



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**A FÍSICA DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS:
ORIGEM E MECANISMOS**

*Marcelo Henrique Gonçalves do Nascimento
Odin Mendes Júnior
Reinaldo Roberto Rosa*

**INPE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
2007**

RESUMO

Uma tempestade geomagnética é definida como um decréscimo extraordinário na componente horizontal do campo geomagnético em baixas e médias latitudes formando uma depressão que é seguida logo após por seu decaimento. Esse trabalho apresenta a origem e os mecanismos responsáveis por esse fenômeno. Eles residem no complexo acoplamento sol-meio interplanetário-magnetosfera que fornece a condição necessária (uma das quais é a componente norte-sul do campo magnético interplanetário orientada para sul) para sua ocorrência. Além disso, há também um acoplamento magnetosfera-ionosfera que resulta na energização da corrente de anel durante intensas atividades de sub-tempestades. A corrente de anel intensificada gera um campo magnético cujo sentido é oposto daquele do campo geomagnético, e isso explica a depressão encontrada no índice *Dst*.

THE PHYSICS OF GEOMAGNETIC STORMS: ORIGIN AND MECHANISMS

ABSTRACT

A geomagnetic storm is defined as an extraordinary decrease in the magnitude of the horizontal component of the geomagnetic field in low and mid latitudes forming a depression followed subsequently by its decay. This work presents the origin and mechanisms responsible for this phenomenon. They reside in the intricate solar-interplanetary-magnetospheric coupling that provides the necessary condition (one of which is the north-south component of the interplanetary magnetic field oriented towards south) for its occurrence. In addition, there is also a magnetospheric-ionospheric coupling that results in the energization of the ring current during intense substorm activities. The enhanced ring current generates a magnetic field whose orientation is opposite to that of the geomagnetic field, and this explains the depression found in the *Dst* index.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2 TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA..... | 11 |
| 2.1- Origem Interplanetária das Tempestades Geomagnéticas..... | 13 |
| 2.2- Sistemas de Correntes na Magnetosfera Terrestre Associados a Tempestades e Sub-tempestades Geomagnéticas..... | 23 |
| 2.2.1- A Corrente de Anel..... | 24 |
| 2.2.2- Correntes Alinhadas ao Campo ou Correntes de <i>Birkeland</i> | 25 |
| 3 FASES DE UMA SUB-TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA..... | 28 |
| 4 QUAIS MECANISMOS FÍSICOS EXPLICAM AS FASES DE UMA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA ?..... | 29 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 30 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 31 |

LISTA DE FIGURAS

| | | <u>Pág.</u> |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 2.1 | Evolução temporal do índice <i>Dst</i> durante a tempestade geomagnética ocorrida de 18 a 20 de Setembro de 1984. As fases inicial, principal e de recuperação estão representadas aproximadamente pelas faixas verticais..... | 12 |
| 2.2 | Dados do plasma e do campo magnético correspondentes a 35 dias da missão <i>Mariner 5</i> . Usaram-se médias de 3 horas para dados do campo magnético <i>B</i> , medido em gama; da densidade numérica dos prótons <i>N</i> , cm^{-3} ; da componente radial da velocidade de fluxo dos prótons, V_{sw} , <i>km/s</i> ; e da velocidade térmica mais provável dos prótons V_T , <i>km/s</i> . As ondas de <i>Alfvén</i> que se propagam para longe do Sol são encontradas nos feixes de alta velocidade e em suas bordas posteriores (linhas vermelhas), ao passo que as ondas de <i>Alfvén</i> de grandes amplitudes são encontradas nas bordas anteriores dos feixes de alta velocidade (linhas azuis)..... | 14 |
| 2.3 | Características básicas de um feixe corrotante. Faixa azul-escuro nos perfis temporais das quantidades <i>B</i> (magnitude do campo magnético), V_{sw} (velocidade de fluxo do vento solar), <i>n</i> (densidade numérica) e <i>T</i> (temperatura) representa a região densa, fria e de baixa velocidade; a faixa vermelha é a região de densidade um pouco menor, mais quente; as porções dos perfis temporais mais à direita caracteriza a região de rarefação..... | 15 |
| 2.4 | (a) Estrutura de um <i>Helmet Streamer</i> ; (b) Estrutura de uma CME associada à proeminência..... | 17 |
| 2.5 | CME interplanetária e drapejamento do campo magnético..... | 19 |
| 2.6 | (a) Nuvem magnética precedida por choque; (b) Topologia do campo magnético para a nuvem do item (a)..... | 20 |
| 2.7 | Interação entre uma nuvem magnética e a magnetosfera terrestre. A entrada de matéria, momento linear e energia para dentro da magnetosfera ocorre através do processo de reconexão magnética no lado diurno da magnetosfera. No lado noturno, a reconexão magnética gera um fluxo de plasma em direção à Terra o que produz um campo elétrico de convecção. A reconexão magnética ocorre graças à existência de uma resistividade elétrica anômala, nas regiões cinzas, o que permite a difusão das linhas magnéticas ao longo do tempo. A equação da indução mostra o termo de difusão que se torna importante quando a resistividade elétrica é não-nula..... | 22 |

| | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.8 | Combinação de figuras que ilustram o acoplamento cauda magnética-ionosfera via correntes de <i>Birkeland</i> (central) e a distribuição latitudinal e temporal destas correntes em períodos magneticamente calmos (A) e perturbados (B, C e D) e as fases de expansiva (C) e de recuperação de uma sub-tempestade (D)..... | 26 |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

1 INTRODUÇÃO

A origem e os mecanismos das tempestades geomagnéticas devem ser antecidos, como ocorreu na prática, pela observação e descrição do fenômeno, conforme à metodologia científica. Didaticamente, proceder-se-á da mesma maneira, porém com a observação direta cedendo lugar às definições acompanhadas das descrições pertinentes. É preciso salientar que no atual estágio de desenvolvimento do conhecimento sobre as tempestades geomagnéticas deve-se levar em consideração a inter-relação destas com as sub-tempestades.

2 TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA

Tempestade geomagnética é a variação intensa, a nível global, da componente horizontal H do magnético em baixas e médias latitudes sendo acompanhada, também, por intensificação no brilho das auroras. A variação no campo magnético consiste de um aumento rápido e de curta duração, da ordem de alguns minutos aproximadamente, chamado *início súbito*; este é seguido pelo campo magnético que persiste aumentado por várias horas (*fase inicial*) até que a magnitude do campo magnético inicie um decaimento que pode ser mais suave ou mais abrupto até atingir um valor mínimo (*fase principal*); após isso, o campo magnético aumenta lentamente até retornar a valores típicos do período calmo, o que pode levar vários dias (*fase de recuperação*).

