{-5}\text{G}$), ou alguns décimo de um minuto de arcos é obtida para as variações mais lentas que têm durações de um minuto ou mais. As flutuações que têm durações de segundos ou menos requerem técnicas de gravação diferentes e não são regularmente medidas.

As variações temporais são, em geral, irregulares em caráter, mas podem ser discutidas convenientemente em termos do espectro de frequência e do seu conteúdo de energia. As variações a serem consideradas aqui se originam fora da Terra, principalmente na ionosfera, e são atribuídas à causas solares. O espectro de energia destas variações cobre períodos que variam de uma fração de um segundo até vários dias, sendo que o espectro de frequência equivalente é de aproximadamente 50 Hz até aproximadamente 10^{-5} Hz. Este espectro exclui a maioria dos efeitos da variação secular, como também de descargas de raio, quais causam flutuações rápidas na faixa de rádio-frequência.

Um dia magneticamente ativo, ou perturbado, é caracterizado pela existência de muitas e grandes variações que têm durações de duas a três horas. Um dia calmo ou não perturbado tem pequena ou nenhuma variação; os magnetogramas durante dias muito calmos mostram uma variação lenta do campo. As tempestades magnéticas são intervalos de atividade magnética pronunciada que acontece concorrentemente em todas as partes do globo terrestre. Uma das características principais das tempestades magnéticas é a diminuição marcada em H, que alcança seu ponto mínimo dentro de algumas horas após o início súbito e gradualmente retorna ao nível normal durante os dias seguintes.

Para durações menores que aproximadamente 10 minutos, as amplitudes das variações são aproximadamente proporcionais às durações. As variações temporais do campo são maiores nas zonas aurorais, que estão aproximadamente a ± 67 graus latitude geomagnética (aproximadamente ± 23 graus do polo geomagnético).

Os efeitos das variações temporais na navegação com bússola magnética aumentam rapidamente com latitude crescente por causa da diminuição na componente horizontal do campo principal e o aumento na amplitude das variações. Uma variação 10% em H pode ser esperada duas a três vezes por mês nas zonas aurorais. Embora a longo prazo (vários dias) o efeito da perturbação magnética geralmente é uma diminuição na magnitude de H, as variações na declinação, D, como também as variações de pequena duração em H, é de uma natureza mais forte.

As perturbações na comunicações de rádio, que são freqüentemente associadas as perturbações magnéticas e que são causadas por absorção na baixa ionosfera, também têm o efeito máximo nas zonas aurorais.

2.2 - VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS

Basicamente há dois tipos de variação magnética: as que correspondem a períodos magneticamente calmos, e as variações mais intensas associadas a tempestades magnéticas. As variações diurnas do primeiro tipo, são de dois tipos principais, a variação Sq, e uma mais fraca chamada variação L. A primeira é influenciada pela ação do Sol (S), em tempo calmo quieto, e a segunda pela Lua (L). As variações mais intensas, associadas às tempestades, são as variações perturbadas.

As variações Sq, por serem variações pequenas em torno de um valor médio, são expressas na unidade gama (γ) sendo $1\gamma = 10^{-9}T$. As variações Sq, nas componentes X, Y e Z, estão representadas na Figura 04 para o hemisfério Norte, equador e hemisfério Sul.

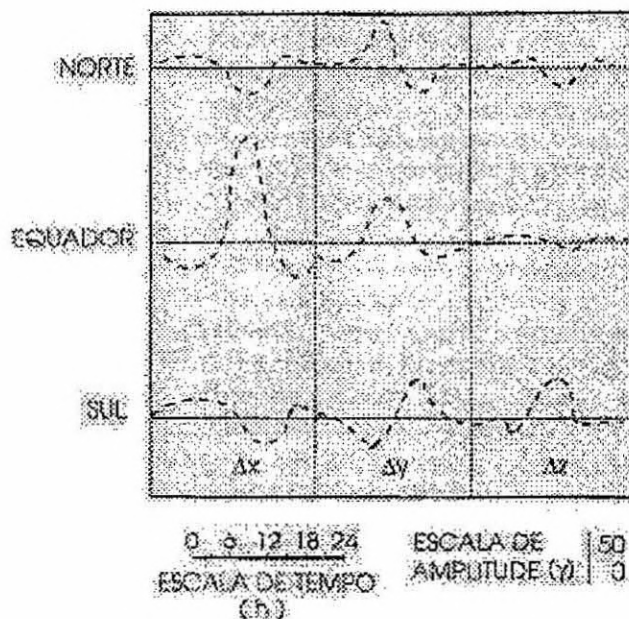


Fig. 4 - Representação das variações geomagnéticas Sq.

2.3 - ÍNDICES DE ATIVIDADE MAGNÉTICA

É importante ter-se uma medida quantitativa da intensidade do distúrbio magnético em um dado período. Achou-se mais prático expressá-la por intermédio de índices magnéticos. A fim de definir rapidamente o estado de atividade do campo magnético, foram criados vários índices, baseados nas variações de F , medidas pelos magnetômetros. Em cada estação, o dia é dividido em oito períodos de 3 horas (horário de Greenwich) e, das três componentes de F , aquela variação que for a maior, em cada período, é chamada a amplitude a (em gamas). As variações Sq e L são previamente subtraídas de cada componente. Estas amplitudes, medidas em uma série de estações para cada período, produzem o *índice planetário* A_p . O índice K está relacionado às amplitudes a , através de uma escala semi - logarítmica própria para cada estação. Os valores numéricos de K variam de 0 (atividade muito calma) a 9 (atividade muito intensa), com frações intermediárias de $1/3$, representados, por exemplo, pelos valores 8^+ , 2^- , 3^- , etc. A média entre várias estações corresponde ao índice planetário K_p , talvez o mais usado na literatura. O índice K_p , sendo um índice planetário, deveria exprimir o estado médio de atividade magnética no globo terrestre mas, para isso, a rede de magnetômetros deveria ser uniformemente distribuída, o que não ocorre na realidade, havendo muito mais observatórios no hemisfério norte. A soma, $\sum K_p$, para um determinado dia, é freqüentemente usada.

Recentemente fez-se uma separação (entre hemisférios) do índice K_p havendo, portanto, um para o norte e outro para o sul. Além dos índices citados, há outros mais adequados para certas regiões, ou mais convenientes para certas aplicações.

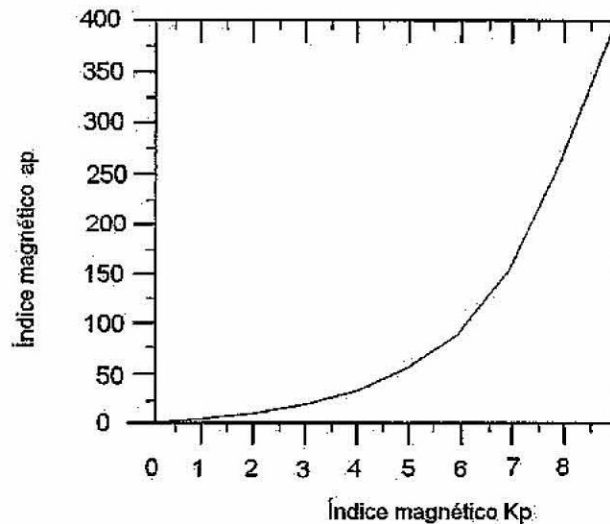


Figura 5 – Relação entre os índices magnéticos Kp e ap.

O índice magnético diário A_p , obtido através do mesmo conjunto de dados, mas convertido a uma escala linear e tomando-se a média sobre 24 horas UT, é também empregado para caracterizar um período de distúrbio magnético. O índice ap é definido a cada 3 horas. A Figura 05 mostra a relação entre os índices K_p e ap .

2.4 - VARIAÇÕES PERTURBADAS, TEMPESTADES

Há ocasiões em que se verifica um aumento apreciável na radiação solar do EUV, na velocidade ou concentração do vento solar, ou ambos, caracterizando uma *tempestade solar*. Quando a radiação e as partículas alcançam a Terra, ocorrem os fenômenos chamados *distúrbios ionosféricos súbitos (DIS)*, *tempestades ionosféricas*, e *tempestades magnéticas*.

O aumento que se verifica na radiação solar abaixo de 10Å , na faixa dos raios X, associa-se à *erupção solar* que produz um aumento na ionização em torno de 80km de altura. Este aumento na ionização dá origem a uma série de fenômenos que se

denominam de DIS. A propagação de ondas eletromagnéticas é bastante afetada, podendo ser muito atenuada. Note-se que os DIS ocorrem somente na face iluminada pelo Sol, e são mais intensos quando o Sol está no zênite.

O aumento do conteúdo eletrônico na região D, ocorre rapidamente (alguns minutos) após o que tende à recuperação, que dura da ordem de 1,5 horas. Pequenas variações no campo magnético também se verificam na ocorrência de DIS intensos e são chamados *crochets*.

Durante as tempestades, tanto o campo magnético, quanto a ionosfera, podem sofrer mudanças drásticas. No primeiro caso, fala-se em *tempestades magnéticas* e, no segundo, em *tempestades ionosféricas*. A perturbação solar causadora destes fenômenos é geralmente caracterizada por um aumento do vento solar. Sua densidade pode passar de 10^6 a 10^7 m^{-3} , e sua velocidade, de $300Km.s^{-1}$ pode atingir até 900 ou 1000 $km.s^{-1}$. Durante os períodos perturbados observa-se um aumento na luminosidade auroral.

