

1. Publicação nº <i>INPE-2848-RPE/439</i>	2. Versão	3. Data <i>Agosto, 1983</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DGA/DIG</i>	Programa <i>MAGNET</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>RECONEXÃO MAGNÉTICA</i> <i>VENTO SOLAR</i> <i>MAGNETOSFERA</i>			
7. C.D.U.: <i>523.745.523.4-854</i>			
8. Título <i>"TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA DO VENTO SOLAR À MAGNETOSFERA TERRESTRE DEVIDO À JUNÇÃO MAGNÉTICA NA MAGNETOPAUSA"</i>		10. Páginas: <i>23</i>	
		11. Última página: <i>A.2</i>	
9. Autoria <i>Alicia L.C. Gonzalez</i> <i>W.D. Gonzalez-A.</i> <i>M. Virginia A. Jardim</i>		12. Revisada por <i>N.B. Trivedi</i>	
Assinatura responsável <i>Alicia L.C. Gonzalez</i>		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor Geral</i>	
14. Resumo/Notas <i>Algumas expressões gerais para os campos elétricos paralelo e de convecção, bem como para a transferência de energia, devido à reconexão na magnetopausa, são derivadas usando um modelo de reconexão no "nariz" da magnetopausa, que leva em conta a presença dos "clefs". Para o caso de amplitudes iguais do campo geomagnético e da bainha magnética, a expressão para a potência dissipada pelo campo elétrico de convecção se reduz ao parâmetro de subtempestade e amplamente discutido na literatura atual. Este resultado sugere que a reconexão na magnetopausa é definida no "nariz" com uma linha de reconexão inclinada, mas que o campo elétrico de convecção está relacionado somente com a componente "dawn-dusk" do campo elétrico de reconexão, como definido em altas latitudes ("clefs").</i>			
15. Observações			

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente subsidiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

ABSTRACT

An expression for the energy transfer due to magnetopause reconnection, as well as related expressions for the convection and parallel electric fields, are presented. These expressions are derived from a reconnection model centered at the magnetopause nose, and that considers the presence of the clefts. The expression for the convection-electric field-related energy transfer reduces to the substorm parameter ϵ for the special case of equal magnetosheath and geomagnetic field amplitudes. This result suggests that the reconnection electric field is transmitted along a tilted reconnection line, but that the convection field is only related to the "dawn to dusk" component of the reconnection-electric field.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2. <u>CAMPOS ELÉTRICOS</u>	3
3. <u>TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA</u>	6
4. <u>DISCUSSÃO</u>	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
APÊNDICE A - DERIVAÇÃO DAS FUNÇÕES ANGULARES	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Vista "desde o sol" da magnetopausa diurna com os vetores de campo geomagnético, B_G , e da bainha magnética, B_M , no "nariz"; da linha de reconexão LL; da linha de campo elétrico interplanetário EE e da linha "dawn-dusk" DD	2
2 - Função $M(S, \theta)$ para alguns valores do parâmetros $S \leq B_G/B_M$..	4
3 - Função $N(S, \theta)$ para alguns valores do parâmetros $S \equiv B_G/B_M$..	5
4 - Função $K(S, \theta)$ para alguns valores do parâmetros $S \equiv B_G/B_M$..	7

1 - INTRODUÇÃO

Os últimos trabalhos sobre transferência de energia interplanetária para a magnetosfera aberta da Terra (Perreault and Akasofu, 1978; Akasofu, 1979a, 1979b; D'Angelo and Goerkz, 1979; Kan and Lee, 1979) motivaram a derivação de algumas expressões gerais para a transferência de energia e do campo elétrico relacionada com a reconexão na magnetopausa. Para o caso particular em que os campos magnéticos que entram em reconexão, o da bainha magnética ("magnetosheath") e o geomagnético, são iguais, a expressão para a potência efetivamente transferida para a magnetopausa se reduz ao parâmetro de subtempestade ϵ (também chamado quantidade interplanetária) discutido na literatura citada anteriormente.

