



UNICAMP

MAGDA APARECIDA SALGUEIRO DURO

FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO ELÉTRICA NA REGIÃO
SUDESTE DO BRASIL E EFEITOS DO AMBIENTE GEOFÍSICO

Campinas
2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

MAGDA APARECIDA SALGUEIRO DURO

**FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO ELÉTRICA NA REGIÃO
SUDESTE DO BRASIL E EFEITOS DO AMBIENTE GEOFÍSICO**

Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho
Co-orientador: Prof. Dr. Pierre Kaufmann

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica na área de concentração Energia Elétrica.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA MAGDA APARECIDA SALGUEIRO DURO E ORIENTADA PELO PROFESSOR DR. JOSÉ PISSOLATO FILHO.

Campinas
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

D937f Duro, Magda Aparecida Salgueiro, 1968-
Falhas em linhas de transmissão elétrica na região sudeste do Brasil e efeitos do ambiente geofísico / Magda Aparecida Salgueiro Duro. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: José Pissolato Filho.

Coorientador: Pierre Kaufmann.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Atividade solar. 2. Raios cósmicos. 3. Descargas elétricas. 4. Linhas elétricas - Transmissão. 5. Energia elétrica - Transmissão. I. Pissolato Filho, José, 1951-. II. Kaufmann, Pierre. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Power transmission failures in southeastern Brazil and the effects geophysical environment

Palavras-chave em inglês:

Solar activity

Cosmic rays

Electrical discharges

Electric lines - Transmission

Electrical energy - Transmission

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutora em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

José Pissolato Filho [Orientador]

José Sidnei Colombo Martini

Jean Pierre Raulin

Takaaki Ohishi

Geraldo Peres Caixeta

Data de defesa: 11-06-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidata: Magda Aparecida Salgueiro Duro

Data da Defesa: 11 de junho de 2013

Título da Tese: "Falhas em Linhas de Transmissão Elétrica na Região Sudeste do Brasil e Efeitos do Ambiente Geofísico"

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente): _____

Prof. Dr. José Sidnei Colombo Martini: _____

Prof. Dr. Jean Pierre Raulin: _____

Prof. Dr. Takaaki Ohishi: _____

Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta: _____

Handwritten mark or signature

A meus pais e irmãs, pela dedicação e compreensão durante toda a minha vida.

Ao meu esposo Ricardo, pela pessoa especial, dedicada, companheira e compreensiva e que me ajudou muito durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, primeiramente, pela oportunidade da vida, a qual traz ao homem a possibilidade de compreender parte de todo o conhecimento já existente, possibilitando que novos estudos possam ser desenvolvidos. Dessa forma, existirá eternamente o maior, embora pequeno, legado da humanidade, o conhecimento da ciência existente. Compreender a ciência atual permite que novos estudos possam ser realizados e possibilita novas descobertas, desta forma a humanidade tem como construir continuamente o desenvolvimento do seu conhecimento.

Ao meu orientador José Pissolato Filho, por compreender e possibilitar o desenvolvimento desse estudo.

Ao meu co-orientador Pierre Kaufmann, a quem eu irei sempre me lembrar da sua incansável ajuda e cooperação durante a realização desse trabalho.

A meu pai Wilson (em memória) que faleceu 45 dias antes da minha defesa, mas que sempre me apoiou. À minha mãe Cleonice que sempre foi presente em cada momento da minha vida. Às minhas irmãs, Margareth e Mônica, pela possibilidade de compartilhar sempre momentos ímpares entre nós. A você Ricardo, meu esposo, pela paciência, dedicação, amor e carinho que sempre teve por mim, mesmo durante essa difícil fase. A todos meus familiares e amigos que me entenderam, apoiaram e me compreenderam nas horas mais difíceis durante todo o período em que passei ocupada me dedicando aos estudos.

Ao engenheiro elétrico Cyro Vicente Boccuzzi, que possibilitou a minha comunicação com a ISA.CTEEP e tornou possível a obtenção da base de dados utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. A todos da empresa ISA.CTEEP que me auxiliaram para esclarecer dúvidas sobre a base de dados.

Em nome do Dr. Pierre Kaufmann, Coordenador do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), agradeço a todos aqueles ligados ao CRAAM pela ajuda, incentivo e acolhimento, que sem dúvida foram de grande importância.

Aos Doutores, que gentilmente fizeram parte da minha banca examinadora, contribuindo com valiosas sugestões para este trabalho.

“A verdade é filha do tempo, e não da
autoridade.”