O aumento de velocidade e concentração do vento solar tem o efeito de aumentar a compressão das linhas do campo geomagnético no lado voltado para o Sol. Como resultado da maior concentração de linhas de campo, há um aumento relativamente rápido na intensidade do campo magnético, e a magnetopausa, de 10 raios terrestres pode passar a 6 raios terrestre. O aumento em F, é o chamado início súbito (IS), mas que nem sempre se faz notar nos magnetogramas, ou porque sua variação é muito pequena, ou porque é muito lenta. A partir do IS, a variação do campo magnético tem uma forma característica de variação indicada esquematicamente na Figura 06. A variação é dividida em fases. O aumento inicial é a chamada *fase inicial* da variação perturbada, e é causada pela compressão das linhas magnéticas na magnetosfera pelo vento solar. A fase seguinte, chamada *fase principal*, corresponde a um decréscimo do campo magnético, devido ao aumento de correntes elétricas que fluem na magnetosfera, formando o sistema da corrente de anel. Esta é a fase mais longa, com duração de alguns dias, A parte final, quando o campo volta ao seu estado não perturbado, é a *fase de recuperação*. As variações menores superpostas à fase principal são devidas aos

sistemas secundários de correntes elétricas que circulam nas regiões polares. São os *distúrbios polares (DP)*, e estão associados às sub-tempestades polares.

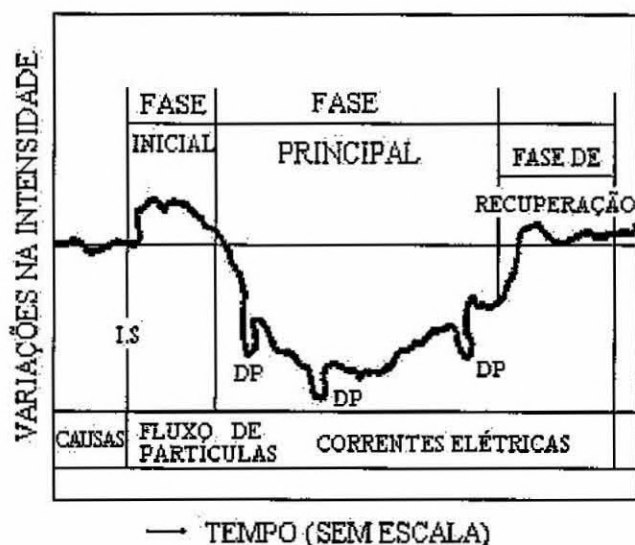


Figura 6 – Ilustração das fases de uma tempestade magnética

2.5 - VARIÁÇÕES TEMPORAIS DO CAMPO PRINCIPAL

É conhecido que as componentes do campo magnético (elementos de campo) na superfície terrestre apresentam variações temporais. Estas variações operam em escalas de milisegundos a milhares de anos.

As variações de curto prazo surgem, principalmente, das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera e das variações súbitas e intensas das tempestades magnéticas. Estas flutuações são superpostas às variações de longo prazo (*variação secular*) que, embora sejam muito lentas comparadas aos transientes de curto prazo, variam rapidamente sobre uma escala de tempo geológica (objeto de estudo da ciência Paleomagnetismo).

O espectro temporal da variação secular é muito variado. Variações nos campos não dipolares dão-se em escala de tempo de séculos; enquanto que variações dipolares

ocorrem em escala da ordem de milênios. Periodicidades entre 4 e 30 anos podem estar associadas às variações de campos externos. Dados paleomagnéticos indicam períodos de 450, 600, 1800 e 10000 anos. A causa da variação secular está conectada à origem do campo principal, caracterizando-se por um mero rearranjo das linhas de força.

Regredindo em escala de tempo geológica, por intermédio de investigações paleomagnéticas atualmente disponíveis, encontram-se indicações muito evidentes da realidade das reversões do campo magnético principal (mudanças de polaridade no modelo de campo dipolar). A natureza do campo durante uma reversão envolve duas questões importantes, ainda sem solução: Qual o tempo necessário para uma reversão efetuar-se? O campo magnético dipolar decai a zero, voltando a crescer em direção oposta; ou o dipolo simplesmente precipita-se em direção contrária?

2.6 - CAMPOS EXTERNOS - TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA

Quando as três componentes de campo, medidas em uma certa estação magnética, apresentam variações regulares e suaves, é convencional designar o período analisado como *dias calmos*; em contraste, quando as variações são relativamente irregulares, ele é chamado de *dias perturbados*. No entanto, se o período apresentar intensos distúrbios magnéticos associados, tem-se uma tempestade *magnética*.

Excluindo-se os períodos de tempestades magnéticas, encontra-se uma variação diária regular nos elementos de campo, observados a partir dos magnetogramas. A contribuição principal é a *variação solar diária*, Sq, com uma periodicidade de 24 h, e uma mais fraca chamada de *variação diária lunar*, L, com uma periodicidade próxima a 25 h.

2.6.1 - DESCRIÇÃO BÁSICA DE UM EVENTO DE TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA

Não existe um critério bem definido para especificar uma tempestade magnética, embora na maior parte estes eventos exibem certas características comuns. Tipicamente, um evento de tempestade pode ser dividido em quatro fases:

Início súbito da tempestade: a tempestade pode iniciar-se gradualmente ou através de uma mudança repentina na componente de campo H (usualmente atinge valores crescentes de algumas dezenas de γ). Algumas vezes, um pequeno aumento inicial em H é seguido, dentro de 2 a 3 min, de um acentuado decrescimento.

Fase inicial: dentro de 1h ou menos, a partir do possível início súbito da tempestade, H cresce e permanece de 30 a 50 γ superior ao seu valor pré - tempestade. Muitas tempestades não possuem fase inicial.

Fase principal: é caracterizada pela redução drástica na componente horizontal do campo (de 100 a 400 γ), ocupando algumas horas. A magnitude da redução varia com a latitude, atingindo um valor máximo próximo ao equador e decrescendo em direção aos pólos geográficos até, aproximadamente, $\pm 60^\circ$ de latitude. Em direção a zona auroral, a magnitude da redução de H volta a crescer rapidamente.

Fase de recuperação: Depois de H ter alcançado um valor mínimo, ele recupera o seu valor normal, de maneira suave e aproximadamente exponencial. Isto pode levar vários dias.

3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS

Em análise matemática teórica a transformada de Fourier é, em geral, aplicada a uma função contínua, implicando uma extensão infinita do sinal. Entretanto, em análise de dados ou em matemática numérica a forma de onda é discreta, como por exemplo, uma série temporal, que é finita em extensão. Neste caso, é a versão discreta da transformada de Fourier (DFT) que deve ser utilizada.

A transformada rápida de Fourier (FFT) é um método computacional eficiente para o cálculo da DFT de uma série temporal. Sua eficiência está no fato de calcular os coeficientes da DFT iterativamente. O cálculo direto dos coeficientes de uma série com N amostra requer um esforço computacional de ordem de N^2 .

3.1 O FILTRO PASSA BANDA

Os dados geomagnéticos adquiridos na Estação de Santa Maria, foram digitalizados em arquivos separados, cada um contendo a série temporal de 24 horas de dados, com um intervalo de amostragem de 3 segundos. Estes arquivos são mostrados em gráficos de intensidade versus tempo, o que constitui a chamada variação diurna do campo geomagnético. Porém, como o objetivo deste trabalho reside em estudar as micropulsações do campo geomagnético, torna-se necessário filtrar o sinal da variação diurna de modo que “passem” somente os sinais de micropulsações.

Para fins de filtragem de sinais digitais, existem filtros que operam no domínio do tempo, deixando passar somente o sinal acima ou abaixo de uma determinada frequência. A esses filtros dá-se o nome de filtros passa alta e passa baixa, respectivamente. Para estudar as micropulsações necessita-se somente do sinal em uma banda de frequência que vai desde 1mHz até 0,1Hz (1000 - 10 seg). Para isso, usou-se um filtro tipo passa-faixa, que deixa passar apenas os sinais numa faixa de frequência. Aplicando, então, esse

filtro tipo passa-faixa, tem-se como saída o sinal das micropulsões para estudos posteriores.

3.2 O MÉTODO DA ANÁLISE DE FOURIER

Um processo físico pode ser descrito no domínio do tempo, por uma quantidade h como função do tempo, $h(t)$, e também no domínio de frequência, $H(f)$, com $-\infty < f < \infty$. Para muitos propósitos é usual pensar que $h(t)$ e $H(f)$ são duas representações diferentes da mesma função. As relações entre $h(t)$ e $H(f)$ são dadas pela relação de transformação de Fourier:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{+i\omega t} dt \quad (3.1)$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular dada em radianos por segundo. Se t é medido em segundos, então f é dado em ciclos por segundos ou Hz (unidade de frequência). Entretanto, as equações 3.1 e 3.2 podem ser aplicadas com qualquer unidade.