Este trabalho é baseado no modelo de reconexão na magnetopausa de Gonzalez and Mozer (1974), no qual algumas suposições simplificativas foram usadas. Entre elas, considerou-se que a reconexão ocorre na magnetopausa diurna toda com secção de choque $2R$, onde R é o raio da magnetopausa no "nariz", e sem limites em altas latitudes. Entretanto, se a presença dos "clefs" for levada em conta, a área efetiva para reconexão ficará reduzida, e a expressão para o potencial de reconexão tornar-se-á menos sensível ao fator de geometria (λ) introduzido por Gonzalez and Mozer (1974) para incluir o efeito de curvatura apresentado pela magnetopausa real, principalmente em altas latitudes. Assim, a expressão para o potencial na linha de reconexão (Gonzalez, 1973) a ser usada a seguir é (em unidades gaussianas):

$$\phi = (2/c) V B_T F(B_G/B_M, \theta), \quad (1)$$

onde V é a velocidade do vento solar, B_T é a componente transversal do campo magnético interplanetário (IMF), $B_T \equiv (B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$, $F(B_G/B_M, \theta)$ é a função angular definida no Apêndice A, e a função F representa a projeção efetiva do campo elétrico interplanetário (VB_T/c) sobre a linha de reconexão de comprimento $2R$. Gonzalez e Mozer (1974) supuseram que o campo da bainha magnética ("magnetosheat"), B_M estava relacionado ao

campo B_T por $B_M = qB_T$, onde q é um parâmetro compressional que, em média, tem valor igual a 5.

Na Figura 1, o campo elétrico interplanetário ao longo da linha \overline{EE} , quando projetado sobre a linha de reconexão \overline{LL} , dá o campo elétrico de reconexão $E_L = (V/c) B_T F(S, \theta)$, com $S \equiv B_G/B_M$. Gonzalez (1973) calculou a energia dissipada na magnetopausa por unidade de tempo devido à reconexão como $P = \Phi I$, onde I é a corrente total na magnetopausa devido à reconexão, e dada por $I = (c/2\pi) R |B_G - B_M|$. Salientou-se que esta potência era dissipada somente na magnetopausa. Entretanto, neste trabalho o significado de P é mais geral, como discutido a seguir.

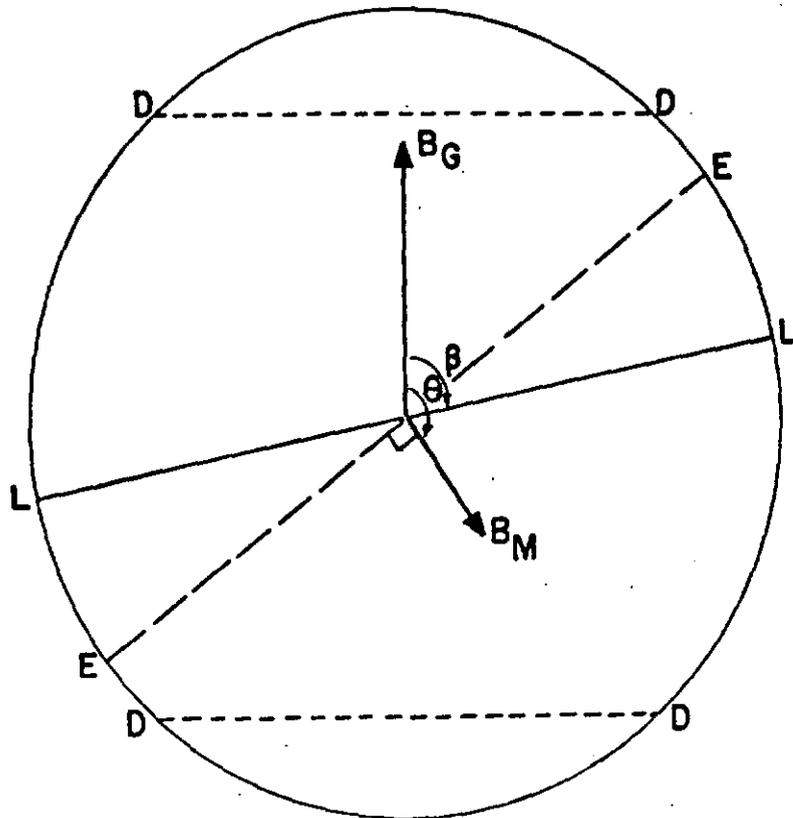


Fig. 1 - Vista "desde o sol" da magnetopausa diurna com os vetores de campo geomagnético, B_G , e da bainha magnética, B_M , no "nariz"; da linha de reconexão \overline{LL} ; da linha de campo elétrico interplanetário \overline{EE} e da linha "dawn-dusk" \overline{DD} .

2 - CAMPOS ELÉTRICOS

O campo elétrico total E_L devido ao processo de reconexão deve ser considerado como sendo composto por uma componente "dawn-dusk", transmitida em altas latitudes ("clefs") como um campo de convecção, e por uma componente meridional paralela ao campo geomagnético.

