

# Um estudo do circuito elétrico atmosférico global

GABRIELA NUNES TURQUETTI\*      IVAN SOARES FERREIRA†

Universidade de Brasília

## Resumo

*O Circuito Elétrico Global é um modelo eletrodinâmico que tenta relacionar os mecanismos de geração de corrente na baixa atmosfera, na ionosfera e na magnetosfera. Com este modelo é possível explicar, por exemplo, os eventos atmosféricos transientes que ocorrem entre o topo da nuvem e a ionosfera logo depois de uma descarga elétrica causada pelos raios durante uma tempestade. O modelo de circuito proposto é baseado em um circuito RC, alimentado por fontes DC e AC, onde os elementos que representam as áreas de clima equilibrado são dados por uma resistência de clima equilibrado  $R_{CE}$  e uma capacitância de clima equilibrado  $C_{CE}$  e os elementos que representam áreas de tempestades são calculados para estas condições, e dados por um conjunto de fontes, resistências e capacitores. Os resultados para este modelo foram similares aos encontrados na literatura. Por isso, foi também implementada uma extrapolação deste circuito, com o propósito de incluir os efeitos da magnetosfera e da conexão entre o Sol e a Terra. Isto foi feito usando-se um circuito RLC. Uma análise preliminar nos mostra que, como a indutância é extremamente baixa, não há alteração das correntes na baixa atmosfera.*

Palavras-chave: Circuito Elétrico Global; Sistema Sol-Terra; Eletrodinâmica Atmosférica.

---

\*Universidade de Brasília - Instituto de Geociências (IGD), E-mail: gabriela.turquetti@hotmail.com

†Universidade de Brasília - Instituto de Física (IFD), Laboratório de Cosmologia e Astrofísica (LaCOSA).

## INTRODUÇÃO

A história do desenvolvimento do conceito de circuito elétrico foram propulsionadas pela invenção da bateria, com ela tornou-se possível o desenvolvimento dos primeiros circuitos elétricos. Sua primeira aplicação ampla para o uso prático foi à iluminação elétrica, e a partir de então, o uso da eletricidade se expandiu para o que é visto hoje em dia. O Circuito Elétrico Global (CEG), por sua vez é um modelo terrestre que relaciona o campo elétrico observado com a geração de corrente na baixa atmosfera, ionosfera e magnetosfera (Lakhina, 1993; Bering III, 1995; Bering III et al., 1998; Rycroft et al., 2000; Siingh et al., 2005). Essa relação associa principalmente ao sistema solo-ionosfera um enorme capacitor esférico que é carregado devido a tempestades. Neste contexto, correntes com milhões de amperes acabam por ser fomentadas através da coluna resistiva da atmosfera entre as placas do capacitor (Roble and Tzur, 1986). Associado a esse modelo, é possível mencionar os eventos atmosféricos transientes que são fluxos de plasmas que ocorrem de diversas formas como por exemplo, sprites, jatos, streamers, elves e halos. As diferentes formas se devem a diferentes combinações de fatores físicos como a pressão, temperatura e concentração de carga, mas todos ocorrem apenas porque há um acoplamento conforme descrito pelo CEG.

O estudo mais aprofundado do Circuito Elétrico Global vem crescendo nos últimos anos. Segundo Rycroft et al. (2000), os maiores avanços realizados nessa área são dados principalmente no estudo de tempestades e raios, relacionadas com o CEG. Neste trabalho realizaremos um estudo detalhado do Circuito Elétrico Global, e utilizaremos o modelo mais bem aceito para cada fenômeno para tentar entender o quanto tais modelos se adequam aos dados observacionais presentes na literatura.