A descrição supramencionada é o comportamento clássico de uma tempestade geomagnética que pode ser ilustrado pelo índice Dst (*Disturbance storm time*) obtido a partir dos valores médios da componente H calculados por estações distribuídas longitudinalmente. O índice Dst é uma medida da intensidade da tempestade. A Figura 2.1 mostra o gráfico do índice Dst referente a uma tempestade geomagnética ocorrida entre 18

e 20 de setembro de 1984 (LUI et al., 1987). A fase principal da tempestade corresponde, aproximadamente, à faixa em azul. Para esta tempestade geomagnética não foi relatada a ocorrência de início súbito.

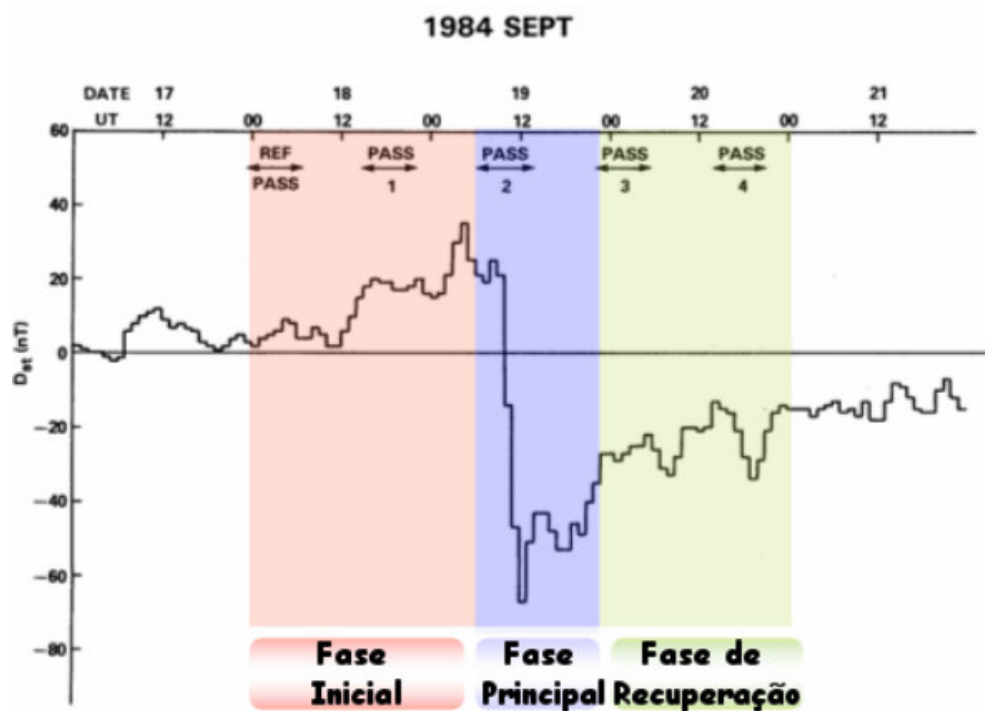


Figura 2.1- Evolução temporal do índice Dst durante a tempestade geomagnética ocorrida de 18 a 20 de Setembro de 1984. As fases inicial, principal e de recuperação estão representadas aproximadamente pelas faixas verticais.

Fonte: Adaptada de *Lui et al.* (1987).

Nesta parte inicial, procurou-se dar uma noção da tempestade geomagnética na condição de fenômeno observado sem a preocupação de se saber quais mecanismos físicos estão por trás do início súbito e das fases subsequentes do fenômeno.

2.1 Origem Interplanetária das Tempestades Geomagnéticas

Esta subseção é dedicada ao estudo da origem interplanetária das tempestades geomagnéticas. Sabe-se que o vento solar é constituído por feixes de plasma de alta velocidade, que corrotacionam com o Sol, e procedentes dos buracos coronais e por feixes de baixa velocidade provenientes dos *streamers* coronais situados acima de regiões ativas. A maneira pela qual estes feixes interagem no meio interplanetário é exemplificada pela Figura 2.2, extraída de *Belcher e Davis* (1971), que traz séries temporais obtidas dos dados coletados ao longo de 35 dias pela espaçonave *Mariner 5* em 1967. Essas séries temporais representam a velocidade térmica mais provável dos prótons do vento solar, V_T , a velocidade de fluxo do vento solar, V_{SW} , a densidade numérica dos prótons, N , e a magnitude do campo magnético, B .

As faixas vermelhas representam regiões de alta velocidade no vento solar caracterizadas por serem quentes e de baixa densidade, enquanto as regiões de baixa velocidade, faixa amarela, por exemplo, são aquelas mais frias e densas. A faixa vermelho-escura, à esquerda, mostra a estrutura de um feixe rápido cujas bordas anterior (*leading edge*) e posterior (*trailing edge*) estão bem definidas, ou seja, a borda anterior (faixa azul-escura) mostra um rápido aumento da velocidade, V_{sw} , num curto intervalo de tempo e onde se verifica intenso campo magnético. Essa região marca o encontro do feixe rápido com o vento solar mais lento que está a sua frente (início do dia 225) ocorrendo a colisão entre os dois plasmas resultando na compressão e aquecimento local do plasma, representados por aumentos de densidade e intensidade do campo magnético, bem como aumento da velocidade térmica dos prótons. Ainda nessa região há a presença de flutuações *alfvênicas* de grande amplitude. A borda posterior, por sua vez, é a região na qual a velocidade do vento solar decresce lentamente com o tempo. É o local onde são encontradas ondas de *Alfvén* que se propagam para longe do Sol.