Assim, o campo elétrico de convecção E_D pode ser dado pela projeção do campo total E_L , ao longo da linha \overline{DD} da Figura 1, ou seja:

$$E_D = E_L G(S, \theta) = (V/c) B_T F(S, \theta) G(S, \theta) = (V/c) B_T M(S, \theta), \quad (2)$$

onde as funções $G(S, \theta)$ e $M(S, \theta)$ estão definidas no Apêndice A. O gráfico da função $M(S, \theta)$ está mostrado na Figura 2 para alguns valores do parâmetro S .

Similarmente, o campo elétrico paralelo pode ser dado por:

$$E_{||} = E_L H(S, \theta) = (V/c) B_T F(S, \theta) H(S, \theta) = (V/c) B_T N(S, \theta), \quad (3)$$

onde as funções $H(S, \theta)$ e $N(S, \theta)$ são definidas no Apêndice A. O gráfico da função $N(S, \theta)$ é mostrado na Figura 3 para alguns valores típicos do parâmetro S .

A expressão acima é válida para $S > 1$ e $\cos \theta < 1/S$, ou seja, para $B_M > B_G \cos \theta$ (Gonzalez and Mozer, 1974). Quando $\cos \theta \geq 1/S$, $E_D = E_{||} = 0$. Quando se supõe que os campos geomagnéticos e da bainha magnética têm amplitudes iguais, ou seja, $B_G = B_M$ e $S = 1$, os campos elétricos paralelo e de convecção se reduzem a: $E_D = (V/c) B_T \sin^2(\theta/2)$ e $E_{||} = (V/c) B_T \sin(\theta/2) \cos(\theta/2)$, a partir da equações 2 e 3, respectivamente.