O modelo mais utilizado pela literatura foi pro-

posto por Rycroft et al., (2007), e é aqui em partes testado. Porém, numa segunda parte do presente trabalho, foi acoplado a ele um circuito RLC, que é utilizado para modelar a magnetosfera como parte do CEG a fim de entender como ocorre o acoplamento elétrico e magnético entre a Terra e o Sol. Na magnetosfera é possível observar que corrente de Wilson é predominante na região, onde pelas linhas de campo geomagnético, ela se espalha pela Terra (Allaby et al., 1999). No circuito RLC, o resistor se refere à ionosfera e as correntes que a atravessam, o capacitor é a camada dupla (it double layer que se forma nas regiões das linhas de campo magnético, sendo responsável por acelerar as partículas que provocam auroras. E por fim, o indutor são os tubos de plasma existentes ao longo das linhas de campo magnético.

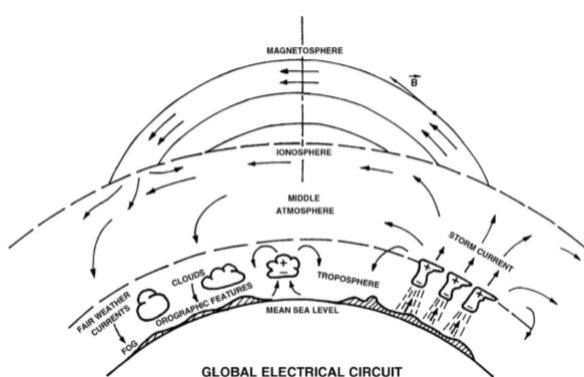
Assim, este trabalho se insere no contexto de uma área de pesquisa que tem como principal objetivo entender se há conexão entre a atividade solar e o clima terrestre. Historicamente, desde trabalhos de William Herschel, Henrich Schwabe e Rudolph Wolf são encontradas algumas fracas correlações, sempre bastante criticadas (veja revisão em Haigh e Cargill, 2015). Mais recentemente, foi observada uma correlação mais interessante entre o número de tempestades elétricas na Terra e a atividade solar (Schellart et. al., 2015). Este resultado, bem mais robusto que os anteriores, mostra que a possível conexão deve ser modelada por um sistema eletrodinâmico, o que começamos a fazer aqui.

## I. UM MODELO PARA O CIRCUITO ELÉTRICO GLOBAL

### I. Circuito e seus componentes

Para descrever o circuito elétrico global, o modelo de circuito utilizado é o proposto por Rycroft et al. (2007), sendo composto por uma fonte de corrente e por elementos passivos associados. Neste

tipo de circuito, assume-se que as correntes de condução acima das tempestades possuem um papel importante em manter a diferença de potencial entre a crosta terrestre e a ionosfera em aproximadamente 300 kV, produzindo então, um campo elétrico em áreas distais com clima equilibrado (*fair weather*) sem tempestades, assim os elementos passivos juntamente com as correntes de condução podem gerar um bom modelo para representar o CEG.



**Figura 1:** Esquema Geral do CEG. FONTE: Utilizado em diversas fontes, inclusive em Singh, et al. (2007).

Na Figura 1 é possível observar um diagrama com os diversos processos eletrodinâmicos que ocorrem no CEG, esses processos irão possuir comportamentos distintos que variam de acordo com as propriedades do meio, que são uma função principalmente da altura. Para descrever a Figura 1, assume-se que a atmosfera pode ser dividida em três partes (baixa atmosfera, média atmosfera e alta atmosfera). Para a baixa atmosfera, sabemos que ela é composta principalmente por oxigênio e nitrogênio possuindo aproximadamente uma altitude de 12 a 15 km desde o nível do mar. Acima desta altitude chamamos de atmosfera média. Para o CEG, a baixa atmosfera possui um comportamento importantíssimo, pois nela se dá o mecanismo responsável por manter praticamente constante a di-

ferença de potencial entre a crosta e a ionosfera. Lembrando que esta diferença existe mesmo com o clima equilibrado, bem como uma corrente perene. Já a alta atmosfera, que ocorre perto dos 100 km de altitude, possui uma ionização significativa, causada pelas emissões solares. A ionosfera é composta principalmente por plasma e assim como a baixa atmosfera, ela possui um papel importante para o CEG, pois ela assim como a crosta exerce um papel de capacitor, isto é, um grande depósito de cargas elétricas. Por fim, a magnetosfera pode ser considerada como a região que está acima da atmosfera. É uma região que possui partículas carregadas que sofrem fortes influências do campo magnético e do vento solar. Segundo Allaby et al., (1999), essas partículas carregadas são encontradas na magnetosfera a uma altitude de aproximadamente 3000-16000 km. Vale lembrar que a magnetosfera é responsável por proteger a Terra de ventos solares, radiação solar e raios cósmicos.