Galileo Galilei

RESUMO

A atual dependência da sociedade aos diversos sistemas tecnológicos em funcionamento na Terra traz uma constante preocupação pela sua vulnerabilidade a fatores menos conhecidos. As possíveis falhas no fornecimento de energia elétrica podem ocasionar transtornos de grande impacto às comunidades podendo acarretar perdas financeiras expressivas. Diversos fatores podem ocasionar falhas nas linhas de transmissão, entre eles, os fatores climáticos. Nesse contexto, são pouco conhecidas as influências qualitativas de distintos fatores, destacando-se os efeitos do denominado clima espacial. Há indicações que o clima espacial influencia a alta atmosfera terrestre, com repercussão no clima bem como em sistemas de engenharia em operação na Terra. As redes de transmissão de alta tensão representam um grande circuito elétrico pouco acima do solo sujeito a uma série de sobrecargas temporárias de vários tipos, algumas das quais podem levar a falhas. Algumas destas falhas podem estar relacionadas ao ambiente geofísico. Neste trabalho foi analisada uma base de dados sem precedentes de falhas em linhas de transmissão por um longo período (nove anos) numa grande malha localizada no Estado de São Paulo (sudeste do Brasil). O período estudado (1998-2006) compreende uma significativa fração do ciclo de atividade solar 23. A concessionária responsável (ISA.CTEEP) pela operação das linhas estudadas classifica as falhas em noventa e cinco tipos distintos de causas possíveis, sendo que a maior parte está relacionada às descargas atmosféricas. Este estudo está relacionado aos desligamentos devido às descargas atmosféricas, em duas redes de alta voltagem da companhia, de 138 kV e de 440 kV. No período estudado, estes desligamentos correspondem a 1.957 (42,80%) num total de 4.572 para a linha de 138 kV e de 170 (22,28%) sobre 763 para a linha de 440 kV. Equivale a menos de um a cada dez mil do número total de descargas atmosféricas ocorridas na mesma área, o que demonstra alta resiliência das redes de potência em relação aos raios. Durante a época das chuvas, há uma maior concentração de desligamentos. Para todo o período estudado houve redução de 67% e 77% no número de desligamentos devido às descargas atmosféricas, para as linhas de 138 kV e 440 kV, respectivamente, havendo uma boa correspondência com a redução do número de manchas solares. Nenhuma correlação foi encontrada em relação à atividades geomagnéticas caracterizadas pelo índice planetário (K_p) e pelas grandes tempestades (Dst) tanto em longos quanto em curtos prazos. Uma explicação sugerida associa a diminuição da atividade solar ao aumento da condutividade na atmosfera causada pelo maior fluxo de raios cósmicos. Conseqüentemente poderá ocorrer uma redução do limiar de voltagem necessário para produzir descargas atmosféricas para provocar desligamentos nas redes de alta voltagem. O circuito elétrico global descrito pelo acoplamento ionosfera-terra (a eletrosfera) exerce um papel importante para explicar a redução dos desligamentos. Com o aumento da condutividade atmosférica as descargas são menos potentes, resultando em menor número de desligamentos com o decréscimo do ciclo solar.

Palavras-Chave: Clima espacial, Falhas em linhas de transmissão, Descargas atmosféricas, Tempestades geomagnéticas, Eletrosfera, Condutividade Atmosférica, Atividade Solar, Ciclo Solar.

ABSTRACT

The current society dependence on the operating technological systems on the Earth brings a permanent concern for their vulnerability to not well known factors. Possible failures in electricity supply can cause inconveniences with large impact to the communities, which may cause significant financial losses. Different factors can cause failures in the transmission networks, including, climate factors. In this context, the influences of various qualitative factors, especially the effects of space weather are not well known. There are indications that space weather affects the upper atmosphere, with repercussions on the climate as well as in engineering systems in operation on Earth. High-voltage transmission networks represent large electrical circuits just above the ground which are subjected to a number of transient overcharges of various kinds, some of which may lead to failures. Some failures might be related to anomalies of the geophysical environment. In the present study we analyze a database consisting in a one unprecedented long series of transmission grid failures (nine years) on high-voltage networks located in São Paulo state (southeastern Brazil). The studied period (1998-2006) includes an important fraction of the solar activity cycle 23. The company responsible by the power grid operator (ISA.CTEEP) classifies causes in ninety-five distinct failure classes to explain the transmission grid shut downs. Most of the failures were attributed to atmospheric discharges. We have studied the failures attributed to atmospheric discharge, in the two power grids of the company, 138 kV and 440 kV. The failures attributed to atmospheric discharge correspond to 1.957 (42.80%) for a total 4.572 at 138 kV and to 170 (22.8%) out of 763 at 440 kV. They correspond to less than one ten thousandth of the actual number of atmospheric discharges recorded in the same area, demonstrating the grid's high resilience to breakdowns due to lightning. A clear concentration of failures in the region's thunderstorm season has been found. A significant 67% and 77% reduction in the number of failure rates has been found for the 138 and 440 kV grids, respectively, for the period studied, in good correspondence with the decay in the sunspot numbers. No obvious correlation was found between power failures and geomagnetic activity, represented by (Kp) the planetary index or major geomagnetic storms (Dst) in the period, either on short or on long time scales. One suggested explanation associates the decrease in solar activity to the increased conductivity in the atmosphere caused by increase cosmic ray flux. Consequently there may be a reduction in the threshold voltage necessary to produce discharge atmospheric to cause failures in high-voltage grids. The global electric circuit described by the ionosphere-ground coupling (the electrosphere), plays an important role in explaining the reduction the failures. With increase in conductivity atmospheric discharges are less potent, resulting in fewer failures with the decreasing solar cycle.