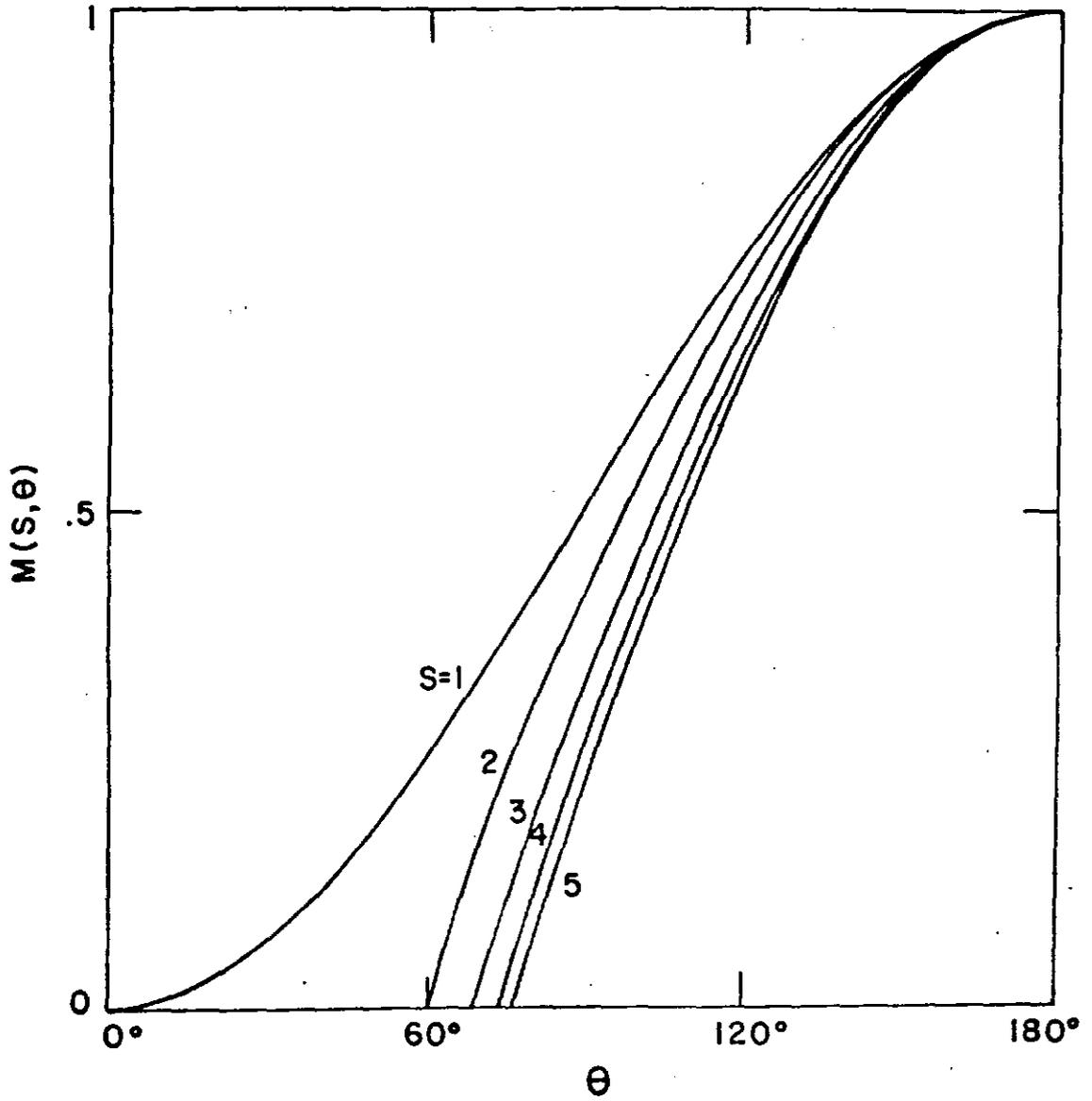


Fig. 2 - Função $M(S, \theta)$ para alguns valores do parâmetro $S \equiv B_G/B_M$.