Para estudar os efeitos de descargas geradas em tempestades, considera-se um evento de tempestade isolado no circuito e a partir deste evento, modela-se a produção de diferentes descargas elétricas. Assim, a partir deste modelo, é possível a partir de uma associação em paralelo de resistores e capacitores determinar seus respectivos valores para diversas altitudes entre a crosta terrestre e a ionosfera durante uma tempestade. Falaremos de cada um destes elementos a seguir.

## I.1 Capacitância

Atualmente os capacitores possuem diversas aplicações, desde o uso para disparar flashes de câmeras fotográficas até a aplicação em televisões, onde eles são utilizados em larga escala. O capacitor é um dispositivo de circuito elétrico que tem como função armazenar cargas elétricas e consequentemente energia eletrostática.

Na parte do CEG que se refere ao clima equi-

librado, o modelo de capacitor que mais se aproxima ao sistema crosta terrestre e ionosfera é o modelo de capacitores de esferas concêntricas, onde a crosta e a ionosfera possuirão polaridades opostas, utilizando-se a convenção que as cargas positivas encontram-se na crosta terrestre e as cargas negativas na ionosfera. Para calcularmos a capacitância aproximada desse modelo, primeiramente calculamos a diferença de potencial de esferas concêntricas e então aplicando-se a equação de capacitância, obtemos:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}, \quad (1)$$

em que  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do meio,  $R_1$  é o raio da Terra somado aos 80 km até a ionosfera (ou seja, um total de 6451 km) e  $R_2$  é o raio da Terra (aproximadamente 6371 km).

Já para a parte transiente do CEG, isto é, aquela que dá conta das tempestades, é construído um circuito RC um pouco mais sofisticado, onde é usado um conjunto de sete capacitores em série. Na verdade, se olharmos com mais atenção, cada conjunto RC em paralelo está em série com os outros elementos.

A capacitância de cada um destes capacitores é calculada por:

$$C_{T_i} = \frac{\epsilon_0 A_T}{z_i - z_{i-1}}, \quad (2)$$

em que  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica na atmosfera,  $A_T$  é a área de um raio individual, aproximadamente  $314 \text{ km}^2$  (Rycroft et al., 2007),  $z_i$  é a altitude a ser estudada na coluna vertical entre 0,35 a 80 km. Assim, encontramos que a capacitância em cada elemento do conjunto de sete capacitores possuirá o valor de aproximadamente  $57,1 \mu\text{F}$ .

## I.2 Fontes de tensão como um modelo para a Nuvem

As nuvens formam-se a partir da condensação do vapor de água existente em ar úmido na atmosfera. Quando as nuvens ficam muito carregadas de granizo e de carga elétrica, elas geram tempestades. Elas têm sua base entre 2 ou 3 km e o topo em até 20 km de altitude, possuindo um diâmetro entre 10km a 20km podem ter 10 ou mesmo 20 km de diâmetro. A eletricidade estática presente tem diversas origens, uma delas é a radiação solar direta. Outra é a simples fricção, ou seja, energia mecânica, onde ela é causada pelos ventos, as partículas começam a se chocar e os átomos de água começam a ganhar e perder elétrons, criando então, duas forças elétricas opostas. O raio é então, causado por uma descarga elétrica entre duas nuvens ou entre uma nuvem e o solo. Quando a diferença de cargas é muito grande, uma carga elétrica, geralmente negativa (condutor), fraca e invisível, deixa a nuvem e direciona-se para baixo. Devido à intensidade do campo elétrico formado, as cargas positivas do solo mais próximas do raio condutor, saltam até encontrá-lo, fechando assim o circuito elétrico entre a nuvem e o solo. Em outro tipo de raio, chamado de positivo, a posição das cargas é invertida, ocorrendo uma descarga negativa do solo e outra positiva da nuvem. Nos raios positivos, a descarga se origina da parte alta da nuvem, enquanto nos negativos sua origem é no lado inferior.