Key words: Space Weather, Power Transmission Failures, Atmospheric Discharges, Geomagnetic Storms, Electrosphere, Atmosphere Conductivity, Solar Activity, Solar Cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ejeção de massa de plasma pelo Sol e sua interação com a magnetosfera terrestre. (http://usrlazio.artov.rm.cnr.it/eclisse2006/Interventi_file/lezione1_file/slide0017_image0_96.jpg).....	3
Figura 1.2	A figura representa o estudo realizado pelo meteorologista Meldrum em 1885, onde estão representados o número de ocorrências de ciclones na Índia (linha com marcação x) e o número de grupos de manchas solares (linha contínua) no período de 1847 a 1873. (adaptado de: Hoyt, Schatten, 1997).	4
Figura 2.1	(a) e (b) Propagação de ondas sonoras no interior do Sol com diferentes comprimentos de onda. (Vorontsov, 1992; Silva, 2006). (c) Representação da superfície solar devido à propagação das ondas sonoras em seu interior. (http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/pmode_frame16.jpg)	8
Figura 2.2	Esquema representativo das camadas do interior do Sol: núcleo, camada radiativa, taoclina (camada de interface) e camada convectiva. (adaptado de: http://science.msfc.nasa.gov/ssl).	9
Figura 2.3	Representação da atmosfera solar, em função da altura referida à fotosfera, indicando suas características com relação à temperatura (linha tracejada) e a densidade (linha contínua). O eixo horizontal indica a espessura (em km) das camadas da atmosfera a partir da fotosfera. (adaptado de: BRIGGS, R.P.; CARLISLE, 1996).....	10
Figura 2.4	a) Imagem em luz branca da fotosfera sem manchas solares. (http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/synoptic/sunspots/sunspots_20100423.jpg) (b) Fotosfera com manchas solares (http://atmos.nmsu.edu/~nchanove/images/sun_whitelight.gif)	11
Figura 2.5	A região avermelhada corresponde à cromosfera solar, a qual pode ser observada durante um eclipse solar total. (http://www.ced.ufsc.br/men5185/trabalhos/25_osol/chromos1.gif)	12
Figura 2.6	Imagem da coroa solar durante um eclipse total. (http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/image/0907/corona_vangorp.jpg)	12
Figura 2.7	Representação da região de transição existente na atmosfera solar. (adaptado de: http://solar.physics.montana.edu/ypop/Spotlight/SunInfo/transreg.html)	13
Figura 2.8	Representação esquemática das linhas do campo magnético poloidal do Sol. (http://startswithabang.com/wp-content/uploads/2008/11/080225133649-large.jpg)	14
Figura 2.9	Representação da diferença de velocidade da matéria no interior solar. A cor vermelha indica velocidades mais elevadas. A cor azul indica velocidades mais baixas. É possível perceber que a rotação na região do equador solar é mais rápida do que a dos pólos. (adaptado de: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/internal_rotation_mjt.jpg)	15
Figura 2.10	Representação esquemática da duração da rotação da superfície solar (fotosfera) em diferentes latitudes (adaptado de: http://www.physics.hku.hk/~nature/CD/regular_e/lectures/chap11.html) ...	16
Figura 2.11	Dinâmica das linhas de campo magnético que se modificam de acordo com a evolução de um ciclo solar. Esse processo pode dar origem a polaridades magnéticas localizadas no disco (as manchas). (adaptado de http://zebu.uoregon.edu/~imamura/122/images/solarcycle_B.jpg)	17