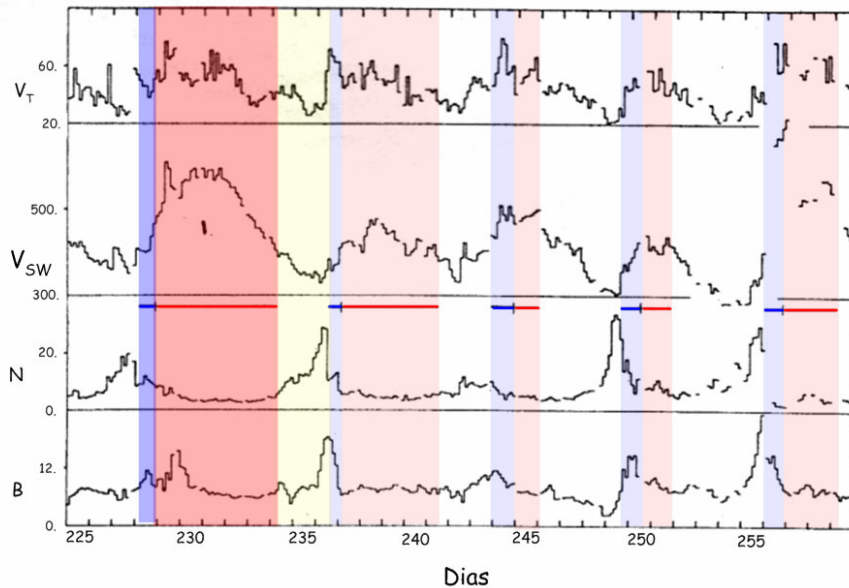


Figura 2.2- Dados do plasma e do campo magnético correspondentes a 35 dias da missão *Mariner 5*. Usaram-se médias de 3 horas para dados do campo magnético B , medido em gama; da densidade numérica dos prótons N , cm^{-3} ; da componente radial da velocidade de fluxo dos prótons, V_{sw} , km/s ; e da velocidade térmica mais provável dos prótons V_T , km/s . As ondas de *Alfvén* que se propagam para longe do Sol são encontradas nos feixes de alta velocidade e em suas bordas posteriores (linhas vermelhas), ao passo que as ondas de *Alfvén* de grandes amplitudes são encontradas nas bordas anteriores dos feixes de alta velocidade (linhas azuis).

Fonte: Adaptada de *Belcher e Davis (1971)*.

A Figura 2.3 dá uma idéia de como a interação descrita acima pode ser visualizada. Ela ilustra as características básicas de um feixe corrotante. No canto inferior direito, há as séries temporais da magnitude do campo magnético, B , da velocidade de fluxo do vento solar, V_{sw} , da densidade numérica, n , e da temperatura, T , em ordem descendente,

respectivamente. Os perfis foram acrescentados à figura com o objetivo de torná-la mais compreensível.

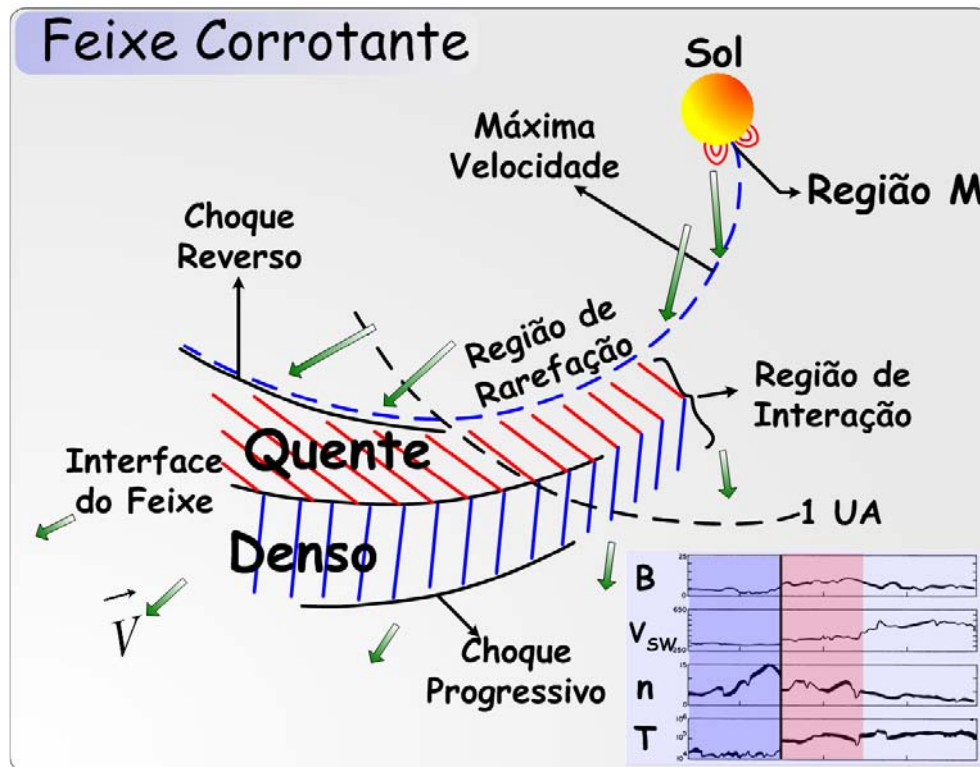


Figura 2.3- Características básicas de um feixe corrotante. Faixa azul-escuro nos perfis temporais das quantidades B (magnitude do campo magnético), V_{sw} (velocidade de fluxo do vento solar), n (densidade numérica) e T (temperatura) representa a região densa, fria e de baixa velocidade; a faixa vermelha é a região de densidade um pouco menor, mais quente; as porções dos perfis temporais mais à direita caracteriza a região de rarefação.

Fonte: Adaptada de Burlaga (1975).

A linha vertical nas séries temporais do quadro direito inferior marca a interface do feixe que separa a região quente da região densa. Temporalmente, o pico de densidade antecede o

aumento de temperatura e o pico do campo magnético. Na região onde a velocidade é máxima a densidade é baixa caracterizando uma região de rarefação. Há a formação de um par de choques porque, na região de interação além de 1,0 UA, pulsos de pressão aumentam em amplitude propiciando que interações não-lineares contribuam para o *escarpamento* dos pulsos. A pressão (não mostrada na figura) atinge seu valor máximo, quando o campo magnético é máximo.

Os feixes corrotantes podem passar pela terra sucessivas vezes e gerarem tempestades magnéticas recorrentes (periódicas). Diferentemente destes, as ejeções de massa coronal (CMEs) passam pela terra uma única vez. Ambos os eventos são distúrbios gerados pelo Sol no plasma magnetizado que permeia o meio interplanetário (JACKSON, 1997).

As duas configurações básicas de linhas magnéticas na atmosfera solar são: as linhas abertas que chegam ou se afastam do Sol e as linhas de campo cujas extremidades estão ambas ancoradas na superfície do Sol. Regiões que exibem linhas do primeiro tipo são os buracos coronais, enquanto que as linhas magnéticas fechadas formam a base dos *streamers* coronais. Neste último caso, conforme a Figura 2.4a, o plasma encontra-se confinado por linhas de campo magnético fechadas que formam uma arcada em cujo interior existe uma proeminência (nuvem de plasma densa e fria sustentada magneticamente acima da superfície do Sol). Acima da arcada existe uma região de linhas magnéticas abertas de sentidos opostos, uma vez que dentro dessa região há uma lâmina neutra.

Esse é o cenário inicial preparado para a ocorrência de uma ejeção de massa coronal (CME) que começou a ser desvendado com a ajuda dos coronógrafos a bordo das missões *Solar Maximum Mission* e *Skylab* a partir do início da década de 1970. Uma CME associada a uma proeminência eruptiva tem uma estrutura, ilustrada pela Figura 2.4b, composta por três partes básicas (HUNDHAUSEN, 1997) a saber:

- a) Uma casca externa em forma de laço composta por plasma coronal denso;
- b) Um núcleo brilhante ou laço interno composto por plasma mais frio proveniente da proeminência que explodiu;
- c) Uma cavidade (região azul).