Um raio começa com pequenas descargas dentro da nuvem. Estas descargas liberam os elétrons que começarão seu caminho de descida em direção ao solo em busca de uma conexão com a terra. Quando essa descarga, encontra-se a algumas dezenas de metros do solo, parte em direção a ela uma outra descarga com cargas opostas. Forma-se então o que é conhecido como o canal do raio, um caminho ionizado e altamente condutor. Por ele passa um gigantesco fluxo de cargas elétricas. É

neste momento que o raio acontece com a máxima potência, liberando grande quantidade de luz.

Há muitas décadas, se compreendeu que o ambiente em que ocorre o CEG é permanentemente eletrificado em função das tempestades. Tornando-as então, a principal fonte de campo elétrico na Terra. Sabe-se que as tempestades promovem uma grande movimentação de cargas na atmosfera. Essa movimentação se dá devido aos raios entre a nuvem e o solo e entre solo e nuvem, nuvem – nuvem, e nuvem ionosfera. Alguns dados sobre raios e tempestades são informados na tabela 1.

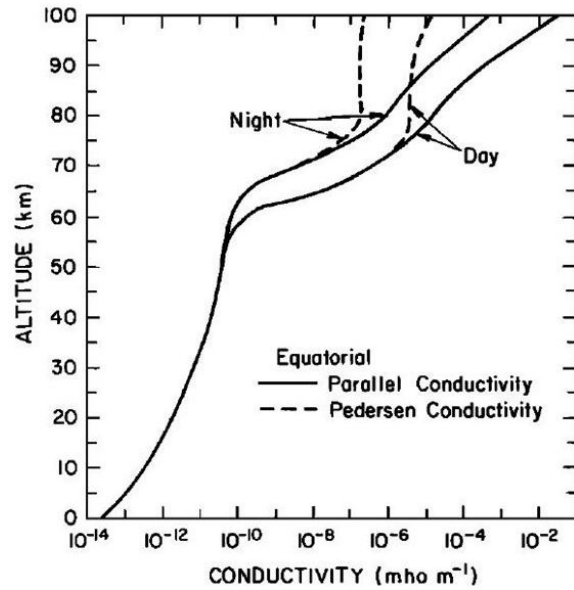
No circuito do modelo, fontes de corrente são usadas para emular o comportamento das nuvens nas tempestades.

Corrente de um raio	30 KA
Voltagem de um raio	$100 \times 10^6 \quad 1 \times 10^9 \text{ V}$
Energia elétrica que um raio consome	300 KWh
Campo elétrico do meio	$2,5 \times 10^6 \text{ V/m}$
Diferença de potencial para ocorrência de um raio	$1,25 \times 10^9 \text{ V}$

**Tabela 1:** Características físicas típicas de um raio.

### I.3 Resistência e Correntes

A resistência elétrica é a capacidade que um corpo possui de se opor à passagem de corrente elétrica, ela pode ser aproximada pela densidade de corrente  $J = \sigma E$ , que possui uma relação com a Primeira Lei de Ohm ( $V = RI$ ). No CEG, a atmosfera possui um comportamento que pode ser aproximado ao comportamento de uma resistência elétrica, possuindo então uma resistência aproximada de  $300 \Omega$ . Porém para se entender a fenomenologia observada, precisa-se de fato usar valores calculados para cada intervalo de altitude da atmosfera, pois como pode ser visto na Figura 2, o valor da resistividade ou do seu inverso, condutividade, varia bastante com a altura. Isto também justifica porque no modelo utilizar 7 conjuntos RC, e não apenas um.