Figura 2.12	(a) Representação do campo magnético de manchas solares na superfície do Sol. (http://www.spacearchive.info/2010-01-23-nasa-soho-sun.jpg). (b) ilustração de uma mancha solar, região escura, com temperatura de aproximadamente 2000 K abaixo da superfície solar (fotosfera). (http://www.le.ac.uk/ph/faulkes/web/images/sunspot.jpg).....	18
Figura 2.13	Representações de manchas solares observadas e registradas por Galileu. (http://astroguyz.com/wp-content/uploads/2009/03/galileo-sunspots.jpg)	19
Figura 2.14	Diagrama realizado por Edward Walter Maunder ao estudar a localização das manchas solares ocorridas entre 1874 e 1902 (publicado em 1904). Conhecido como “diagrama de Borboleta”, por sua representação assemelhar-se com as asas de uma borboleta. (Maunder 1904).....	20
Figura 2.15	Representação das manchas solares ocorridas durante o período de 1870 até 2010. O período compreende diversos ciclos solares. (http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif).	20
Figura 2.16	(a) Idealização de arcos magnéticos entre hemisférios (http://sunearthday.gsfc.nasa.gov/2010/images/ttt71-fig5.jpg). (b) Representação de arcos magnéticos que ocorrem a partir das estruturas magnéticas poloidais na superfície e estendem-se até a atmosfera solar, cromosfera e coroa. Imagem UV tomada pelo satélite TRACE (http://www.astro.washington.edu/users/preamp/images/project_images/solarflare105a.jpg).....	21
Figura 2.17 – a)	Representação de manchas solares na superfície do Sol (fotosfera) cujas polaridades são opostas. (http://www.windows2universe.org/sun/images/sunspot_horseshoe_magnet_sm.jpg) (b) Na base do arco magnético se encontram as manchas solares, suas temperaturas são de aproximadamente 1000 a 2000 K abaixo da vizinhança da superfície solar (fotosfera), essa condição possibilita sua visualização por contraste. (adaptado de: http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/images/sunmagnetics.jpg).	21
Figura 2.18	Representação de um par de manchas solares com polaridades opostas dando origem a um arco magnético. As vezes o arco magnético está associado a uma proeminência.	22
Figura 2.19	Representações de vários arcos magnéticos de tamanhos diferentes e dinâmicas distintas que ocorrem na superfície solar. ((a) http://umbra.nascom.nasa.gov/ssu/view2.jpg (b) http://sunearthday.nasa.gov/2008/images/gal_003.jpg)	22
Figura 2.20	Imagem de uma explosão solar, ocorrida em 4 de novembro de 2003. Luz UV intensa é registrada na margem direita do Sol. A linha horizontal que aparece na imagem da explosão solar não é real, ela corresponde ao efeito devido a forte intensidade de luz no detector do instrumento no momento do registro da imagem. A imagem foi feita pelo instrumento <i>Extreme-ultraviolet Imaging Telescope</i> , abordo da espaçonave SOHO. Crédito <i>European Space Agency</i> e NASA. (http://www.nasa.gov/mission_pages/soho/soho_sunquake.html).....	24
Figura 2.21	(a) As proeminências (vistas no limbo) são estruturas quiescentes. (http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/prominence1.jpg) (b) As proeminências são vistas no disco como estruturas escuras. As setas indicam as localizações dos filamentos, visualizados em luz ultravioleta extrema (extreme ultraviolet (EUV)). (http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/0226filament.html) Crédito NASA/ESA.	25
Figura 2.22	Sequência de imagens mostrando a ocorrência de uma CME. (http://genesission.jpl.nasa.gov/science/mod3_SunlightSolarHeat/SolarStructure/cme.jpg).....	26
Figura 2.23	(a) Nesta imagem é possível visualizar um evento denominado de “ <i>halo event</i> ”. Recebe este nome, pois a explosão solar, devido à sua localização, forma uma espécie de halo (circulo luminoso) ao redor do Sol. Crédito SOHO/LASCO. (http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/20020716c2halo.html). (b) Ocorrência de uma explosão solar (<i>flare</i>), em 23 de janeiro de 2012,	

	acompanhada de uma CME. Crédito SOHO/ESA & NASA. (http://www.nasa.gov/multimedia/videogallery/index.html).....	27
Figura 2.24	Representação da velocidade do vento solar em relação às diferentes latitudes. (adaptado de http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/DialPlot.jpg).....	28
Figura 2.25	As imagens, feitas pelo satélite Yohkoh: (a) ilustra um buraco coronal no polo norte (http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/Yohkoh_920508.jpg) (b) ilustra um buraco coronal estendendo-se da região norte para o hemisfério sul, próximo ao centro do Sol. (http://helios.gsfc.nasa.gov/chole.html)	29
Figura 2.26	Imagem ilustrativa da interação do vento solar (linhas brancas) com a magnetosfera terrestre (linhas azuis). O contorno roxo é denominado de arco de choque. (http://www.mps.mpg.de/projects/sun-climate/se_body.html)	29
Figura 2.27	Ilustração dos limites do sistema solar, isto é, limites do campo magnético interplanetário (IMF – <i>Interplanetary Magnetic Field</i>) e vento solar. (adaptado de: http://helios.gsfc.nasa.gov/heliosph.html).....	30
Figura 2.28	(a) Estrutura magnética da Terra mostrando a morfologia dos “Cinturões de Van Allen” onde ficam aprisionadas partículas. (http://www.astronomycafe.net/qadir/ask/vanallen1.jpg) (b) Esquema mostrando a magnetosfera terrestre, sua morfologia e regiões características, e sua interação com o vento solar. (adaptado de: http://media-2.web.britannica.com/eb-media/31/6031-004-89E5D4FB.gif).	31
Figura 2.29	Representação do efeito Forbush para o período de 1º de janeiro de 1998 a 31 de julho de 2006. Período que corresponde a uma importante fração do ciclo solar 23. Número médio mensal de manchas solares (R–linha contínua) e número médio de raios cósmicos galácticos (GCR–linha pontilhada). (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 1998–2006).	32
Figura 2.30	Esquema ilustrativo da geração, absorção e decaimento do isótopo instável 14C. (adaptado de: http://egeology.blogfa.com/post-69.aspx).....	33
Figura 2.31	Perfuração e obtenção de testemunhos de sondagem de gelo. (http://www.horizontegeoografico.com.br/index.php?acao=exibirMateria&materia%5Bid_materia%5D=100). Participação brasileira na travessia chilena do manto de gelo antártico no âmbito da expedição científica Transantártica Internacional (ITASE - <i>International Trans-Antarctic Scientific Expedition</i>) (verão austral 2004-2005).....	34
Figura 2.32	Imagem de um tronco de árvore ilustrando os seus anéis de crescimento. (http://dinamicaterrestre12h.blogspot.com.br/2010/11/dendrocronologia.html)	35
Figura 2.33	Registros das atividades solares estudadas pela média das variações de medidas do isótopo carbono 14 ($\Delta^{14}\text{C}$). Estão representados os períodos onde houve menores e maiores atividades solares. Estão destacados um mínimo que ocorreu por volta de 1040 (mínimo de Oort), o mínimo de <i>Wolf</i> (1282-1342), o mínimo de <i>Spörer</i> (1416-1534) e o mínimo de <i>Maunder</i> (1654-1714). Há também identificado dois máximos; Medieval e Moderno. (adaptado de: http://www.landscheidt.info/?q=node/53).....	36
Figura 2.34	(a) Ilustração de uma CME e seu deslocamento no meio interplanetário atingindo o campo magnético terrestre (http://inhabitat.com/solar-wind-energy-could-provide-100-billion-times-earths-energy-needs/sunwaves/). (b) Ilustração da interação de uma atividade solar com alguns dos possíveis efeitos no planeta Terra. (adaptado de: http://nexusilluminati.blogspot.com.br/2011/09/solar-flare-could-unleash-nuclear.html).....	37