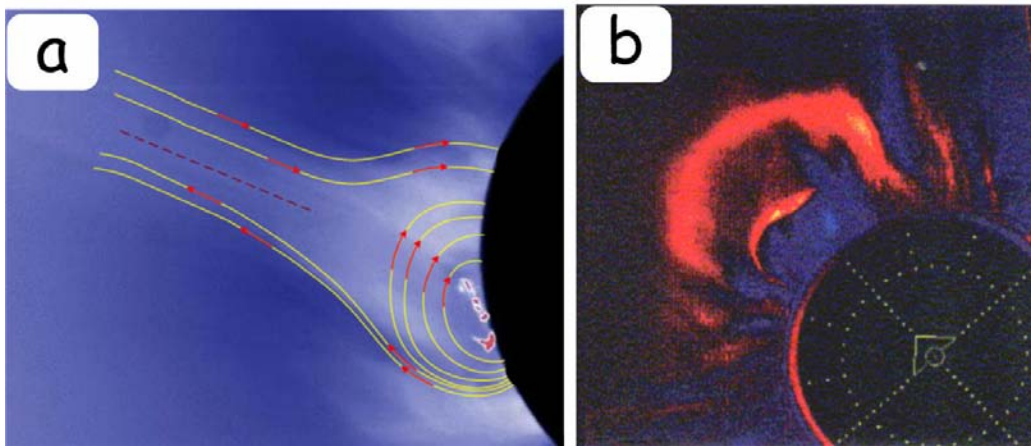


Figura 2.4- (a) Estrutura de um *Helmet Streamer*; (b) Estrutura de uma CME associada à proeminência.

Fonte: Adaptadas de <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/helmet_streamer.jpg> (maio, 2007) e de *Hundhausen*, (1997), respectivamente.

Com base nos artigos de revisão de *Gosling* (1997); *Hundhausen* (1997); *Low* (1997) pode-se enumerar algumas características das CMEs:

- a) Tendem a ocorrer em regiões de linhas magnéticas fechadas e próximas às linhas magnéticas neutras;

- b) Em 70% das observações, as CMEs estão associadas com as proeminências eruptivas;
- c) As CMEs precedem as explosões solares;
- d) As CMEs têm extensão latitudinal média de aproximadamente 45°;
- e) CMEs causam distúrbios no meio interplanetário responsáveis por grandes tempestades geomagnéticas não-recorrentes.

O material solar ejetado segue em direção ao espaço interplanetário carregando consigo campo magnético intenso que, de acordo com vários estudos, pode apresentar diversas topologias, revistas por *Gonzalez et al.* (1994), as quais tentam explicar a componente do campo magnético interplanetário direcionada para sul.

A ejeção (ou remanescente interplanetário das ejeções de massa coronal- ICME) possui velocidade ($>500 \text{ km/s}$) acima daquela que é característica do vento solar (50 km/s , ondas magneto-sônicas) gerando um arco de choque à frente da ejeção solar magnetizada e entre os quais há uma região turbulenta chamada bainha. A literatura usa a terminologia gás impulsor (*gas driver*) para designar o envoltório que contém o plasma e o campo magnético.

À medida que a CME interplanetária se propaga interage com o vento solar lento transferindo a este momento linear e energia. Além disso, a interação mencionada faz com que o campo magnético ambiente drapeje em torno da ejeção da mesma forma que uma bandeira tremula, quando sacudida pelo vento, segundo mostra a Figura 2.5. De acordo com *Gosling* (1997), o drapejar do campo magnético ambiente pode contribuir para que este se reorienta no espaço interplanetário.

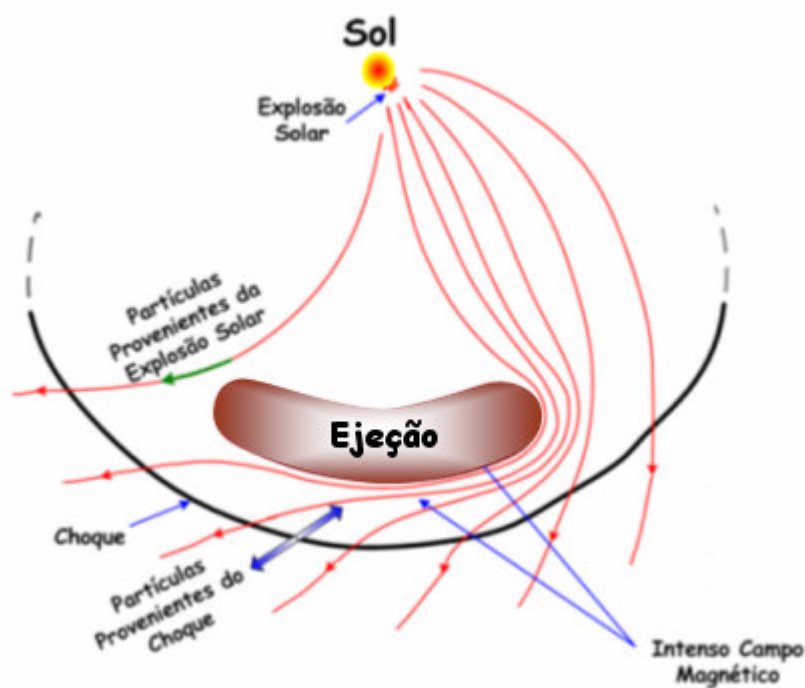


Figura 2.5- CME interplanetária e drapejamento do campo magnético

Fonte: Adaptada de *The National Academies* (2000).

Quando a intensidade do campo magnético é elevada e a pressão magnética prevalecer sobre a pressão do plasma na ejeção da Figura 2.5, por exemplo, ela é chamada de *nuvem magnética*. Klein e Burlaga (1982) estudaram um total de 45 nuvens magnéticas utilizando dados do campo magnético e do plasma de 1967 até 1978. As nuvens foram classificadas em três categorias:

- a) Nuvens precedidas por choques;
- b) Nuvens seguidas por uma interface de feixe;
- c) Nuvens associadas a CME.

Um exemplo de nuvem precedida por choque é dado na Figura 2.6, onde F , θ e ϕ são a magnitude, a latitude e a longitude do campo magnético; V , N , T_p , NS e EW são a velocidade de fluxo, a densidade numérica, a temperatura dos prótons, a direção norte-sul e a direção leste-oeste, respectivamente.