3.3 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Suponhamos que temos N pontos consecutivos de uma amostra (N dados), ou seja:

$$h_k \equiv h(t_k), \quad t_k = k \cdot \Delta \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.3)$$

onde Δ é o intervalo de amostragem, t é o tempo (ou uma abscissa qualquer), h é a função (sinal) em análise.

O recíproco do intervalo de amostragem $1/\Delta$ é chamado de taxa de amostragem e se Δ é medido em segundos, a taxa de amostragem é o número de amostras por segundo.

Para qualquer intervalo de amostragem temos uma frequência especial f_c , chamada de frequência de Nyquist (ou frequência crítica de Nyquist) que é dada por:

$$f_c = \frac{1}{(2\Delta)} \quad (3.4)$$

O valor de f_c , representa a maior frequência de espectro a ser obtida, ou seja, o espectro estará na faixa de frequência de $-f_c < f < f_c$.

Desta maneira, estima-se a transformada discreta de Fourier na faixa de frequência de $-f_c < f < f_c$ nos valores discretos:

$$f_n = \frac{n}{N\Delta}, \quad n = \frac{-N}{2}, \dots, \frac{N}{2} \quad (3.5)$$

A transformada de Fourier

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{+2\pi i f t} dt \quad (3.6)$$

será aproximada para a soma discreta

$$H(f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{+2\pi i f_n t} dt \approx \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{+2\pi i f_n t_k} \Delta = \Delta \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{+2\pi i k n / N} \quad (3.7)$$

onde foi usado $t_k = k\Delta$ e $f_n = n/(N\Delta)$. A somatória da Equação 3.7 é chamada de *transformada discreta de Fourier*, dos N pontos h_k :

$$H_n \equiv \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{+2\pi i k n / N} \quad (3.8)$$

A transformada discreta de Fourier mapeia N números complexos de h_k para H_n . Ela não depende de qualquer parâmetro dimensional, tal como o intervalo de amostragem Δ .

A transformada discreta inversa de Fourier, através da qual pode-se recuperar os dados da amostra, é dada por:

$$h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_n e^{+2\pi i k n / N} \quad (3.9)$$

3.4 A TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER

O tempo direto de computação da transformada de Fourier é muito grande. Definindo W como o número complexo:

$$W = e^{+2\pi i / N} \quad (3.10)$$

nos leva a ter para a transformada discreta de Fourier 3.8:

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} W^{nk} h_k \quad (3.11)$$

Então o vetor h_k é multiplicado por uma matriz cujos elementos (n, k) são as constantes W^{nk} para a potência $n \times k$. A multiplicação da matriz produz um vetor resultante cujas componentes é a função H_n . A matriz multiplicação requer N^2 multiplicações, mais um número menor de operações para gerar as potências de W . Desta forma, a transformada discreta de Fourier opera em N^2 processos. Este número pode ser reduzido para $N \log_2 N$

operações usando um algoritmo conhecido como transformada rápida de Fourier (FFT). Como a diferença entre N^2 e $N \log_2 N$ é imensa, o tempo de computação é bastante reduzido para valores grandes de N .

3.5 ESPECTRO DE POTÊNCIA

Se $h(t)$ é uma função que representa um sinal obtido no tempo t , então pode-se fazer uma análise espectral deste sinal usando a transformada de Fourier:

$$F(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{+i\eta t} dt \quad (3.12)$$

onde a função $F(\eta)$ representa o espectro correspondente a $h(t)$. Em muitos casos, entretanto, é mais apropriado considerar a potência de um sinal em vez de sua amplitude ou deslocamento. Neste sentido, define-se a potência como sendo proporcional ao quadrado da amplitude. O espectro correspondente, isto é potência para associada a cada frequência, designado por espectro de potência.

A potência média para uma função real $h(t)$ é definida pela expressão:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{\frac{t_0}{2}}^{\frac{t_0+T}{2}} |h(t)|^2 dt \quad (3.13)$$

quando este limite existe.

O fator $|h(t)|^2$ é chamado de potência instantânea de $h(t)$, e a integral:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt \quad (3.14)$$

é a energia total de $h(t)$, quando a integral converge.

A potência de um sinal $f(t)$ está relacionada ao espectro de potência correspondente $H(\eta)$ através do teorema de Parseval:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H(\eta)|^2 d\omega \quad (3.15)$$

A quantidade real $|H(\eta)|^2$ é chamada de espectro de potência ou espectro de energia, ou mais precisamente, densidade espectral de potência ou densidade espectral de energia. A densidade espectral de energia é expressa em unidades de energia por unidade ou intervalo de frequência. No teorema de Parseval o termo $|H(\eta)|^2$ não carrega a informação sobre a fase do espectro da função do tempo. Isto significa que é impossível recuperar o sinal original $h(t)$ se somente o espectro é dado. Significa também que os sinais com idênticas amplitudes de espectro, mas diferentes fases, teriam a mesma potência. Portanto o espectro de potência não carrega a informação completa do sinal original já que a fase é uma variável perdida.

Agora, supondo que $c(t)$ seja uma função que representa uma amostra de N pontos com valores c_0, c_1, \dots, c_{N-1} e estes pontos estejam dispostos em um tempo T , ou seja: $T = (N - 1)\Delta$, a potência total é expressa então por:

$$\frac{1}{T} \int_0^T |c(t)|^2 dt \cong \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} |c_j|^2 \quad (3.16)$$

Quando se tem uma amostra com N pontos de uma função $c(t)$ em intervalos iguais e usamos a FFT para calcular a transformada discreta de Fourier:

$$C_k = \sum_{j=0}^{N-1} c_j e^{+2\pi i j k / N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.17)$$

o espectro de potência (periodograma) vai ser definido em $(N/2)+1$ frequências como:

$$P(0) = P(f_0) = \frac{1}{N^2} |C_0|^2 \quad (3.18a)$$

$$P(k) = p(f_k) = \frac{1}{N^2} \left[|C_k|^2 + |C_{N-k}|^2 \right] \quad k = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2}-1\right) \quad (3.18b)$$

$$P(N/2) = p(f_{N/2}) = \frac{1}{N^2} |C_{N/2}|^2 \quad (3.18c)$$

onde f_k é definida somente para frequência positivas e zero:

$$f_k \equiv \frac{k}{N\Delta} = \frac{2f_c k}{N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (3.19)$$

onde $f_c = 1/2\Delta$ e o teorema de Parseval na forma discreta:

$$\sum_{j=0}^{N-1} |c_j|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-2} |C_k|^2 \quad (3.20)$$

foi usado para relacionar a função C_k a c_j .

3.6 SUAVIZAÇÃO DO ESPECTRO

Anteriormente, viu-se que quando se tem uma série temporal com N pontos, tomada em intervalos iguais de tempo (Δ), podemos o espectro de potência para $(N/2)+1$ harmônicos através da Equação 3.18. Os períodos que aparecem neste espectro, não estão igualmente espaçados. Para corrigir este problema, usa-se transformar a escala de período em logarítmica ($\log T$).

Na maioria dos casos o número de harmônicos $(N/2) + 1$ do espectro de potência é muito grande, o que dificulta a visualização dos resultados. Costuma-se, então, suavizar o espectro, dividindo-o em bandas de períodos linearmente espaçados na escala logarítmica.

A suavização do espectro é obtida dividindo o espectro de potência em bandas de frequência. O programa *KANFILT*, através do número de pontos N , do intervalo de amostragem Δ da série temporal, do logaritmo do período máximo e da largura e meia-largura da banda, calcula os parâmetros das bandas de suavização a frequência central, o número do primeiro e último harmônico, e o número de harmônicos em cada banda. Com estes valores, a rotina suaviza do programa *KANFILT* calcula o valor médio da potência de espectro (P_m) para cada banda, ou seja:

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.21)$$

onde P_i são as potências de espectro em cada banda do espectro não suavizado.

4 Micropulsações Geomagnéticas

4.1 Introdução

As micropulsações são flutuações de curto período (usualmente da ordem de segundos a minutos) do campo magnético terrestre. As amplitudes típicas destas flutuações são menores que uma parte em 10^4 do campo principal e têm efeito transitório. A faixa de período na qual se considera as micropulsações esta entre 0,2 segundos e 17 minutos, com amplitudes desde frações ate centenas de nanotesla.

As micropulsações do campo geomagnético observadas no solo e na magnetosfera terrestre devem-se à manifestações de ondas de plasma (hidromagnéticas) de frequência ultra-baixa (ULF) na magnetosfera. As ondas com mais baixa frequência têm comprimento de onda comparáveis ao tamanho da magnetosfera e amplitudes da ordem de centenas de nanotesla. O limite superior do espectro de ondas causadoras de micropulsações e determinado pela frequência ciclotrônica do hidrogênio na magnetosfera, que é tipicamente menor que 10 Hz. Em geral é aceito que as micropulsações geomagnéticas são provocadas pela manifestação de ondas hidromagnéticas geradas por vários processos físicos. A interação do vento solar com o campo magnético da Terra e o principal processo de geração das micropulsações detectadas em toda a magnetosfera, ionosfera e na superfície terrestre. As equações da onda hidromagnéticas são acopladas, mas solucionadas na forma desacoplada, simplificando as equações para as perturbações das linhas de campo na direção radial (chamado de modo poloidal ou compressional) e na direção ao azimutal (modo toroidal ou torsional).