Figura 2.35	As fotografias (a) e (b) ilustram a ocorrência de auroras (a) http://danielltuc.blogspot.com.br/2010/10/aurora-boreal.html (b) http://tvcanal7.blogspot.com.br/2012/06/aurora-boreal-e-aurora-austral.html	38
Figura 2.36	Registro do observatório Kew para os dias 1 e 2 de setembro de 1859. No eixo horizontal tem-se a escala de tempo em UT (<i>Universal Time</i>). No eixo vertical está registrada a componente força horizontal do campo magnético terrestre ($1\gamma = 10^{-5}$ Gauss). Às 11h15 UT do dia 1º de setembro há a indicação da representação do registro correspondente ao pico da grande atividade magnética que se seguiu 17,6h depois levando o registro para fora da escala. (adaptado de: Stewart 1986 e Bartels, 1937 apud Cliver, e Svalgaard,2004).....	42
Figura 2.37	Transformador supostamente destruído em 13 de março de 1989 pela ocorrência de tempestade geomagnética de grande proporção associada a uma explosão solar. (adaptado de: Severe Space Weather Events, 2008).....	44
Figura 2.38	(a) histograma com média anual de distribuição diária de GIC (amplitude máxima >10A) entre os anos de 1999-2005 (b) número médio anual de manchas solares (SSN) referente ao ciclo solar 23 no mesmo período (Huttunen et al. 2008).....	45
Figura 2.39	Representação de um modelo do circuito elétrico global equivalente entre a superfície terrestre e a alta atmosfera (ionosfera) apresentado por Rycroft et al. (2000). (a) No diagrama superior está ilustrada uma parte do circuito elétrico global, sendo que do lado esquerdo está uma região de tempestade responsável por fechar o circuito elétrico (descargas atmosféricas). As setas em negrito representam as correntes elétricas. No centro há uma distribuição de cargas positivas indicando uma região de tempo bom. (b) No diagrama inferior, está representado um circuito elétrico equivalente para (a), ilustrando resistores para as regiões de bom tempo e de tempestade. (adaptado de: Rycroft et al. 2000).....	47
Figura 3.1	Esquema simplificado do sistema elétrico (geração, transmissão, conversão, distribuição e consumo) (adaptado de: http://www.ebah.com.br/content/ABAAABcoUAF/trabalho-escrito-transmissao-media-tensao).....	49
Figura 3.2	Fotos de linhas de transmissão de alta tensão. (http://www.energianobrasil.com.br/category/linhas-de-transmissao/).....	49
Figura 3.3	Representação das redes de transmissão de alta tensão das linhas de 138 kV (linhas pretas) e 440 kV (linhas cinzas) da ISA.CTEEP no Estado de São Paulo. As coordenadas geográficas da cidade de São Paulo são 23°32'51''S e 46°38'10''W.	53
Figura 3.4	Localização do Brasil na América do Sul e do Estado de São Paulo que está no centro da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA – <i>South American Geomagnetic Anomaly</i>), adaptado a partir do mapa geomagnético da <i>NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION</i> (2010).....	54
Figura 3.5	Total dos desligamentos mensais da rede de transmissão de 138 kV atribuídas às descargas atmosféricas. Há um número expressivo de ocorrências durante o período das chuvas (outubro – março) e uma queda progressiva para anos sucessivos	57
Figura 3.6	Total dos desligamentos mensais da rede de transmissão de 440 kV atribuídas às descargas atmosféricas. As tendências são similares à distribuição dos eventos em 138 kV, apresentando um decréscimo nos anos sucessivos e um número expressivo de ocorrências durante o período das chuvas (outubro – março).	58