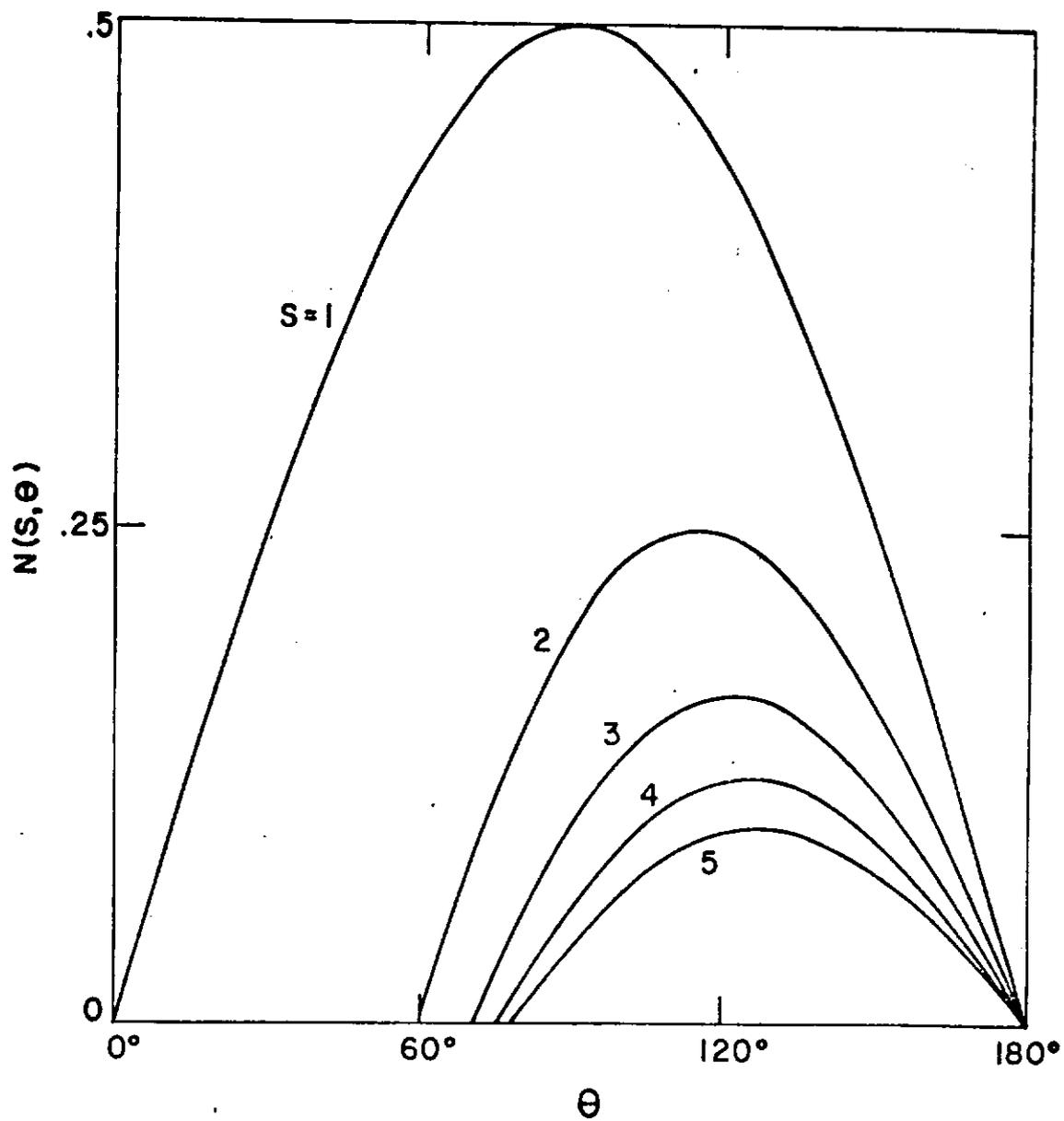


Fig. 3 - Função $N(S, \theta)$ para alguns valores do parâmetros $S \equiv B_G/B_M$.

Para valores típicos de parâmetros interplanetários, isto é, $V = 400$ km/s e $B_T \approx 4$ gamas, e considerando que $M(S, \theta) \leq 1$ e $N(S, \theta) \leq 0.5$ (Apêndice A), estima-se para o campo elétrico de convecção $E_D \leq 2$ mV/m, e para o campo paralelo $E_{\parallel} \leq 1$ mV/m.

3 - TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Se se estiver interessado na energia transferida do vento solar para a magnetopausa (devido à junção magnética na magnetopausa) e dissipada com o campo elétrico de convecção E_D , dentro da região magnetosférica onde o processo de convecção é dominante, pode-se definir uma corrente magnetosférica total na direção "dawn-dusk" estabelecida na magnetosfera aberta como um todo. Esta corrente total, I_D , é alimentada pelo processo de reconexão e está portanto, relacionada à troca total dos campos geomagnético e da bainha magnética na direção "dawn-dusk". Usando a equação de Maxwell, $\nabla \times \underline{B} = 4\pi \underline{J}/c$, e uma escala de comprimento $2R$ na direção "dawn-dusk", pode-se estimar esta corrente (Gonzalez, 1973) por $I_D = (c/2\pi) R |B_G - B_M| G(S, \theta)$. Assim, a potência estimada para dissipação com o processo de reconexão é:

$$P_D = \Phi_D I_D = (1/\pi) VR^2 B_T F(S, \theta) G^2(S, \theta) |B_G - B_M| = (1/\pi) VR^2 B_T B_M K(S, \theta) \quad (4)$$

onde as funções $F(S, \theta)$, $G(S, \theta)$ e $K(S, \theta)$ são definidas no Apêndice A. O gráfico da função $K(S, \theta)$ é mostrado na Figura 4 para alguns valores típicos de S .

A equação 4 é válida para $\cos \theta < 1/S$ e $S > 1$, e quando $\cos \theta \geq 1/S$, $P_D = 0$. Quando se supõe que os campos geomagnético e da bainha magnética têm amplitudes iguais na magnetopausa ($S = 1$), a equação 4 se reduz a $P_D = (2/\pi) VR^2 B_T B_M \sin^4(\theta/2)$. Supondo que $B_M = qB_T$, tem-se que $P_D = (2/\pi) VR^2 q B_T^2 \sin^4(\theta/2)$. Esta expressão para P_D pode ser comparada com o parâmetro de subtempestade (Akasofu, 1979a) $\epsilon = VR^2 B^2 \sin^4(\theta/2)$, onde B é a amplitude do IMF total; em geral, $B^2 \approx (2/\pi) q B_T^2$, e para os valores de q mais comuns: $q = 3$, $q = 4$ e $q = 5$, tem-se:

$$P_D(S = 1) = \epsilon \approx VR^2 B^2 \sin^4(\theta/2). \quad (4a)$$

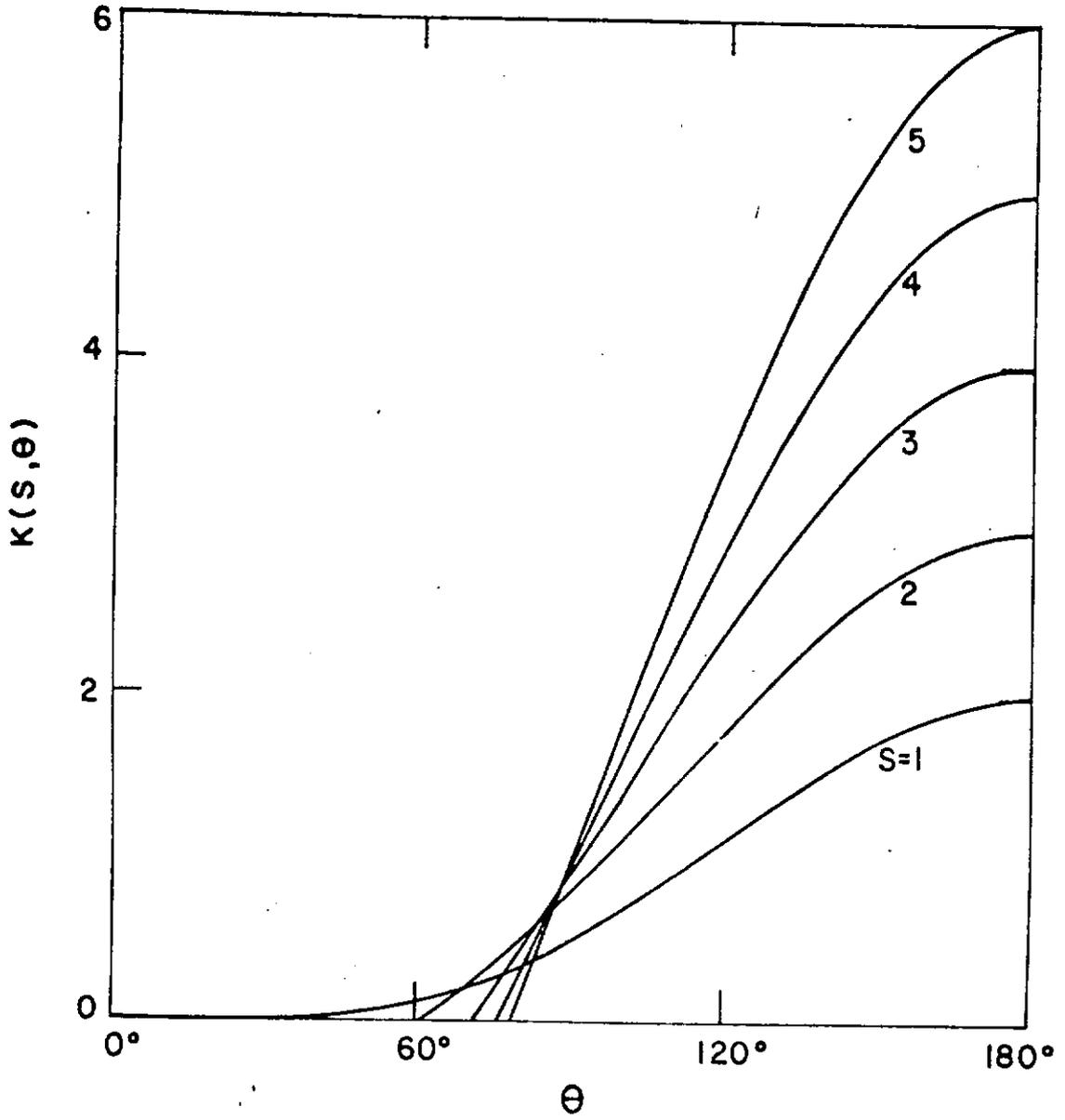


Fig. 4 - Função $K(S, \theta)$ para alguns valores do parâmetro $S \equiv B_G / B_M$.

Considerando que a posição da magnetopausa é basicamente definida pelo balanço de pressão e pelo uso de um simples modelo dipolar para o campo geomagnético em baixas latitudes da magnetopausa, pode-se escrever a Equação 4 apenas como função dos parâmetros do vento solar, ou seja:

$$P_D = (B_0^2 r_0^6 / 2\pi^4 m_+)^{1/3} (V/N_+)^{1/3} qB_T^2 K(S, \theta),$$

onde $S \equiv B_G/B_M = V(8\pi m_+ N_+)^{1/2} / qB_T$, r_0 é o raio da Terra, B_0 é o valor na superfície do campo geomagnético, m_+ é a massa do próton e N_+ é a densidade do vento solar. Supondo como acima que $B^2 \sim (2/\pi) qB_T^2$ tem-se:

$$P_D(\text{ergs/s}) \sim 3 \times 10^4 (V/N_+)^{1/3} B^2 K(S, \theta), \quad (4b)$$

onde V é dado em cm/s, B em gamas e N_+ em cm^{-3} . Usando valores típicos para os parâmetros interplanetários, $V = 4 \times 10^7$ cm/s, $B = 6$ gamas e $N_+ = 5$ - e considerando que $K(S, \theta) \leq 6$, tem-se que $P_D \leq 10^{19}$ ergs/s.