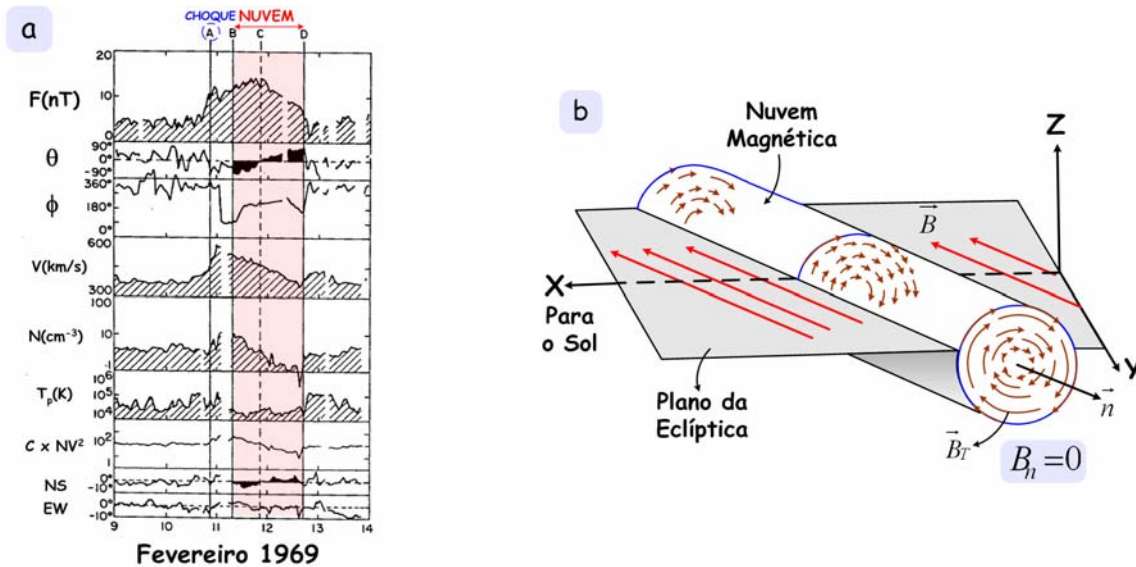


Figura 2.6- (a) Nuvem magnética precedida por choque; (b) Topologia do campo magnético para a nuvem do item (a).

Fonte: Adaptadas de *Klein e Burlaga* (1982).

O método da variância mínima (SONNERUP; CAHILL, 1967) foi utilizado para os dados do campo magnético. A direção de variância mínima é a direção do eixo de simetria do cilindro da Figura 2.6b ao longo do qual está a normal \vec{n} do plano (área circular) que contém o autovetor associado à variância máxima. Neste plano, a componente \vec{B}_T do campo magnético, perpendicular a \vec{n} , está girando. Há duas situações a considerar:

- a) A componente \vec{B}_n do campo magnético, paralela a \vec{n} , é nula: as linhas de campo magnético da nuvem são fechadas e formam uma estrutura magnética cilíndrica, conforme a Figura 2.6b;
- b) A componente \vec{B}_n do campo magnético, paralela a \vec{n} , é não-nula: as linhas de campo magnético da nuvem são helicoidais e formam uma hélice magnética cilíndrica;

A Figura 2.6a mostra que a nuvem magnética é uma estrutura com intenso campo magnético e duração de mais de 24 horas. Nesse intervalo de tempo, a magnitude do campo magnético é maior do que 10 nT e decresce lentamente. A latitude do campo, também, varia lentamente passando da orientação sul para norte em virtude da rotação da componente \vec{B}_T no plano de máxima variância. A temperatura mantém-se baixa e a velocidade de fluxo e a densidade decrescem monotonicamente. O choque, indicado pela letra A na Figura 2.6a, precede a nuvem e é caracterizado por aumentos na velocidade, densidade e campo magnético. Nas nuvens magnéticas associadas a choques, a pressão magnética interna é maior do que a pressão dos íons ($\beta < 1$) e a pressão interna total é maior do que a externa permitindo que as nuvens ainda estejam em expansão ao chegarem à magnetosfera terrestre.

Dessa forma, a entrada de massa, energia e momento linear para dentro da magnetosfera terrestre dependerá da intensidade e da duração da componente do campo magnético interplanetário orientada “para sul”, B_z .

A Figura 2.7 mostra de maneira esquemática a interação de uma nuvem com a magnetosfera. A nuvem desloca-se com velocidade V_{sw} e possui componente do campo magnético voltada para sul (flecha vermelha). Nas regiões cinzas, lados diurno e noturno da

magnetosfera, ocorrem reconexões magnéticas entre as linhas de orientações opostas dos campos da nuvem e da magnetosfera.

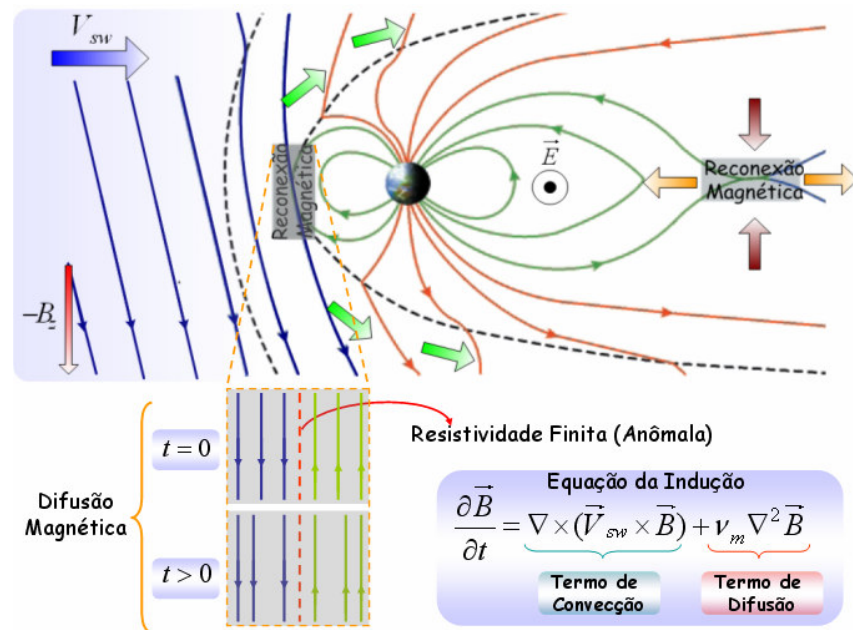


Figura 2.7- Interação entre uma nuvem magnética e a magnetosfera terrestre. A entrada de matéria, momento linear e energia para dentro da magnetosfera ocorre através do processo de reconexão magnética no lado diurno da magnetosfera. No lado noturno, a reconexão magnética gera um fluxo de plasma em direção à Terra o que produz um campo elétrico de convecção. A reconexão magnética ocorre graças à existência de uma resistividade elétrica anômala, nas regiões cinzas, o que permite a difusão das linhas magnéticas ao longo do tempo. A equação da indução mostra o termo de difusão que se torna importante quando a resistividade elétrica é não-nula.