**Figura 2:** Perfil de Condutividade. FONTE: Tzur and Roble, 1985.

Assim, as resistências podem ser calculadas a partir da seguinte equação:

$$R_{T_i} = \frac{1}{A_T} \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{dz}{\sigma(z)}, \quad (3)$$

em que,  $A_T$  é a área de um raio individual, aproximadamente  $314 \text{ km}^2$ ,  $z_i$  é a altitude a ser estudada na coluna vertical entre 0,35 a 80 km, ou seja, os mesmos valores adotados no cálculo da capacitância.

Segundo Roble, (1991) a corrente vertical para cima da crosta terrestre para a nuvem carregada é, na verdade, um somatório de correntes. Desta forma, diversos componentes de densidade de corrente contribuem para a densidade de corrente total, propostas por Bennett., (2007), que é determinada por:

$$J_S = J_C + J_D + J_T + J_P + J_M + J_W \quad (4)$$

Tais correntes podem ser descritas em função da densidade de corrente onde elas representam um dos parâmetros fundamentais presentes no CEG.

- Correntes de Turbulência ( $J_T$ ): também chamadas de correntes convectivas, são aquelas que ocorrem devido ao movimento térmico do gás na atmosfera, elas são formadas por ventos de alta e baixa velocidade. Sendo então, caracterizadas por serem correntes “naturais” de convecção, onde elas são causadas devido à diferença de pressão e temperatura nas áreas tropicais e polares da Terra.
- Correntes de Descarga ( $J_C$ ): é caracterizada por ser uma corrente que é gerada na emissão do raio, podendo então, chegar a uma magnitude de aproximadamente 30 KA.
- Correntes de Precipitação ( $J_P$ ): são correntes carregadas pelas gotas de chuva.
- Correntes de Maxwell ( $J_M$ ): também chamada de corrente de deslocamento, ocorre quando temos variação temporal do campo elétrico e do campo magnético.
- Correntes de Wilson ( $J_W$ ): ocorre durante uma tempestade, percorrendo a tempestade até a ionosfera, ela caracterizada por se espalhar pela ionosfera/magnetosfera pelas linhas do campo geomagnético, onde tais correntes percorrem o caminho do hemisfério oposto ao que tais foram formadas. São as correntes tangenciais ao campo magnético presente na magnetosfera.

#### I.4 Indutância

Indutância (H) é um parâmetro dos circuitos lineares que relaciona a diferença de potencial induzida por um campo magnético variável à corrente responsável por este campo. Em um circuito, o indutor é caracterizado por ser um dispositivo elétrico passivo que armazena energia na forma de campo magnético. Assim, observando as características físicas de um indutor, é possível observar que ele

é um bom modelo representativo de parte da magnetosfera, e assim teremos que compor um circuito RLC para modelá-la. A indutância é calculada por:

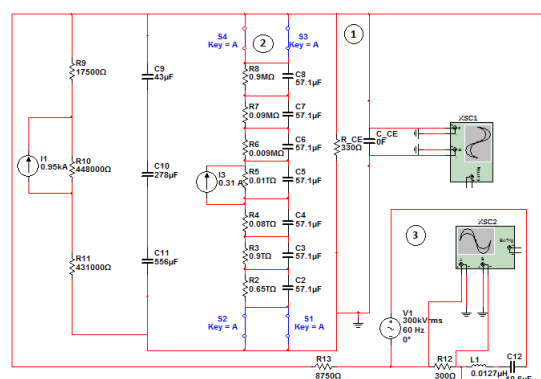
$$L = \frac{B^2}{\mu_0 i^2}, \quad (5)$$

em que  $B$  é o campo magnético,  $\mu$  é a constante magnética para a permissividade no vácuo e  $i$  é a corrente elétrica. Desta forma, o cálculo da indutância o caso da magnetosfera terrestre resultou em um valor de  $1,2732 \times 10^{-8}$  H.