Estas equações também podem ser aplicadas, embora com algumas restrições, às magnetosferas de Mercúrio, Júpiter, Saturno e a alguns sistemas binários estelares (Vasyliunas, 1979), de maneira a estimar sua correspondente transferência de energia e campo elétrico do vento solar (ou estelar).

4 - DISCUSSÃO

A Expressão 4a para a potência dissipada pelo campo elétrico de convecção se ajusta melhor ao parâmetro de subtempestade $\epsilon = VB^2 \lambda_0^2 \sin^4(\theta/2)$, dado por Akasofu (1979a), quando R (definido no "nariz" da magnetopausa) é medido até os "clefs", como R , com um valor esperado menor. A validade destas expressões foi testada com observações (Perreault e Akasofu, 1978; Akasofu, 1979a, 1979b) e apresentam estar bem relacionadas com o índice AE. Comparações similares do índice AE com a expressão mais geral, 4, para a transferência de energia,

bem como um suporte observacional para os campos elétricos paralelo e de convecção (dados pelas Equações 2 e 3) estão atualmente em preparação.

Os resultados obtidos acima sugerem que a linha de reconexão da magnetopausa inclinada e a transferência do campo elétrico interplanetário são definidas no "nariz" da magnetopausa. Entretanto, a potência efetiva liberada pelo vento solar para a magnetosfera parece ser basicamente transmitida pela componente "dawn-dusk" do campo elétrico de reconexão (ou de convecção) em altas latitudes ("clefts"). Assim, a corrente I_D usada nesta derivação para esta potência representa a corrente magnetosférica total na direção "dawn-dusk" produzida pelo gerador reconexão. A componente meridional do campo elétrico no "nariz" representa um campo elétrico paralelo ao campo geomagnético, que pode também ser dissipado no sistema de correntes alinhadas ao campo envolvido na configuração de reconexão na magnetopausa. Entretanto, espera-se que a potência dissipada por campos elétricos paralelos basicamente energize partículas na magnetopausa diurna e em sua extensão ionosférica (auroras no lado diurno), sem muita contribuição para a entrada de energia na cauda magnetosférica.

Deve ser interessante incluir nas expressões dadas acima os efeitos produzidos pela componente B_x do IMF (Gonzalez e Gonzalez, 1980) e pelo ângulo de inclinação do campo geomagnético (Murayama et alii. 1980) sobre a reconexão ocorrendo na magnetopausa. Estudos preliminares sugerem que isto pode, em parte, ser completado se as expressões acima são multiplicadas por (\bar{B}_x/B_x) , onde \bar{B}_x é o valor médio normalizado de B_x . Sabe-se que grandes valores de B_x tendem a reduzir a eficiência de reconexão no "nariz", e vice-versa (Gonzalez e Gonzalez, 1980). Similarmente, casos com grande ângulo de inclinação podem ser reduzidos àqueles com grandes valores de B_x e vice versa.

Finalmente, até o momento ainda não foi possível obter estimativas definidas para o parâmetro q , uma vez que se espera que ele seja uma função complexa do balanço de pressão na magnetopausa, das propriedades do "bow shock", da diminuição da bainha magnética, da eficiência do processo de reconexão e etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKASOFU, S.-I. Interplanetary energy flux associated with magnetospheric substorms, *Planetary Space Science*, 27(4):425-431, 1979a.
- AKASOFU, S.-I. Relationship between the growth of the ring current and the interplanetary quantity ϵ , *Planetary Space Science*, 27(7):1039-1041, 1979b.
- D'ANGELO, N. GOERTZ, C.K. An interpretation of Akasofu's Substorm parameter, *Planetary Space Science*, 27(7) 1015-1018, 1979.
- GONZALEZ, W.D. *A quantitative three dimensional model for magnetopause reconnection*. P.D. Thesis, Univ. of Calif., Berkeley 1973.
- GONZALEZ, W.D.; GONZALEZ, A.L.C. Influence of the B_x component of the interplanetary magnetic field on magnetopause reconnection, *Geophysical Research Letters*, 7(19):773-776, 1980.
- GONZALEZ, W.D.; MOZER, F.S. A quantitative model for the potential resulting from reconnection with an arbitrary interplanetary magnetic field, *Journal Geophysical Research*, 79(28)4186-4194, 1974.
- KAN, J.R.; LEE, L.C. Energy coupling function and solar wind - magnetospheric dynamo, *Geophysical Research Letters*, 6(7)577-580, 1979.
- MURAYAMA, T.; AOKI, T.; NAKAI, H.; HAKAMADA, K. Empirical formula to relate the auroral electrojet intensity with interplanetary parameters, *Planet. Space Sci.*, 28(7):803-813, 1980.
- PERREAULT, P.; AKASOFU, S.-I. A study of geomagnetic storms, *Geophysical Journal Royal Astronomy Society*, 54(3)547-573, 1978.
- VASYLIUNAS, V.M. ; Theories of magnetospheres around accreting compact objects, *Space Science Review*, 24(4)609-634, 1979.