As micropulsações são geralmente observadas em bases terrestres (estações geomagnéticas) e com instrumentos a bordo de satélites. Independente do ponto de observação há vários fatores vinculados, direta ou indiretamente, à interação Sol-Terra, que podem afetar a atividade das micropulsações, tais como: a interação do vento solar que flui com

velocidades instáveis supersônicas (250 - 800 km/s) em relação à magnetosfera, causando pulsos de compressão e rarefação nas linhas do campo da magnetosfera; a duração do ciclo solar e efeitos periódicos como as manchas solares; a localização, em latitude e longitude geomagnética do observatório; a hora e o dia; o estado local da ionosfera; o nível de atividade magnética.

Além da descrição dos fatores que afetam as micropulsações, há também a necessidade de se identificar suas fontes geradoras. A geração de micropulsações dentro da magnetosfera por ondas MHD é assunto relevante, uma vez que um ou mais tipos de micropulsações podem estar associados, por exemplo, a um ou mais tipos dessas ondas, geradas numa certa região e associadas a diversos processos físicos relacionados à interação Sol-Terra.

Dos vários tipos de ondas geradas no plasma magnetosférico, algumas se propagam para a superfície da Terra como ondas eletromagnéticas. As propriedades destas ondas no plasma podem ser investigadas usando-se dados de observações feitas em bases terrestres. No entanto, existem numerosos tipos de ondas geradas localmente e que são podem ser observadas por satélites. Por isso, necessita-se de observações feitas em bases terrestres e por satélites para o estudo das ondas de plasma. Recentemente, têm-se utilizado não são as ondas naturais de plasma, mas também ondas excitadas artificialmente por ondas transmitidas da Terra, ou de naves espaciais, como também, por feixe de elétrons e íons injetados a partir de foguetes de sondagem. Tais métodos são chamados de experimentos ativos.

4.2 Classificação das Micropulsações

Um importante problema na investigação de micropulsações é a descrição e classificação dos tipos de oscilações observadas e as condições sobre as quais elas foram geradas. Dois tipos principais de classificações tem sido mencionadas, a primeira é baseada nas

propriedades morfológicas e mais recentemente, a classificação genética, baseada nos mecanismos de geração das pulsações.

Em 1958, a Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA - International Association of Geomagnetism and Aeronomy"), propôs uma classificação baseada nas características morfológicas das micropulsações. Esta classificação divide as micropulsações em duas classes distintas, a saber: pulsações regulares ou contínuas e pulsações irregulares designadas por Pc e Pi, respectivamente. As Pc são pulsações cujas amplitudes são estáveis ou flutuam regularmente, enquanto que as Pi não mantêm qualquer regularidade. Dentro de cada grupo ou família, as micropulsações são classificadas de acordo com o período ou frequência (Tabela 4.1).

TABELA 4.1 - CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA

Notação	Faixa de Período (s)	Frequência
Pc 1	0,2 - 5	0,2 - 5 Hz
Pc 2	5 - 10	0,1 - 0,2 Hz
Pc 3	10 - 45	22 - 100 m Hz
Pc 4	45 - 150	7 - 22 m Hz
Pc 5	150 - 600	2 - 7 m Hz
Pi 1	1 - 40	0,025 - 1 Hz
PI 2	40 - 150	2-25 mHz

FONTE: Jacobs (1970, p. 17)

O esquema morfológico de classificação vem sendo continuamente modificado e gradualmente esta sendo constituído, com base nos processos físicos de geração, a chamada classificação genética. Recentemente, dividiu as pulsações em três bandas de frequências distintas: baixa-frequência (1 - 10 mHz); média-frequência (10 - 100 mHz) e alta-

freqüência (0,1 - 10 Hz) e dois tipos de pacotes de ondas: contínuas e impulsivas. A Tabela 4.2 mostra o esquema de classificação genética das micropulsações.

TABELA 4.2 - CLASSIFICAÇÃO GENÉTICA

BANDA	CONTÍNUAS	IMPULSIVAS
1-10 mHz	-instab. de deriva de espelho -ressonância "bounce" -instab. Kelvin-Helmholtz	- impulsos súbitos do vento solar - mudança abruptas da convecção na cauda - eventos de transferência de fluxo
10-100 mHz	-instab. Kelvin-Helmholtz do vento solar	- mudança abruptas na cauda magnetosférica -instab. de correntes alinhadas ao campo
0,1-10 Hz	-instab. Próton-ciclotrônica na magnetosfera	-instab. de correntes alinhadas ao campo

FONTE: Samson (1991, p 489)

4.3 Classificação Morfológica

Esta classificação abrange o intervalo inteiro das pulsações com períodos de 0,2 a 600 s (2 - 5 mHz). São divididas em subgrupos dependendo do período.

4.3.1 Pulsações Contínuas Pc1-2 (T=0,2 - 10 s)

As Pc1-2 são pulsações devido a ondas ULF com períodos de 0,2 a 10s geradas pelas instabilidades eletromagnéticas íon-ciclotrônicas (EMIC) próximo ao equador magnético e

por isso são chamadas de ondas íon-ciclotrônicas. A energia para a geração de ondas EMIC provem da anisotropia de temperatura dos prótons magnetosféricos na faixa de 10 - 100 keV. A compressão da magnetosfera pelo vento solar aumenta a anisotropia de íons causando um aumento das EMIC. As instabilidades íon-ciclotrônicas podem ocorrer na corrente de anel (eventos de média e baixa latitude) ou na região da folha de plasma (eventos de alta latitude). As ondas Pc1-2 propagam-se para a ionosfera ao longo das linhas de campo e podem ser observadas também no solo. Dois grupos têm sido identificados nas observações: pulsações estruturadas (também conhecidas como periódicas, ou pulsações de pérolas) e pulsações desestruturadas. As pulsações estruturadas são muitas vezes observadas no setor da manhã.

Observações na magnetosfera e no solo mostraram uma probabilidade de ocorrência máxima em $L = 7 - 9$, indicando que a mais importante fonte de energia para as ondas EMIC são os íons da folha de plasma. Um fraco máximo foi encontrado no setor do amanhecer (03 - 09 MLT). Em altas latitudes estas pulsações não são estruturadas e independem das tempestades. Contudo, estas emissões podem ser moduladas por pulsações Pc4-5. Em latitudes muito altas os eventos observados no solo no setor da manhã têm sido explicados pela injeção de íons na região do "cusp/cleft".

As pulsações em pérolas aparecem como explosões repetitivas de ondas Pc1, formadas por pacotes de ondas propagando-se ao longo das linhas de campo entre pontos conjugados e parcialmente refletidos na ionosfera. Estes pacotes têm-se mostrado em antifase nos hemisférios norte e sul.

4.3.2 Pulsações Contínuas Pc3 ($T=10 - 45s$)

Os pacotes de ondas com períodos na faixa de 10 a 45s são freqüentemente observados do equador para a zona auroral, no lado diurno da magnetosfera. São raramente observadas a

noite e, assim como as Pc1 e Pc2, tendem a se repetir a cada 27 dias de acordo com o ciclo solar. Fluxos quase estacionários das regiões ativas do sol, responsáveis pelas tempestades magnéticas, causam pulsações na faixa de Pc3. O decréscimo na atividade das manchas solares provoca um aumento em seu período. Isto pode ser visto como uma diminuição de sua atividade proporcional à atividade das manchas solares. Em latitudes moderadas, o aumento do período se dá do amanhecer para o anoitecer e em baixas latitudes um período mínimo é encontrado ao meio dia. Quanto à amplitude, as Pc3 mostram cerca de 1 nT em médias latitudes, 0,1 nT para baixas latitudes e as máximas amplitudes ocorrem em torno de $L=4$ por volta do meio-dia.

4.3.2.1 Compressional Pc3

As pulsações diurnas compressionais Pc3 são flutuações do campo de amplitude relativamente baixa (poucos nT) e períodos típicos de 20 - 30 s. Elas são predominantemente polarizadas ao longo das linhas de campo e as ondas magnetosféricas mais fortes ocorrem na plasm pausa por volta ao meio-dia. As observações mostram uma boa correspondência entre as ondas observadas em orbitas síncronas e no solo (em altas e baixas latitudes). Ainda mais importante, estas ondas correlacionam-se muito bem com campo magnético interplanetário (IMF). A correlação com o ângulo de cone do IMF sugere que a fonte das ondas está associada com a região quase paralela da frente de choque. A correlação da frequência das Pc3 compressionais com a magnitude do IMF, $f(\text{Hz}) = 0,006 \times B(\text{nT})$, resulta da interação ressonante onda-partícula entre os prótons refletidos no choque quase paralelo e as partículas do vento solar na região de choque. As ondas compressionais Pc3 são o resultado do modo compressional rápido devido à interação onda-partícula na região de choque que se propaga através da cavidade magnetosférica.