## II. Simulações e Resultados

### II.1 Circuito

O modelo discutido até aqui foi implementado computacionalmente utilizando-se pacotes computacionais do tipo PSpice, específicos para análise numérica de circuitos eletrônicos. Neste caso específico, o usuário somente precisa incluir componentes no circuito e indicar os pontos onde quer obter as leituras de tensão e corrente. O código resolve o sistema, buscando o equilíbrio da malha. O circuito resultante desta implementação é mostrado na figura 3.



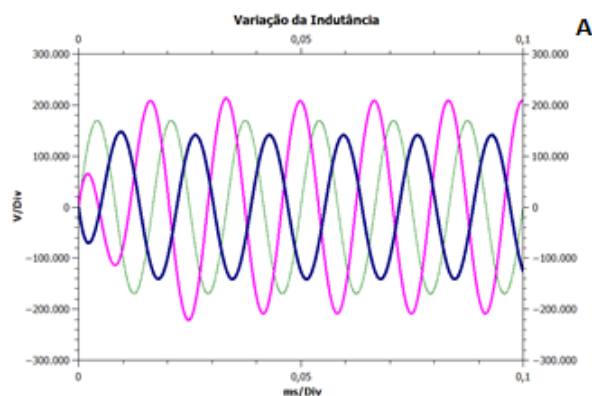
**Figura 3:** Circuito elaborado para realização de simulações.

As áreas de clima equilibrado são dadas por uma resistência de clima equilibrado RCE e uma

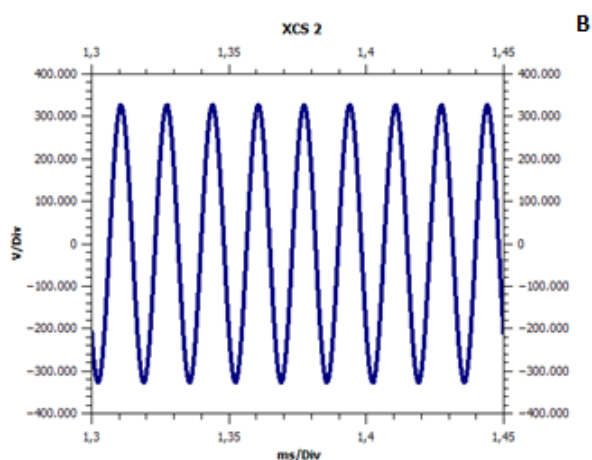
capacitância de clima equilibrado CCE, presentes na região representada com o número 1 na Figura 3. Já os elementos que representam áreas de tempestades são utilizados baseando-se nos efeitos de descarga de um raio individual, modelando-se a produção de diferentes descargas elétricas, utilizando as resistências  $RT_i$  e as capacitâncias  $CT_i$ . No circuito elas estão dispostas em uma coluna (região representada como número 2 na Figura 3), representando a estrutura vertical das resistências e capacitâncias em paralelo, onde a disposição dos elementos representa da altitude de 0,375 km até o topo da ionosfera (aproximadamente 80 km). Em cada uma dessas altitudes, as resistências e capacitâncias presentes na coluna vertical possuem valores que dependem das propriedades físicas do meio em que elas se encontram, tendo em vista o exposto na figura 2.

Sondando ponto a ponto no circuito as correntes e as diferenças de potencial, pode-se conferir que todos os valores batem com os esperados e descritos na literatura. Isto confirma que é um bom modelo para a baixa atmosfera. O comportamento transiente, no entanto, depende fortemente do modelo de fonte utilizado. Uma nova etapa deste trabalho irá se concentrar justamente neste aspecto.

Para o circuito RLC (representado pelo número 3 na Figura 3), foi possível observar que o comportamento do circuito é influenciado pela alteração do valor da indutância, como é mostrado na Figura 4. Onde foi possível observar através de diversas simulações que a amplitude das ondas senoidais eram diretamente proporcionais com o valor da indutância. A onda senoidal azul escura representa o valor da indutância encontrado anteriormente, um valor de aproximadamente  $1,27 \times 10^{-8}$  H. Quando o circuito é acoplado ao circuito da baixa atmosfera, é possível observar que este último não influencia o comportamento da onda senoidal do circuito RLC como pode ser observado na Figura 5.