APÊNDICE A

DERIVAÇÃO DAS FUNÇÕES ANGULARES

Da Figura 1, o campo elétrico interplanetário, ao longo da linha \overline{EE} , tem uma projeção sobre a linha de reconexão \overline{LL} através de $\cos [90^\circ - (\theta - \beta)] = \sin (\theta - \beta)$, com:

$$\begin{aligned} F(S, \theta) &\equiv \sin (\theta - \beta) = (B_M - B_G \cos \theta) / |B_G - B_M| \\ &= (1 - S \cos \theta) / (1 + S^2 - 2S \cos \theta)^{1/2} \end{aligned}$$

onde $S \equiv B_G/B_M$. Esta expressão só tem significado físico para $1 > S \cos \theta$ e $S > 1$, ou seja, para $B_M > B_G \cos \theta$ (Gonzalez e Mozer, 1974). De outra maneira, $F(S, \theta) = 0$. Quando $S = 1$, $F(S, \theta) = \sin (\theta/2)$.

Similarmente, qualquer parâmetro definido na linha de reconexão \overline{LL} tem uma componente sobre a linha "dawn-dusk" \overline{DD} , através de $\cos (90^\circ - \beta) = \sin \beta$, com:

$$\begin{aligned} G(S, \theta) &\equiv \sin \beta = (B_G - B_M \cos \theta) / |B_G - B_M| \\ &= (S - \cos \theta) / (1 + S^2 - 2S \cos \theta)^{1/2}. \end{aligned}$$

Esta expressão é sempre válida, desde que $S \equiv B_G/B_M \geq 1$ é sempre garantido na magnetopausa pelo balanço de pressão e por uma situação de equilíbrio de ordem zero. Quando $S = 1$, $G(S, \theta) = \sin (\theta/2)$.

Também, qualquer parâmetro definido em \overline{LL} tem uma componente meridional \overline{LL} , através de $\cos \beta$, com:

$$\begin{aligned} H(S, \theta) &\equiv \cos \beta = [1 - G^2(S, \theta)]^{1/2} = B_M \sin \theta / |B_G - B_M| \\ &= \sin \theta / (1 + S^2 - 2S \cos \theta)^{1/2}. \end{aligned}$$

Além disso, definem-se:

$$M(S,\theta) \equiv F(S,\theta) G(S,\theta) = (1 - S \cos \theta)(S - \cos \theta)/(1 + S^2 - 2S \cos \theta),$$

$$N(S,\theta) \equiv F(S,\theta) H(S,\theta) = \sin \theta (1 - S \cos \theta)/(1 + S^2 - 2S \cos \theta),$$

$$Q(S,\theta) \equiv F(S,\theta) G^2(S,\theta) |\underline{B}_G - \underline{B}_M| = B_M K(S,\theta)$$

$$= B_M (1 - S \cos \theta)(S - \cos \theta)^2/(1 + S^2 - 2S \cos \theta)^{1/2}.$$

Estas funções também estão definidas para $\cos \theta < 1/S$ e $S > 1$. Quando $\cos \theta \geq 1/S$, elas são zero; quando $S = 1$, $M(S,\theta) = \sin^2(\theta/2)$, $N(S,\theta) = \sin(\theta/2) \cos(\theta/2)$ e $K(S,\theta) = 2 \sin^4(\theta/2)$.

As Figuras 2, 3 e 4 mostram os gráficos das funções $M(S,\theta)$, $N(S,\theta)$ e $K(S,\theta)$ para alguns valores de S .