4.3.2.2 Toroidal Pc3

Na magnetosfera diurna, ocorrem múltiplos harmônicos toroidais azimutalmente polarizados de pulsações (ressonância de linhas de campo), comumente acima de 6 harmônicos simultaneamente presentes numa extensa região de L. Devido a maior predominância de harmônicos na faixa de 20 - 40 s elas são chamadas de toroidais Pc3 (contudo, frequências menores também podem ocorrer). Com respeito a ocorrência, elas são similares as ondas compressoriais Pc3 e estão associadas com a geometria de choque quase paralelo. Os dois tipos de Pc3 podem ser pensados como diferentes caminhos de percurso da onda.

As ondas toroidais Pc3 podem ser atribuídas ao acoplamento entre as ondas compressoriais Pc3 e a ressonância das linhas de campo. É também possível que exista influências da ionosfera. As ondas Pc3 podem ter acesso à ionosfera na região do "cusp", onde as flutuações Pc3 também têm sido detectadas devido à precipitação de elétrons na região auroral. Estas flutuações, atribuídas às correntes alinhadas ao campo e associadas com as turbulências típicas da geometria de choque quase paralelo, causam múltiplos harmônicos de pulsações através do acoplamento ionosférico dos sistemas de correntes 1 e 2. As duas estruturas de correntes alinhadas ao campo em larga escala, que conectam a magnetosfera externa à ionosfera auroral, foram denominadas Regiões de Correntes Alinhadas ao Campo 1 e 2. Na região 1, as correntes fluem para a ionosfera no setor do amanhecer e a partir da ionosfera no setor do crepúsculo, enquanto na região 2 fluem no sentido oposto, isto é, a partir da ionosfera no setor do amanhecer e para a ionosfera no setor do crepúsculo. Estas correntes estão quase sempre presentes, exceto durante extensos períodos de baixa atividade geomagnética.

4.3.3 Pulsações Contínuas Pc4 (T=45 - 150s)

As pulsações contínuas com período na faixa de 45 a 150 s são registradas comumente durante o dia, com amplitudes em torno de 5 nT em altas latitudes e máximo em L = 6 no

meridiano do meio dia. Estas pulsações estão na faixa de frequência das ondas de Alfvén torsionais (ideais), que têm natureza transversal. A maioria dos eventos são detectados no espaço entre $L = 8$ e a magnetopausa, sob condições magnéticas calmas, com tendência a se repetirem depois de 27 dias (ciclo solar).

Os principais mecanismos geradores das pulsações Pc4 são os seguintes: excitação de ondas de superfície pela instabilidade Kelvin-Helmholtz na magnetopausa, as flutuações do vento solar, ressonância "bounce" e folhas de corrente transiente magnetosféricas.

As ondas Pc4 poloidais, com períodos próximos a 100 s e as vezes atingindo a faixa das Pc5, são ondas transversais radialmente polarizadas, localizadas próximo ao equador que, no amanhecer podem estender-se latitudinalmente sobre várias horas ($L \sim 6$, ao meio dia e $L \sim 8$ à meia noite). Elas são localmente geradas por íons reinjetados, mas a ocorrência atinge o pico durante períodos mais quietos após as subtempestades magnéticas. O fluxo de íons mostra oscilações na mesma frequência das ondas, com energia dependendo da fase. O fluxo dos íons mostra fase oposta nas direções sul e norte, indicando movimento ressonante de "bounce". Ainda, um atraso de fase no fluxo de partículas entre o lado leste e oeste indica haver uma deriva ou propagação na direção oeste.

A ressonância "bounce" de íons energéticos (150 keV) gera modos de ondas poloidais guiados, com alto número de onda azimutal, no segundo harmônico de ressonância de linhas de campo. Os múltiplos harmônicos de pulsações diurnas, as vezes chamados de ondas toroidais Pc3, atingem ocasionalmente frequências na faixa de Pc4 e Pc5.

4.3.4. Pulsações Contínuas Pc5 (T= 150 - 600s)

As pulsações contínuas com período de 150 a 600 s, na faixa de frequência das ondas magnetossônicas rápidas (ou Alfvén compressionais), apresentam amplitudes típicas de 100

nT e máxima intensidade na zona auroral. Não há qualquer evidência quanto a ocorrência periódica depois de 27 dias, porém o decréscimo na atividade das manchas solares registra um decréscimo no período das pulsações, sendo o mais curto observado durante o amanhecer.

4.3.4.1 Compressional Pc5

As ondas compressivas Pc5 são encontradas próximo aos flancos do lado noturno da magnetosfera, com pico dominante ocorrendo além de $L = 8$. A perturbação compressiva (ao longo das linhas de campo) é muitas vezes acompanhada por perturbações radiais com grandes amplitudes de oscilação e períodos de 5 a 15 minutos. Estas ondas são localmente geradas pelas ondas de deriva de espelho causadas por anisotropias de pressão de plasma, que ocorrem próximas ao equador magnético.

As pulsações compressivas Pc5 do amanhecer e anoitecer ocorrem sob diferentes condições geofísicas de períodos calmos. Enquanto os eventos do lado noturno ocorrem durante o aumento da corrente de anel, com alto índice Ae e intenso IMF na direção sul, os eventos do lado do amanhecer ocorrem para baixos índices Dst (fraca corrente de anel), com baixo Ae e IMF na direção norte. As ondas do lado do anoitecer propagam-se para o oeste, com velocidades comparáveis às velocidades de deriva de prótons energéticos (10 - 30 keV). As ondas do lado do amanhecer propagam-se para o leste devido à direção de deriva: no plasma de fundo ("rest frame") elas se propagam para o oeste.

4.3.4.2 Toroidal Pc5

As pulsações toroidais Pc5 têm polarização azimutal e são modos toroidais de ressonância de linhas de campo com nó no equador magnético. Elas são consideradas como um fenômeno separado dos múltiplos harmônicos (citadas nas pulsações Pc3) devido à

diferença de distribuição de ocorrência: as toroidais Pc5 são encontradas proêmio aos flancos da magnetosfera no amanhecer e anoitecer (observadas no solo) ou somente no amanhecer (observadas por satélites). Contudo, devido a taxa de ocorrência aumentar monotonicamente com L, a fonte de energia destas ondas deve estar próxima à magnetopausa. Algumas medidas mostram que estas ondas se propagam na direção antisolar nos flancos, produzindo movimentos ondulatórios na magnetopausa. As teorias sugeridas para explicar estas ondas são:

1) geração de ondas superficiais por instabilidades Kelvin-Helmholtz na magnetopausa, quando o plasma da bainha magnética ("magnetosheath") flui com velocidade que excede do plasma na magnetopausa;

2) geração de ondas superficiais na magnetopausa devido aos pulsos de pressão do vento solar na bainha magnética. Os pulsos de pressão do vento solar podem produzir ondas Alfvén compressionais (modo rápido). Estes modos podem acoplar-se ou converter-se em onda de cisalhamento Alfvén no ponto onde a frequência da onda compressional une-se às autofrequências do modo de cisalhamento das linhas de campo;

3) as anomalias magnéticas localizadas, tal como os processos de eventos de transferência de fluxo ou reconexões intermitentes, podem estar associados com ondas na magnetopausa.

Os eventos mais fortes de pulsações toroidais Pc5 foram observadas durante períodos com altas velocidades médias do vento solar. Nas medidas no solo, as pulsações toroidais Pc5 mostram uma rotação de 90^\pm (contra os ponteiros do relógio) devido às modificações na ionosfera. A injeção noturna de elétrons também tem efeitos sobre as ondas Pc5.

4.4 Micropulsações Irregulares

Esta classe de micropulsações é caracterizada por sua forma irregular. Elas têm conexão com os distúrbios do campo geomagnético e estão correlacionadas com os distúrbios da magnetosfera superior. Esta classe é dividida em dois grupos:

4.4.1 Pulsações Irregulares Pi1

As Pi1 têm formas irregulares com períodos de 1 a 40 s. Suas amplitudes têm valores máximos nas zonas aurorais e sua intensidade decresce rapidamente com a latitude. As Pi1 têm forma de microestruturas devido a distúrbios lentos do campo magnético, observados durante a fase principal das tempestades magnéticas.

A ocorrência das Pi1 mostra uma dependência distinta com o índice K_p , aumentando com o aumento do K_p . Algumas vezes, as Pc1 e Pi1 são registradas simultaneamente com distúrbios lentos e, também, como distúrbios de campos independentes. As pulsações que aparecem na forma de série de oscilações, cada uma durando cerca de 10 a 20 minutos tendo o fenômeno toda uma duração de cerca de uma hora, são sempre acompanhadas por perturbações de outros tipos Pi1, ou ambas, Pi1 e Pc1.

As pulsações Pi podem ser divididas em dois grupos, as pulsações semelhantes às explosões de ruído PiB e de pulsos contínuos PiC (as PiB também estendem-se para as baixas frequências Pi2).

4.4.2 Pulsações Irregulares Pi2

As Pi2 possuem formas irregulares com períodos localizados num intervalo de 40 - 150 s, podendo apresentar períodos acima de 250 s e amplitudes de 1 a 5 nT. As Pi2 têm como

característica principal o seu pequeno tempo de duração e a sua superposição com as Pi1, as quais podem ser seguidas, em certas ocasiões, pelas Pc1.