Figura 4.1	Representação do número de manchas solares durante o ciclo solar 23 e as do início do ciclo solar 24. A linha preta mais intensa indica uma previsão para o ciclo de manchas solares para o restante do ciclo solar 24. (http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml).....	59
Figura 4.2	Desligamentos por descargas atmosféricas nas redes de transmissão 138 kV e 440 kV comparados com índices geomagnéticos Kp e Dst. Médias mensais dos índices e totais mensais de desligamentos são mostradas em (a) e valores diários são mostrados em (b) para o ano de 2003.....	61
Figura 4.3	O painel inferior apresenta as médias anuais de manchas solares (R) e fluxo de raios cósmicos (CR) (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION 1998-2006). No painel superior estão os totais anuais dos desligamentos por descargas atmosféricas nas redes de transmissão de 138 kV (linha contínua) e 440 kV (linha tracejada).	63
Figura 4.4	(a) Diagrama de espalhamento para os totais anuais dos desligamentos em consequência das descargas atmosféricas para a linha de transmissão de 138 kV e as médias anuais de manchas solares (R) (b) Diagrama de espalhamento para os totais anuais dos desligamentos em virtude das descargas atmosféricas para a linha de transmissão de 440 kV e as médias anuais de manchas solares (R).	64
Figura 4.5	No painel inferior estão os valores médios mensais de manchas solares (R) e fluxo de raios cósmicos (CR) (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION 1998-2006). O painel superior mostra o total mensal dos desligamentos causadas pelas descargas atmosféricas nas redes de transmissão de 138 kV (linha contínua) e 440 kV (linha tracejada).	65
Figura 4.6	Para o ano de 2003 estão representados: no painel inferior os valores diários de manchas solares e fluxo de raios cósmicos (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION 1998-2006). O painel superior indica o total diário dos desligamentos devido às descargas atmosféricas nas linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV.	66
Figura 4.7	Totais anuais de raios nuvem-solo (linha cinza tracejada) na região sudeste do Brasil (Pinto 2009), para o período de 1999-2006, detectado pela rede de sensores de raios do Brasil, comparado com o número médio anual de manchas solares (R) (linha preta contínua).	68
Figura 5.1	Representação de um modelo do circuito elétrico equivalente global da ionosfera apresentado por Rycroft (2006). Do lado direito está ilustrada a região de tempo bom, representada por uma certa resistência em paralelo com a capacitância entre as duas superfícies condutoras. Do lado esquerdo está ilustrada a região de tempestades, onde os interruptores servem para fechar o circuito devido às descargas atmosféricas, que são equivalentes aos geradores.	71
Figura 5.2	O aumento dos raios e da ionização na troposfera devido aos raios cósmicos (Stozhkov et al. 2001a). (a) aumento médio anual da corrente na atmosfera J(h) (círculos vazios) e fluxo de raios cósmicos N(h) para h = 8 km na região polar (círculos cheios). (b) aumento do número anual de relâmpagos (L) detectados nos Estados Unidos (círculos cheios) e taxa de produção de íons em coluna de ar (q) (2–10 km) em latitudes médias (círculos vazios).	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Diferentes períodos de rotação, devido à variação das velocidades nas diferentes latitudes do Sol. A rotação diferencial da fotosfera foi feita pelo instrumento MDI a bordo do satélite SOHO. (Silva, 2006).....	15
Tabela 2	Classificação do índice Kp com escala do clima espacial segundo a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para as tempestades geomagnéticas e suas respectivas descrições.....	40
Tabela 3	Classificação do índice Dst para tempestades geomagnéticas e suas respectivas descrições.	41
Tabela 4	Extensão de nove das linhas de transmissão da concessionária de energia ISA. CTEEP (período de 1998-2006).....	51
Tabela 5	Percentuais das interrupções devido às 10 primeiras causas para a rede de 138 kV da ISA.CTEEP para todo o período (1 ^o de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006).....	55
Tabela 6	Percentuais das interrupções devido às 10 primeiras causas para a rede de 440 kV da ISA.CTEEP para todo o período (1 ^o de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006).....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CI - Causas Indeterminadas
- CME - *Coronal Mass Ejections* – Ejeção de Massa Coronal
- CR - Cosmic Ray – Raios Cósmicos
- DA - Descargas Atmosféricas
- DCA - Desligamentos por Descargas Atmosféricas
- DCI - Desligamentos por Causas Indeterminadas
- Dst - *Disturbance Storm Time* – Índice que mede atividade geomagnética
- EUV - *Extreme UltraViolet* – UltraVioleta Extremo
- GCR - *Galactic Cosmic Ray* – Raios Cósmicos Galácticos
- GIC - *Geomagnetic Induced Currents* – Correntes geomagnéticas induzidas
- IMF - *Interplanetary Magnetic Field* – Campo Magnético Interplanetário
- Kp - *Planetary Kennziffer* – Índice Planetário
- LASCO - *Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment*
- NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
- NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*
- OSO - *Orbiting Solar Observatory*
- R - *Sunspot Number* – Manchas Solares
- RA - Regiões Ativas
- SAGA - *South American Geomagnetic Anomaly* – Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul
- SOHO - *Solar and Heliospheric Observatory*
- UT - Universal Time – Hora Universal
- UV - *UltraViolet* – UltraVioleta