Fonte: Adaptada NASA (1999)

O processo de reconexão magnética ocorre porque a condição de “congelamento” (*frozen-in*) válida para fluidos magneto-hidrodinâmicos ideais (condutividade $\rightarrow \infty$) é violada por

existir nas regiões cinzas uma resistividade elétrica finita não-ordinária, ou seja, anômala o que permite a difusão e a mudança de topologia das linhas de campo magnético (LEE; HAWKINS, 1995).

Na Figura 2.7, a reconexão magnética do lado diurno altera a topologia das linhas magnéticas, as quais são arrastadas pelo fluxo do vento solar termalizado e subsônico (flechas verdes) em direção à cauda magnética onde passam a fazer parte dos lóbulos da cauda (armazenamento de energia magnética). Na região noturna da cauda geomagnética, as linhas magnéticas abertas empurradas pelos fluxos de plasma (flechas marrons) sofrem outro processo de reconexão que possibilita que a energia magnética seja convertida em energia cinética do plasma (flechas laranjas) que deixa a região de difusão (retângulo cinza) na forma de dois fluxos de plasma em sentidos opostos. O fluxo de plasma que parte em direção à Terra leva consigo linhas de campo magnético fechadas que vão procurar equilibrar o processo de “erosão” na região subsolar da magnetopausa. Além disso, o fluxo de retorno permite o aparecimento de um campo elétrico de convecção de grande escala, $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}$, orientado da alvorada para o crepúsculo (*dawn-to-dusk*).

2.2 Sistemas de Correntes na Magnetosfera Terrestre Associados a Tempestades e Sub-tempestades Geomagnéticas

Os principais sistemas de correntes elétricas associados às tempestades e sub-tempestades geomagnéticas são: a *corrente de anel* e as *correntes de Birkeland* ou *alinhadas ao campo*. A seguir, dar-se-ão breves descrições dos principais aspectos dessas duas correntes elétricas.

2.2.1 A Corrente de Anel

O movimento de partículas eletricamente carregadas nas vizinhanças da Terra é influenciado por não-uniformidades espaciais do campo geomagnético, a saber: (1) a convergência ou a divergência das linhas de indução magnética em regiões de alta latitude; (2) a aproximação ou o distanciamento crescente entre as linhas de campo numa dada direção; e (3) a curvatura das linhas magnéticas. Estas três não-uniformidades contribuem para o aprisionamento de populações de partículas pelo campo geomagnético.

A primeira não-uniformidade contribui para a existência de uma força paralela média, em relação à direção do campo magnético, que acelera o centro de guia, associado às partículas carregadas, ao longo da direção paralela ao campo magnético. A segunda permite à existência de uma força perpendicular, à direção do campo, acelerando as cargas elétricas azimutalmente num plano instantâneo que é perpendicular ao campo; outra função dessa força é permitir que partículas de cargas elétricas de sinais contrários sofram movimentos de deriva em sentidos opostos. A terceira não-uniformidade faz com que as partículas, dependendo do sinal da carga elétrica, sofram movimentos de deriva em direção ou para longe do centro de curvatura da linha magnética.

As partículas do plasma espacial que circundam a Terra espiralam em torno das linhas do campo geomagnético em direção aos pólos. Durante esse movimento, em virtude da conservação da energia cinética total e dos *invariantes adiabáticos*, passa a existir um intercâmbio entre as energias cinéticas paralela e perpendicular, ou seja, esta torna-se maior, enquanto aquela diminui à medida que as regiões de convergência das linhas de campo se aproximam. Se os ângulos de arremesso (*pitch angle*) das cargas elétricas satisfizerem à condição do cone de perdas, elas serão refletidas permanecendo assim aprisionadas, ou serão perdidas e precipitarão em direção à atmosfera. A atuação concomitante dos gradientes e da curvatura das linhas de força fazem com que as partículas positivas sofram

uma deriva para oeste e as negativas para leste no que resulta uma corrente elétrica líquida de leste para oeste que é conhecida por *corrente de anel*.

A corrente de anel é uma característica permanente da magnetosfera interna da Terra, ou seja, está presente tanto nos períodos geomagneticamente calmos quanto nos períodos perturbados. Está localizada na região entre 2 e 7 raios terrestres numa região que fica entre a borda externa da região de aprisionamento e a borda interna da lâmina de plasma. A composição da corrente de anel é, principalmente, de prótons, íons oxigênio e elétrons. Íons oxigênio com elevado estado de carga ($O^{+5,6,7}$) são originários do vento solar, ao passo que aqueles de baixo estado de carga ($O^{+1,2}$) são provenientes da ionosfera. Medições realizadas pelas espaçonaves AMPTE e CCE atestaram a presença de grandes concentrações de íons oxigênio procedentes da ionosfera (LUI et al.,1987).

2.2.2 Correntes Alinhadas ao Campo ou Correntes de Birkeland

As correntes alinhadas ao campo ou correntes de *Birkeland* geram distúrbios magnéticos superficiais semelhantes àqueles gerados por correntes elétricas horizontais que fluem na ionosfera. Inicialmente, sugeridas por *K. Birkeland* em 1908, estas correntes somente foram detectadas a partir de 1970 por meio de experimentos à bordo de foguetes e de satélites.

A figura esquemática, Figura 2.8, foi criada a partir de uma combinação de figuras de *Potemra* (1979) e de *Swift* (1979), de modo a permitir uma visão geral da importância das correntes de *Birkeland* no acoplamento cauda magnética-ionosfera que é o mecanismo associado à *fase expansiva* das sub-tempestades magnéticas.