A probabilidade de ocorrência das Pi2 aumenta com o aumento do índice Kp. Para um mesmo intervalo de tempo, a ocorrência das Pi1 aumentam com o número de manchas solares, sugerindo que as Pi1 e Pi2 têm diferentes fontes de geração ou que tem diferentes modos de propagação.

4.5 Outras Formas de Atividades Pi

Outros tipos de pulsação podem ser observadas, particularmente durante períodos de tempestades, com menos regularidade em aparência que as emissões contínuas, porém são mais regulares que as explosões de ruído (Pi1). Estas emissões ocorrem durante períodos magneticamente perturbados e, muitas vezes, estão associadas às baias magnéticas.

Diferentes tipos de Pi são distinguidos, na faixa de frequência de 0,1 a 3 Hz, sendo as mais importantes: SIP (pulsação irregular curta); IPDP (pulsação irregular de período diminuído); IPIP (pulsação irregular de período aumentado). Os eventos de intervalos de pulsações de período diminuído (IPDP) estão relacionadas às instabilidades próximas a região de corrente de anel. A fonte de íons da corrente de anel depende fortemente da atividade geomagnética e as IPDP ocorrem durante a fase ativa das subtempestades.

4.6 Classificação Genética

4.6.1 Pulsações de Baixa Frequência (1 - 10 mHz)

As pulsações geomagnéticas na banda de baixa frequência são ondas de plasma com comprimentos de onda comparáveis às dimensões da magnetosfera. As pulsações de baixa

freqüência tendem a ter amplitudes máximas nas zonas auroras. As regiões de máxima intensidade ocorrem principalmente na oval auroral, exceto próximo ao meio dia local onde os picos de amplitude podem ser ligeiramente deslocados na direção dos pólos em relação a media do oval auroral. Em medias latitudes não são evidentes e podem ocorrer com igual probabilidade na maior parte do dia.

4.6.2 Pulsações de Média Freqüência (10 - 100 mHz)

A maioria das ondas de plasma, na banda de freqüência media, são geradas pelo vento solar na magnetopausa, ou originadas por instabilidades íon-ciclotrônicas na região de fluxo contrário "upstream" ao vento solar. As ondas de plasma geradas por estas instabilidades são convectadas para baixo, na direção da curva de choque e se acoplam à magnetopausa propagando-se para o seu interior. Elas são mais freqüentes no lado diurno e têm amplitudes desde frações a vários nanotesla na superfície da Terra. A freqüência das pulsações diárias nesta banda é regulada pela intensidade do IMF. Contudo, a freqüência dessas pulsações pode ser influenciada pela orientação do IMF e pela velocidade do vento solar

4.6.3 Pulsações de Alta Freqüência (0,1 - 10 Hz)

As pulsações na banda de alta freqüência (0,1 - 10 Hz) inclui as classes Pc1 e Pc2. Na superfície da Terra, as amplitudes máximas destas pulsações são tipicamente de 0,1 - 10 nT nas zonas auroras, com amplitudes menores no equador. Registros obtidos no solo mostram dois grupos distintos: um grupo de pulsações com amplitudes periodicamente moduladas e outro que mostram mudança graduais e algumas por acaso. As pulsações do primeiro grupo são as chamadas pérolas, devido a similaridade entre a aparência de suas séries temporais e um cordão de pérolas. Por outro lado, as pulsações do segundo grupo são

pulsações desestruturadas, devido a falta de qualquer periodicidade na modulação e na amplitude.

A maior parte das teorias para a origem das pulsções de 0,1 - 10 Hz na magnetosfera baseia-se na instabilidade próton-ciclotrônica do modo L. A fonte de energia para a instabilidade é proveniente de uma distribuição energética (maior que 10 keV) anisotrópica de prótons. Uma das principais fontes de íons energéticos e anisotrópicos são as partículas injetadas na cauda magnética durante a fase

5 Auroras Polares

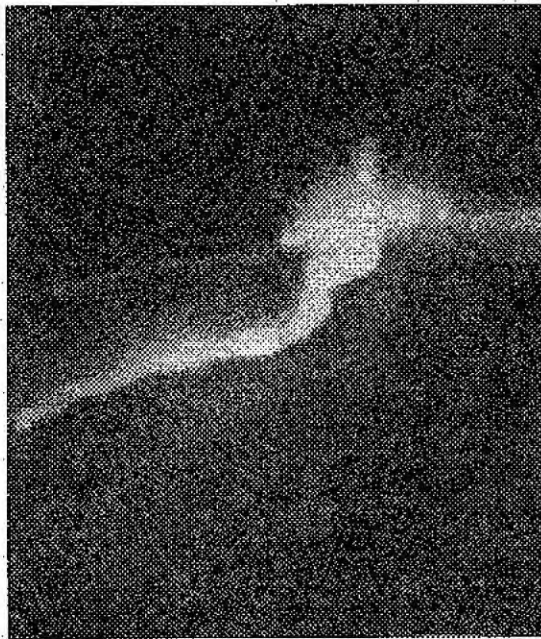
As auroras polares aparecem como fenômeno luminoso, silencioso e impressionante, no céu noturno das latitudes elevadas boreais ou austrais (Figura 7). Muitas vezes aparecem como um fraco arco verde esbranquiçado, mas outras como cortina comprida, ondulante e tremulante, com bandas e raios brilhantes com diversas colorações. A intensidade da luz nas auroras é variável.



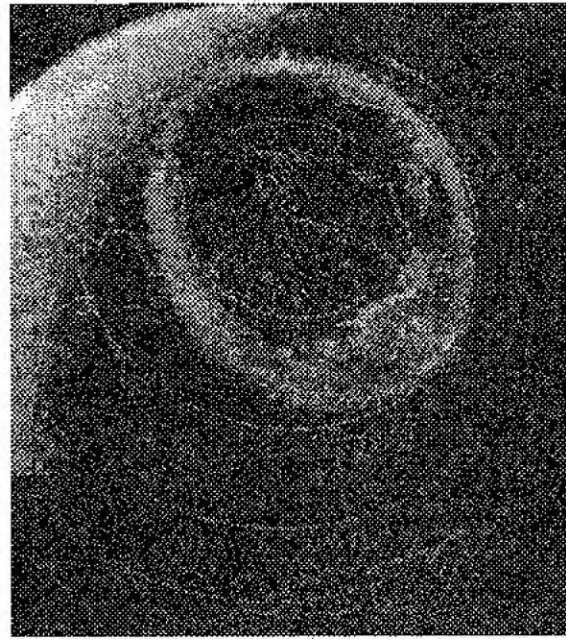
Figura 7 - A aurora boreal

Quando está muito brilhante, as cores são impressionante e muito bonitas. A borda inferior da cortina das auroras está numa altitudes de uns 100 km e a borda superior pode chegar a 1.000km acima da superfície da terra, entre duas zonas anulares do globo, limitados pelos paralelos de 60 e 75° de latitude, ao norte e ao sul (Figura 8a e 8b), cada qual centrada nos pólos magnéticos da terra. Estes cinturões, anulares ovalados são denominados os ovais das auroras.

A luz da aurora polar já foi considerada como luz solar refletida por cristais de gelo no céu. Em 1988, porém, Anders Jonas Ångström mostrou que a luz das auroras diferia da luz solar; muitos comprimentos de onda, presente na luz do sol, estão ausentes na luz das auroras. Pode-se conseguir um espectro análogo ao da luz da aurora num tubo de vidro, contendo um gás como neônio, a baixa pressão, e a que se aplica uma voltagem nos eletrodos do tubo. Os elétrons no gás passam do eletrodo negativo para o positivo. Colidem



(a)



(b)

Figura 8

(a) Aurora austral, fotografada pelo astronauta Robert Overmyer e com máquina de 35 mm.

(b) Imagem da aurora boreal, trabalhada em computador, tomado por um satélite, à distância de 3 raios terrestres.

com os átomos de neônio, excitam-nos e provocam ao cabo, a emissão de luz. Analogamente, a luz das auroras é emitida por átomos e moléculas na atmosfera superior (*Figura 9*) ao serem excitadas por elétrons com velocidade elevada.

Para se entender o processo que se alimenta a descarga de uma aurora, é útil considerar uma analogia com um gerador elétrico. Num gerador, uma corrente é induzida num

condutor que gira num campo magnético. A energia da aurora é gerada da mesma forma: uma corrente de partículas que provêm do sol (é chamado de vento solar) opera como um condutor, e a própria Terra proporciona o campo magnético (*Figura 10*).

A camada externa da atmosfera solar, a corona, é constituída por gás (principalmente hidrogênio) tão quente que os átomos neutros se dissociam em íons positivos (principalmente prótons) e elétrons. O vento solar, que flui da corona, é um plasma quente, ténue constituído por estas partículas carregadas. Com uma velocidade entre 300 e 1.000Km/s as partículas se espalham em todas as direções, até os limites do vento solar comportam-se como se fosse fios elásticos. Quando o vento solar sopra do sol, arrasta consigo as linhas do campo magnético solar e as tensiona. Nas sua trajetórias confinam o campo magnético como a forma de uma cauda cometária, que é a magnetosfera. (*Figura 11*) O limite externo desta cavidade é a magnetopausa.