ARTIGO TÉCNICO PUBLICADO EM PERIÓDICO

Duro, Magda A. S.;Kaufmann, Pierre; Bertoni, Fernando C. P.; Rodrigues, Emilio C. N.; Filho, José Pissolato. **Long-Term Power Transmission Failures in Southeastern Brazil and the Geophysical Environment**. *Surveys in Geophysics*, v. 33, p. 110-111, 2012. DOI: 10.1007/s10712-012-9191-1.

RESUMOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

Duro, Magda A. S.;Kaufmann, Pierre; Bertoni, Fernando C. P.; Rodrigues, Emilio C. N.; Filho, José Pissolato. **Solar cycle 23 and electrical transmission power failures in south-east of Brazil**. *International Living with a star*, Ubatuba, São Paulo. Brazil. 2009.

Duro, Magda A. S.;Kaufmann, Pierre; Bertoni, Fernando C. P.; Rodrigues, Emilio C. N.; Filho, José Pissolato. **Descargas atmosféricas e desligamentos em linhas de transmissão no sudeste do Brasil durante o ciclo solar 23**. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia (SBGEA) São Paulo, SP . Brasil. 2012 .

10 a 14 de setembro de 2012 – São Paulo – SP

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	O SOL COMO ESTRELA	7
2.1.	O INTERIOR DO SOL	8
2.2.	A ATMOSFERA SOLAR	10
2.3.	CAMPO MAGNÉTICO SOLAR	13
2.4.	MANCHAS SOLARES	17
2.5.	ATIVIDADE SOLAR.....	23
2.5.1.	Explosões solares	23
2.5.2.	Proeminências.....	24
2.5.3.	Ejeção de Massa Coronal.....	25
2.6.	VENTO SOLAR.....	27
2.7.	RELAÇÕES SOLARES TERRESTRES	30
2.7.1.	Efeitos na alta atmosfera terrestre.....	37
2.7.2.	Efeitos nos sistemas tecnológicos.....	39
3.	REDES DE TRANSMISSÃO ELÉTRICA	49
3.1.	AS LINHAS DE TRANSMISSÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO	50
3.2.	SELEÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138 kV E 440 kV	51
4.	ATIVIDADE SOLAR NO CICLO 23 E DESLIGAMENTOS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138 kV E 440 kV	59
4.1.	CORRELAÇÕES ENTRE ATIVIDADE SOLAR E DESLIGAMENTOS	60
4.1.1.	Falhas nas redes de transmissão e índices geomagnéticos	60
4.2.	MANCHAS SOLARES (<i>R</i>) E RAIOS CÓSMICOS (<i>CR</i>).....	62
4.2.1.	Análise em grande escala de tempo (anual)	62
4.2.2.	Análise de falhas em escalas mensais.....	64
4.2.3.	Análise de falhas em curtas escalas de tempo	66
4.3.	INCIDÊNCIA DE RELÂMPAGOS	67
5.	DISCUSSÃO DAS CORRELAÇÕES	69
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico no século XX e início do século XXI trouxe facilidades operativas ao cotidiano de diversas comunidades, as quais puderam usufruir de condições físicas e materiais mais confortáveis no seu dia a dia. Um fator importante neste novo cenário foi o acesso à energia elétrica, caracterizando-se por ser essencial às indústrias, ao comércio, aos hospitais, às escolas, entre outros e aos sistemas tecnológicos (como os de comunicações) e a outros serviços que atendem as necessidades da sociedade atual.

Qualitativamente o suprimento da energia elétrica atingiu elevados índices de confiabilidade nos dias de hoje. Não obstante esses serviços podem apresentar falhas que são motivos de preocupação pelos seus impactos aos usuários e às suas consequências.

As interrupções no fornecimento da energia elétrica podem ocorrer por falha na geração, na transmissão ou na distribuição. Uma falha pode ter duração de fração de minuto a horas, podendo chegar a dias em alguns casos. Suas causas podem ter várias origens como se verá mais adiante.

Há um século uma interrupção no fornecimento de energia elétrica não traria tantos transtornos como nos dias atuais, quando uma interrupção, dependendo da sua duração, pode trazer transtornos de grande impacto às comunidades, como por exemplo, perdas financeiras expressivas. As consequências devido às falhas no fornecimento de energia elétrica vão desde impactos a serviços de primeira necessidade, interrupção de processos industriais, agropecuários, danos a equipamentos eletrônicos, perdas financeiras, prejuízos sociais no que se refere a hospitais, entre outros. Além disso, podem-se acrescentar situações de desconforto no convívio dos indivíduos sejam nas suas atividades profissionais, familiares ou de lazer.