**Figura 4:** Resultado das simulações realizadas para o circuito RLC variando a indutância.



**Figura 5:** Resultado das simulações realizadas para o circuito RLC.

Foi observado que a indutância possui um papel muito importante e determinante para o comportamento da onda que se observa ao acoplar osciloscópios aos componentes do circuito RLC quando possui altos valores. Entretanto, quando se aplica ao circuito a indutância previamente calculada a partir dos valores para campo magnético e corrente medidos para a magnetosfera terrestre, é possível enfim, observar que o valor da indutância no circuito pode ser considerado desprezível.

## II. CONCLUSÃO

A implementação bem sucedida deste modelo computacional para a o CEG nos permitiu ter um alicerce para futuras investigações. O comportamento DC do circuito é exatamente o esperado, enquanto que o comportamento transiente prescinde de um maior desenvolvimento das fontes, isto é, das "nuvens" inseridas no código. O acoplamento com a magnetosfera, por sua vez, mostrou-se ineficaz. Novos trabalhos serão feitos de modo a entender melhor qual é a configuração mais efetiva, que certamente é mais complexa que um circuito RLC como implementado aqui neste primeiro trabalho.

Ainda nessa área de pesquisa, estamos interessados em modelar com maior detalhes as próprias descargas, tanto aquelas entre a nuvem e o solo, quanto as entre a nuvem e a ionosfera. Este modelo, no entanto, não pode ser resumido a um circuito, apesar de estar acoplado a ele. Os trabalhos que estão sendo feitos neste sentido empregam simulações monte-carlo para o processo da formação de corrente e colunas de plasma sob a ação de um campo elétrico transiente. Este último calculado com base no presente trabalho. Neste cenário, a conexão entre o Sol e a Terra se dá principalmente por intermédio das partículas de altas energias emitidas pelo Sol.

Enfim, esta é uma que foi muito desenvolvida nos últimos 50 anos, principalmente em termos de coleta de dados, mas que ainda não encontrou modelos que expliquem bem os fenômenos observados e que permitam afirmar se realmente há uma relação entre a atividade solar e variações globais no clima terrestre.



## REFERÊNCIAS

- [1] Bennett, Alec., 2007. Measurement of Atmospheric Electricity During Different Meteorological Conditions.
- [2] Bering III, E.A., 1995. The global circuit: Global thermometer, weather by product or climate modulator? *Ver. Geophys.* 845-862.
- [3] Bering III, E.A., Few, A.A., Benbrook, J.R., 1998. The global electric circuit. *Phys. Today* 24-30.
- [4] Haigh, J. D., Cargill, P., *The sun's influence on climate: Princeton primers in climate*, Princeton University Press, Princeton, 2015.
- [5] Lakhina, G.S, 1993. Electrodynamical coupling between different regions of the atmosphere. *Curr. Sci.* 64, 600-666.
- [6] Roble, R.G., Tzur, I., 1986. The global atmospheric electrical circuit. *Study in Geophysics – The Earth's Electrical Environment*. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 206-231.
- [7] Rycroft, M.J., Israelsson, S., Prince, C., 2000. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 62, 1563-1576.
- [8] Rycroft, M.J., Odzimek, A., Arnold, N.F., Füllekrug, M., Kulak, A., Neubert, T., 2007. New model simulation of the global atmospheric electric circuit driven by thunderstorms and electrified shower clouds: The roles of lightning and sprites. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 69, 2485-2509.
- [9] Schellart, P. et al., 2015, *Phys. Rev. Lett.*, in the press.
- [10] Siingh, Devendraa, Singh, R.P., Kamra, A.K., Gupta, P. N., Singh, R., Gopalakrisman, V., Singh, A.K., 2005. Review of electromagnetic coupling between the Earth's atmosphere and the space environment. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 67, 637-658.