A distancia da ordem de 10 raios da terra, medidos da superfície do nosso planeta, o campo magnético da terra ($30 \times 10^{-5} \text{G}$) é igual ao campo magnético arrastado do Sol. Os dois campos magnéticos se acoplam na fronteira da magnetosfera, com a sua forma cometaria. Nesta região, as partículas carregadas do vento solar incidem sobre a região de acoplagem. Este movimento é equivalente ao de um condutor elétrico através de um campo magnético. Olhando para a terra, do sol, os prótons do vento solar são desviados (pela força $e \times v \times B$) para esquerda e os elétrons desviados para a direita, criando assim os terminais positivo e negativo do gerador da aurora (*Figura 12b*). A magnetosfera está cheia por um plasma muito pouco denso. O que permite que haja corrente entre os terminais. A corrente flui do terminal positivo, enrolando-se nas linhas do campo magnético, para baixo penetrando na ionosfera (a camada eletricamente condutora da atmosfera), atravessa a ionosfera na região polar e, espiralando em torno das linhas do campo magnético, para cima, retorna da ionosfera para o terminal negativo. Este é o circuito primário da descarga elétrica.

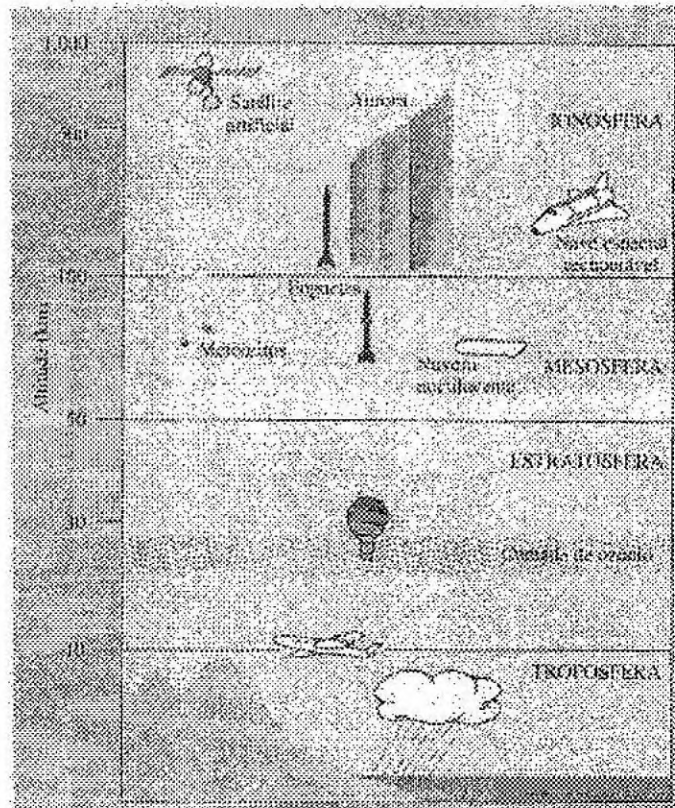


Figura 9 - Representação esquemática da atmosfera da Terra, com as alturas de alguns acidentes artificiais e naturais. As auroras se formam na ionosfera, ou acima dela, que é a camada da atmosfera que contém muitos elétrons e íons livres, formados pelos efeitos das emissões solares de ultravioleta e raio X.

No que se denomina o “lado matutino” da magnetosfera, a corrente entra na borda interna do oval das auroras, como parte do circuito primário de descarga e é conduzida para a borda externa do oval. Uma vez que a região fora do oval não é muito condutora, parte da corrente retorna ao longo das linhas do campo magnético, proporcionando um circuito secundário. Um processo correspondente ocorre no “lado vespertino” do oval(Figura 12a)

Então, há um par de corrente elétrica (para cima e para baixo) que fluem em torno das linhas do campo magnético nos dois lados, no matutino e no vespertino da magnetosfera. A corrente para cima, nos dois setores, é proveniente de um fluxo de

elétrons para baixo, que colidem com os átomos e moléculas da atmosfera, excitando-os e provocando a emissão de luz. Esta é a luz das auroras(exatamente como no tubo de neônio que foi mencionado atrás)

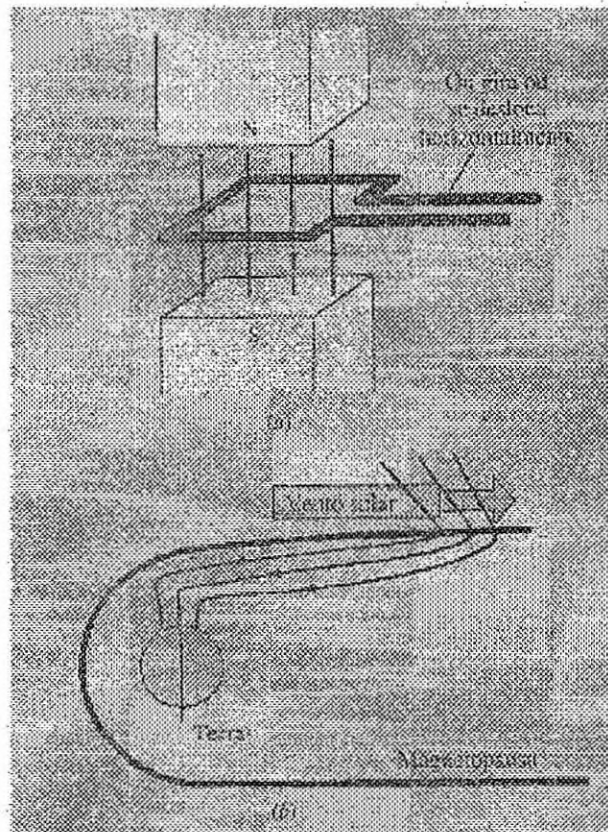


Figura 10 (a) Esquema de um gerador convencional. (b) A interação do vento solar com o campo magnético da terra origina um gerador natural

Qual a base para a forma em cortina das auroras? Acredita-se que esteja relacionada com as formas de escoamento do elétrons, ao modo de lâminas muito delgadas, na atmosfera superior; o mecanismo de formação desta lâminas delgadas ainda não é conhecido. O limite inferior da cortina da aurora é determinado pela profundidade de penetração dos elétrons responsáveis pela corrente. A colisão com os átomos e com os as moléculas na atmosfera superior esgotam bastante a energia dos elétrons ao atingirem uma altura na ordem de 100Km acima da superfície da terra, pouco têm energia para descerem ainda mais.

Dois fatores explicam as variações das auroras. Primeiro, a cor de uma descarga em gás varia de gás para gás e também com energia dos elétrons que provocam a excitação. Depois, a composição química da atmosfera varia com altitude. Este fatores, em conjunto, explicam as variações da coloração das auroras. Na ionosfera, a atmosfera é constituída, principalmente, de oxigênio atômico, que se forma quando a radiação ultravioleta do sol

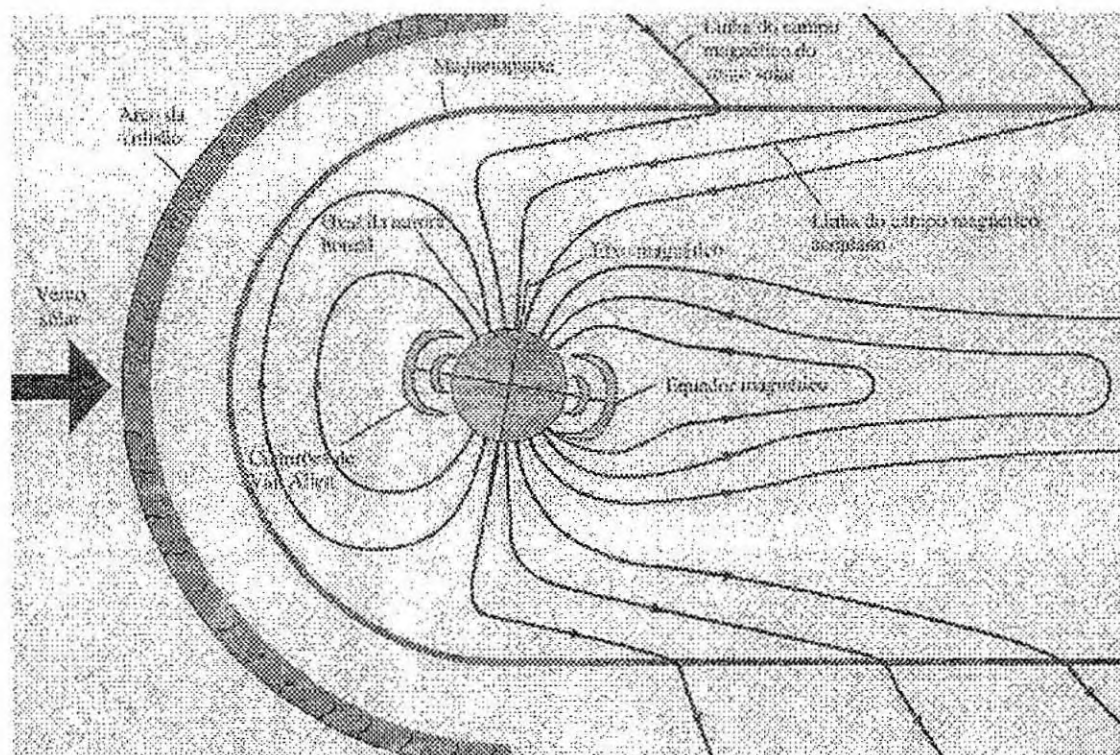


Figura 11 - A magnetosfera da Terra. O vento solar confina o campo magnético da terra numa zona com a forma de uma cauda cometária que tem o nosso planeta como núcleo. A distância entre a terra e a fronteira da magnetosfera, voltada para o sol, é cerca de 10 raios terrestre. A magnetosfera estende-se numa cauda muito comprida (que não aparece na figura) que vai até mais de 1.000 raios terrestre na região oposta ao sol (para a direita, na ilustração).

decompõe as moléculas de O_2 . Quando os átomos de oxigênio são excitados, a luz que emitem é verde esbranquiçada (que é a cor mais comum das auroras). Os elétrons mais enérgicos penetram mais fundo na atmosfera e colidem com as moléculas neutras de

nitrogênio, provocando auroras com bordas vermelho-violeta, ou rosadas, onduladas. As moléculas do nitrogênio ionizado emitem luz azul-violeta. A luz visível é apenas pequena parcela das emissões aurorais. Também são emitidos raios X, radiação ultravioleta e radiação infravermelha.