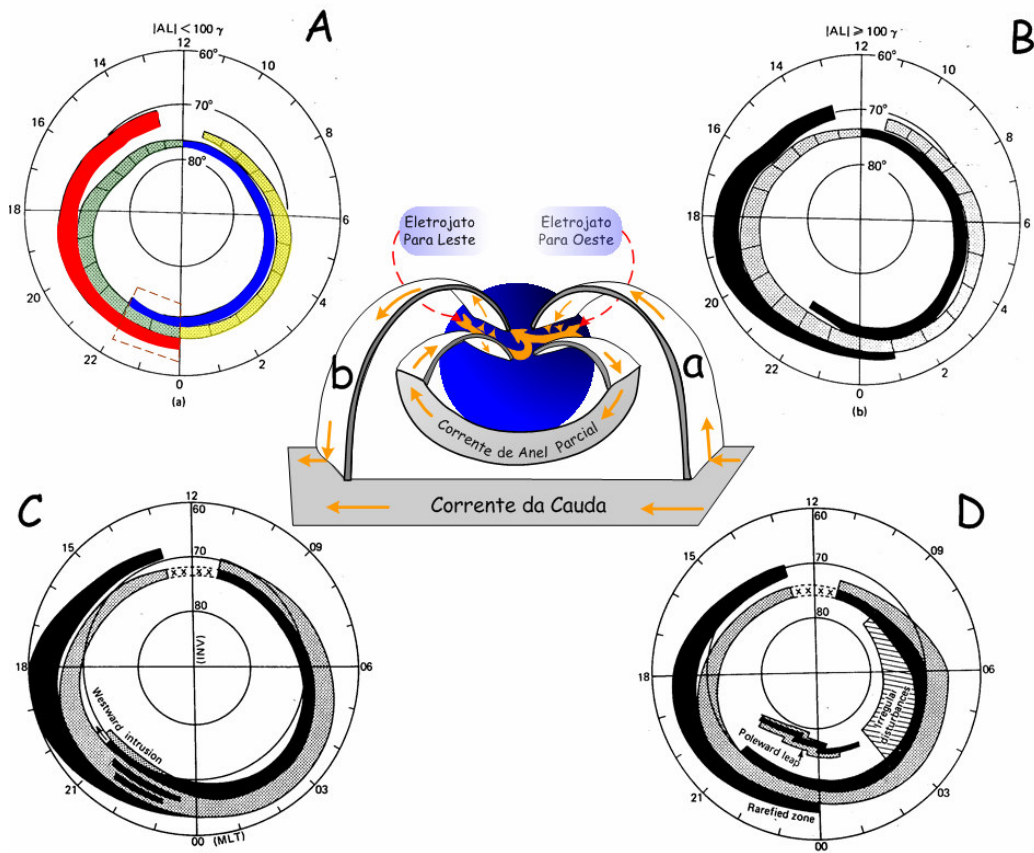


Figura 2.8- Combinação de figuras que ilustram o acoplamento cauda magnética-ionosfera via correntes de *Birkeland* (central) e a distribuição latitudinal e temporal destas correntes em períodos magneticamente calmos (A) e perturbados (B, C e D) e as fases de expansiva (C) e de recuperação de uma sub-tempestade (D).

Fonte: Adaptadas de *Potemra* (1979) e de *Swift* (1979).

A figura central mostra a região noturna da Terra nas proximidades da lâmina de corrente da cauda magnética. Acopladas a ela estão duas folhas curvas que representam as correntes de *Birkeland*. Uma corrente proveniente da cauda flui em movimento ascendente ao longo da “folha a” e em seguida precipita-se para dentro da ionosfera, onde se conecta ao eletrojato “para oeste”.

Numa latitude mais baixa, correntes de *Birkeland* partem da ionosfera e conectam-se com a corrente de anel parcial; desta partem correntes alinhadas ao campo que fluem em direção à ionosfera na região do eletrojato “para leste”. Finalmente, as correntes alinhadas ao campo deixam a ionosfera passando pela “folha b” depositando-se, em seguida, na lâmina de corrente da cauda.

O painel A mostra a distribuição das correntes de *Birkeland* (POTEMRA, 1979) em função da latitude (círculos concêntricos). Estas correntes estão distribuídas ao redor do pólo geomagnético em duas regiões principais chamadas de região 1 (azul e verde) e região 2 (amarelo e vermelho). Cada região apresenta correntes de *Birkeland* fluindo tanto para dentro da ionosfera (azul e vermelho) quanto para fora (verde e amarelo). A linha tracejada (Painel A) que compreende o setor entre 2200 a 2400 MLT (*Magnetic Local Time*) é onde se localiza a chamada descontinuidade de *Harang* que é um padrão de três fluxos de corrente (dois entrando e um saindo). Durante períodos fracamente perturbados (ainda Painel A), as correntes de *Birkeland* fluem para dentro da ionosfera no setor da manhã e para fora dela no setor da noite na região 1, ocorrendo o oposto na região 2. Nos Painéis B, C e D a região 1 é aquela voltada para o pólo, enquanto a região 2 é aquela voltada para o equador. Além disso, as regiões escuras são correntes entrando dentro da ionosfera e as regiões claras, correntes saindo. Durante os períodos magneticamente perturbados, os padrões de fluxo das correntes permanecem como aqueles do período calmo, porém ocorrem dilatações de ambas as regiões bem como o seus deslocamentos das altas para baixas latitudes, conforme os Painéis B e C.

Durante as sub-tempestades, o Painel C representa a fase de expansão, enquanto o D ilustra a fase de recuperação. Na fase expansiva, verifica-se, na descontinuidade de *Harang*, o surgimento de fluxos de corrente de entrada dentro da região de saída de corrente. Na fase de recuperação, há pares de corrente de *Birkeland*, localizados próximo ao pólo, que estão separados do sistema de correntes de *Birkeland* de grande escala (POTEMRA, 1979). Estas

características verificadas nestas duas fases da sub-tempestade são decorrentes da entrada forçada (intrusão) do eletrojato “para oeste” dentro do setor da noite.

3 FASES DE UMA SUB-TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA

Após uma breve introdução da interação entre uma nuvem magnética e a magnetosfera terrestre e, também, o acoplamento entre a ionosfera e a cauda magnética via correntes elétricas alinhadas ao campo magnético é oportuno, agora, entender o que é uma sub-tempestade magnética e como ela se origina. Uma sub-tempestade magnética ocorre ao longo de três fases:

a) Fase de Crescimento

É a fase na qual ocorre a energização da magnetosfera. Nesse período, o fluxo magnético sofre um processo “erosivo” na região diurna da magnetosfera em virtude da reconexão magnética. Transportado em direção à cauda, o fluxo magnético acumula-se nos lóbulos onde intensifica o campo próximo a Terra. O aumento na corrente da cauda produz um aumento na magnitude do campo da cauda. Verifica-se que em regiões mais afastadas da Terra, há um aumento no raio da cauda. Há, também, um afinamento da lâmina de plasma.

b) Fase Expansiva

A fase expansiva é caracterizada pela liberação explosiva da energia armazenada na cauda magnética durante a fase de crescimento. Esse processo de liberação de energia pode ser desencadeado por um decréscimo da energia injetada dentro da magnetosfera o que pode ocorrer ou por um enfraquecimento da componente do campo magnético interplanetário voltada para sul ou pela rotação do campo em direção ao norte (ROSTOKER et al., 1997).