A fim de entender os movimentos observados na maioria das auroras polares, consideremos uma analogia com a imagem produzida na tela de um tubo de raios catódicos, num tubo de televisão, por exemplo. A tela corresponde à atmosfera superior. O revestimento da tela emite luz quando o feixe de elétrons do canhão eletrônico o atinge; esta luz é a que se vê, como a imagem, na face frontal da tela. Analogamente, como se acabou de descrever, a ionosfera fluoresce quando é atingida pelas correntes laminares dos elétrons. Da mesma forma que o ponto de impacto do feixe de elétrons sobre a tela pode se alterar, provocando o movimento da imagem na tela, a corrente laminar dos elétrons das auroras também pode ter rápidos deslocamentos, o que provoca a movimentação, às vezes violenta, das cortinas das auroras polares. No caso do tubo de raios catódicos e também no das auroras polares, as variações do campo magnético, ou do campo elétrico, ou de ambos os campos, modulam o comportamento do feixe de elétrons. Assim, são as variações do campo magnético, e não movimentos atmosféricos, que provocam o movimento das cortinas das auroras polares.

Uma grande usina geradora de energia produz cerca de 1.000 MW, em base contínua. A aurora polar gera cerca de 1 a 10 milhões de MW (1 a 10 TW), equivalentes a 1.000 até 10.000 grandes usinas. Esta potência, originada pela interação do vento solar com a magnetosfera da terra, flutua, às vezes consideravelmente, em virtude das variações do vento solar e do seu campo magnético, condicionadas pelo nível da atividade do sol. Uma protuberância solar, está associada a um vento solar "tempestuoso", irradiado rapidamente pelo espaço interplanetário e que atinge a terra depois de 40 horas. Quando este vento solar "tempestuoso" interage com a magnetosfera, a potência pode ser multiplicada por mil. Nestas circunstâncias, os cinturões anulares das auroras polares se expandem na direção do equador fazendo com que sejam observáveis auroras polares ao sul da fronteira entre o Canadá e os Estados Unidos. Depois de uma erupção solar, as

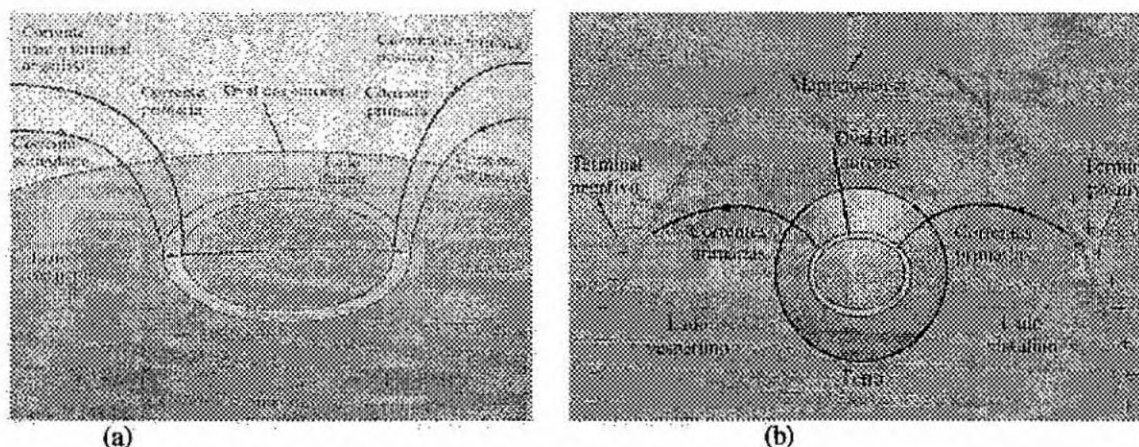


Figura 12 (a) O circuito primário e o circuito secundário de descarga. A corrente através da calota polar, e ao longo do oval das auroras, depende da condutividade da atmosfera. (b) Visão da magnetosfera e da terra, de um ponto acima do pólo. Aparecem os terminais positivos e negativo (os lados matutino e vespertino da magnetopausa, respectivamente), e também as correntes primárias.

auroras polares são muito mais brilhantes do que usualmente, e o topo da cortina se estende a altitudes maiores, algumas vezes a possibilitando a visão da aurora boreal tão ao sul quanto no México ou na Europa Central.

As correntes da descarga elétrica associadas a um vento solar intenso provocam campos magnéticos muito variáveis. Quando estes campos são registrados, verifica-se que está em andamento uma tempestade magnética. As correntes elétricas aquecem atmosfera superior, provocando correntes ascendentes na atmosfera inferior, mais densa, aumentando assim a densidade nas altitudes elevadas. Com isto, aumenta o atrito entre os satélites artificiais em órbita e a atmosfera, o que provoca a diminuição, das alturas orbitais. Já se observaram satélites que saíram das respectivas órbitas depois de grandes tempestades magnéticas.

Nos dias de hoje temos um entendimento parcial sobre as auroras polares: a origem dos cinturões anulares em torno dos pólos geomagnético; os processos que alimentam as gigantescas descargas elétricas que provocam as auroras; a potência gerada durante uma aurora; as razões das flutuação da potência e da relação entre a

atividade das auroras polares e a atividade do sol, manifestada por diversos processos transientes no sol, incluindo-se as erupções solares. Quando o século XX está prestes a se encerrar, o nosso desafio é o de fazer avançar o entendimento deste processo elétrico, subjacente a um bonito fenômeno, que constitui um gerador elétrico natural.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chernsky, E. J.; Fougere, P. F.; Hutchinson, R. O. The geomagnetic Field In: Valley, S.L ed **Handbook of Geophysics and Space Environment**. Cambridge: Air Force Cambridge Research Laboratories, 1965, cap.11, pag. 11-1 – 11-61.

Chernosky, E. J.; Maple, E Geomagnetism. In: **Handbook of Geophysics**. Rev ed New York, Macmillan, 1961. cap. 10, pag. 10-1 – 10-7.

Clark Jr., S.P **Estrutura da Terra**. São Paulo, Edgard Blucher, EDUSP, 1973. (serie de textos Básicos de Geociência)

Dungey, J. W., **Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones**, Phys. Rev Lett., 6:47, 1991.

Kirchhoff, V. W. J. H., **Introdução à Geofísica Espacial**, Nova Stella, EDUSP, São Paulo, 1991.

Jursa, A. S. (ed) **Handbook of Geophysics and The Space Environment** (chapters 10), Air Force Geophysics Laboratory, Air Force System Command, U. S. Air Force, Springfield, Virginia, 1985

Langel, R. A. International Geomagnetic Reference Field, The Sixth Generation. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**. V. 44, n.º. 9, pag. 679-707, 1992.

Langel, R. A The Main Field, In: Jacobs, J A ed **Geomagnetism**. London: Academic Press, 1987. V 1, cap.4, pag. 249-492.

Forbes, A. J. General Instrumentation In: Jacobs, J A ed **Geomagnetism**. London: Academic Press, 1987. V 1, cap. 2, pag. 51-136.

Malin, S. Historical Introduction to Geomagnetism In: Jacobs, J A ed **Geomagnetism** London: Academic Press, 1987. V. 1, cap.1, pag. 01-49.

Press, N. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T. **Numerical Recipes**. Cambridge, Cambridge University Press, 1986.

Tipler, A.P, **Física para cientista e engenheiro**, ed. LTC, 1991. V. 3, cap 26

Trivedi, N. B.; Ogura, F. X. K.; de Andrade, J. C.; da Costa, J. M.; Barreto, L. M. **A ring core fluxgate magnetometer for IEEY program in Brazil**. Revista Brasileira de Geofísica, 13(1): pag. 37-43,1995.

Zanandrea, A, **Micropulsões geomagnéticas em Santa Maria - RS**, Dissertação de Mestrado, São José dos Campos, SP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1994.

Zanandrea, A, **Estudo Micropulsões Geomagnéticas PC3-5 Em Latitudes Baixas, no Brasil**, Tese de Doutorado, São José dos Campos, SP, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1999.