A fase expansiva (McPHERRON, 1979) caracteriza-se pelo decréscimo tanto do raio da cauda magnética quanto da magnitude do campo magnético nos lóbulos da cauda. Nas proximidades da Terra, a lâmina de plasma expande-se à medida que o campo magnético torna-se mais dipolar, porém em regiões mais afastadas, ela se torna mais fina. Uma parte da corrente da cauda que normalmente está orientada para oeste, através da lâmina de plasma, é desviada ao longo das linhas de campo em direção à ionosfera. Essa corrente, então, flui para oeste intensificando o eletrojato nesta direção (ver Figura 2.8). Há também precipitação de partículas energéticas na região auroral. Na descontinuidade de *Harang*, (Painel C da Figura 2.8) ocorre o surgimento de fluxos de corrente de entrada dentro da região de saída de corrente.

c) Fase de Recuperação

É a fase de relaxação para o estado fundamental da magnetosfera. O estágio inicial é marcado por um salto do “eletrojato para oeste” e da precipitação de elétrons energético em direção ao pólo, fenômeno este que é marcado pela intensificação do eletrojato em altas latitudes (McPHERRON, 1979). Esse salto pode estar associado, também, com o painel D da Figura 2.8 que mostra pares de corrente de *Birkeland* que se separaram do sistema de correntes principal e que se moveram em direção ao pólo quase ao término da fase expansiva (POTEMRA, 1979).

4 QUAIS MECANISMOS FÍSICOS EXPLICAM AS FASES DE UMA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA ?

O *início súbito* e a *fase inicial* podem ser explicados em termos da compressão do campo magnético interplanetário pela pressão do vento solar intensificada.

A *fase principal* das tempestades geomagnéticas pode ser explicada por meio da *energização da corrente de anel* a qual gera um campo magnético com sentido oposto ao do campo geomagnético. Durante a fase expansiva de uma sub-tempestade, descrita anteriormente, forma-se uma corrente de anel parcial no lado noturno da magnetosfera (Figura 2.8) que tem um tempo de decaimento de 2,0 a 3,0 horas. Se nesse intervalo de tempo ocorrer sucessivas sub-tempestades, haverá um acúmulo de partículas injetadas na corrente de anel dentro da região de aprisionamento no que resultará numa corrente de anel azimutalmente simétrica (GONZALEZ et al., 1994).

A *fase de recuperação* é o decaimento da corrente de anel que perde íons, outrora aprisionados, por meio de três processos, a saber: troca de carga, espalhamento *coulombiano* e interações ressonantes com ondas de plasma.

5 CONCLUSÃO

Apresentou-se a origem e os mecanismos responsáveis pelo fenômeno conhecido como tempestade geomagnética definida como um decréscimo extraordinário na componente horizontal do campo geomagnético em baixas e médias latitudes formando uma depressão que é seguida logo após por seu decaimento. Mostrou-se que tais mecanismos residem no complexo acoplamento sol-meio interplanetário-magnetosfera que fornece a condição necessária (uma das quais é a componente norte-sul do campo magnético interplanetário orientada para sul) a ocorrência das tempestades e sub-tempestades geomagnéticas. Além disso, há também um acoplamento magnetosfera-ionosfera que resulta na energização da corrente de anel durante intensas atividades de sub-tempestades. A corrente de anel intensificada gera um campo magnético cuja sentido é oposto daquele do campo geomagnético, e isso explica a depressão encontrada no índice *Dst*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELCHER, J. W.; DAVIS, L. Large-amplitude alfvén waves in the interplanetary medium, 2. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 16, p. 3534-3563, June 1971.

BURLAGA, L. F. Interplanetary streams and their interaction with the Earth. **Space Science Reviews**, v. 17, p. 327-352, 1975. Disponível em:
<<http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1975SSRv...17..327B>>. Acesso em: 21 jun. 2007.

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A., KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, April 1994.

GOSLING, J. T. Coronal mass ejections: An overview. In: CROOKER, N.; JOSELYN, J. A.; FEYNMAN, J. (Ed.). **Coronal mass ejections**. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 9-16, 1997 (Geophysical Monograph 99).

HUNDHAUSEN, A. J. An introduction. In: CROOKER, N.; JOSELYN, J. A.; FEYNMAN, J. (Ed.). **Coronal mass ejections**. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 1-7, 1997 (Geophysical Monograph 99).

JACKSON, B. V. Heliospheric observations of solar disturbances and their potential role in the origin of geomagnetic storms. In: TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; KAMIDE, Y.; ARBALLO, J. K. (Ed.). **Magnetic storms**. Washington, DC: American Geophysical Union, p.59-76, 1997 (Geophysical Monograph 98).

KLEIN, L.W.; BURLAGA, L. F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. A2, p. 613-624, February 1982.

LEE, L. C.; HAWKINS, J. G. Coupling between microscale and mesoscale processes in the dayside magnetosheath, magnetopause, and boundary layer regions. In: HORWITZ, J. L.; SINGH, N.; BURCH, J. L. (Ed.). **Cross-scale coupling in space plasmas**, Washington, DC: American Geophysical Union, p. 219-233, 1995 (Geophysical Monograph 93)

LOW, B. C. The role of coronal mass ejections in solar activity. In: CROOKER, N.; JOSELYN, J. A.; FEYNMAN, J. (Ed.). **Coronal mass ejections**. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 39-47, 1997 (Geophysical Monograph 99).

LUI, A. T. Y.; McENTIRE, R.W.; KRIMIGIS, S. M. Evolution of the ring current during two geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. A7, p. 7459-7470, July 1987.

MARSHALL SPACE FLIGHT CENTER (NASA). **Helmet Streamer**. 2007. 1 fotografia, color., 480 x 381 px. Disponível em:

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/helmet_streamer.jpg> Acesso em: 25 jun. 2007.

McPHERRON, R. L. Magnetospheric substorms. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 17, n. 4, p. 657-681, June 1979.

NASA, **The magnetospheric multiscale mission-resolving fundamental processes in space plasmas**, Washington, Dc.,1999 (NASA/TM-2000-209883). Disponível em:

<http://stp.gsfc.nasa.gov/documents/mms/mms_std_report.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2007.

POTEMRA, T. A. Current systems in the earth's magnetosphere. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 17, n. 4, p. 640-656, June 1979.

ROSTOKER, G.; FRIEDRICH, E.; DOBBS, M. Physics of magnetic storms. In: TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; KAMIDE, Y.; ARBALLO, J. K. (Ed.). **Magnetic storms**. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 149-159, 1997 (Geophysical Monograph 98)

SONNERUP, B. U. Ö.; CAHILL, L. J. Magnetopause structure and attitude from explorer 12 observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 72, n. 1, p. 171-183, January 1967.

SWIFT, D. W. Auroral mechanisms and morphology. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 17, n. 4, p. 681-696, June 1979.

THE NATIONAL ACADEMIES (Ed.). **Radiation and the International Space Station: Recommendations to Reduce Risk**. Washington, DC: National Academy Press, 2000. 76p. Disponível em: <<http://www.nap.edu/catalog/9725.html>.> Acesso em: 21 jun. 2007.