Os sistemas de energia são reconhecidamente vulneráveis às perturbações nas linhas de transmissão que podem ser interrompidas, repercutindo na distribuição de energia elétrica. A qualidade na transmissão e na distribuição de energia elétrica depende de vários fatores, tais como: qualidade técnica das redes, transformadores, gerenciamento das linhas

de transmissão, qualificação do pessoal envolvido nas manobras dos sistemas de energia, qualidade da manutenção dos equipamentos, fatores climáticos, entre outros. Um fator de preocupação constante é a vulnerabilidade a transitórios de várias origens, entre os quais se incluem as variações climáticas terrestres. Nesse contexto, são pouco conhecidas as influências qualitativas de fatores menos compreendidos, destacando-se os efeitos do denominado clima espacial.

O clima espacial é controlado pela atividade solar. O Sol passa por máximos e mínimos de atividade em períodos de aproximadamente 11 anos, o denominado ciclo solar. A atividade solar apresenta diferentes manifestações com possibilidade de interferir no clima espacial. Este regime pode trazer impactos às variações climáticas terrestres por meio de acoplamentos ainda pouco conhecidos e motivo de intensas pesquisas. Os impactos na superfície da Terra que podem ser causados pela atividade solar, estão relacionados desde o funcionamento inadequado de sistemas tecnológicos em geral, sistemas espaciais e serviços via satélite, além dos diferentes efeitos na biosfera terrestre, incluindo impactos ambientais.

Uma forma de proteção natural do planeta Terra em relação à atividade solar é a denominada magnetosfera terrestre. A magnetosfera define uma cavidade em torno do planeta definida pelo campo magnético terrestre. A dinâmica da magnetosfera é influenciada pela precipitação de partículas emanadas do Sol, como o vento solar e massas ejetadas em transientes que, permanentemente bombardeiam o planeta sendo fortemente relacionado à atividade solar. A magnetosfera é responsável por blindar o planeta dessas partículas.

A atividade explosiva do Sol é gerada na sua atmosfera. A energia é liberada na forma de radiação eletromagnética e de partículas aceleradas no espaço interplanetário. Na Figura 1.1 está representada a emissão de partículas pelo Sol e sua interação com a magnetosfera terrestre. Na figura a linha arroxeadada representa o arco de choque, linha mais externa, local onde o vento solar é freado pela sua interação com o campo terrestre. As linhas azuis representam a magnetosfera terrestre (blindagem natural do planeta em relação à interação do meio interplanetário). Do lado do Sol a magnetosfera é comprimida. Do lado oposto ela se estende formando o que se denomina de cauda. Um subproduto visual dessa

interação são as denominadas auroras boreal (ocorre no hemisfério norte do planeta) e austral (ocorre no hemisfério sul).

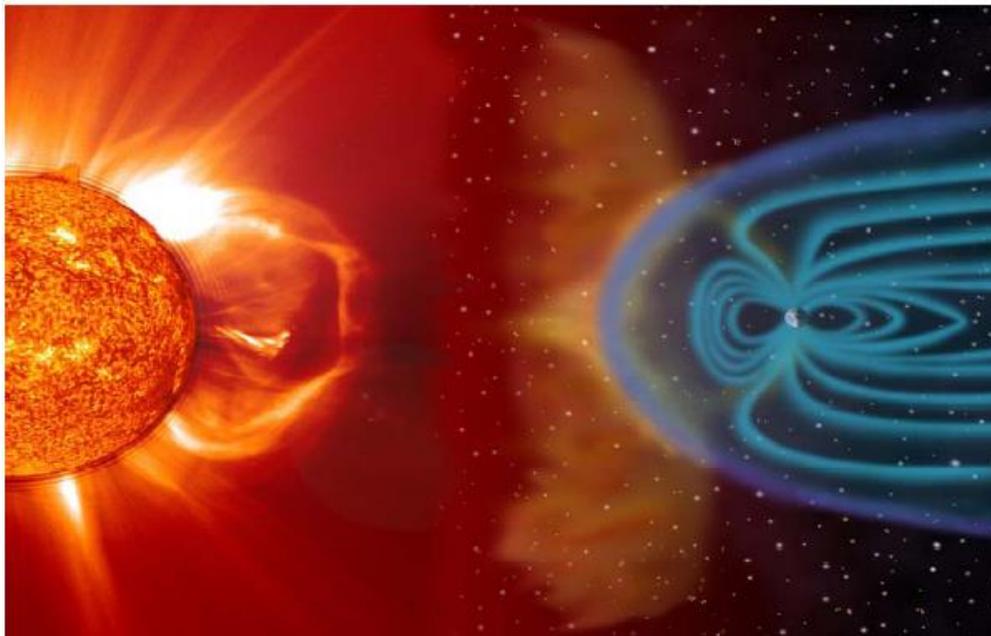


Figura 1.1 – Ejeção de massa de plasma pelo Sol e sua interação com a magnetosfera terrestre. (http://usrlazio.artov.rm.cnr.it/eclisse2006/Interventi_file/lezione1_file/slide0017_image096.jpg).

Alguns fenômenos terrestres parecem ser influenciados pelas variações da atividade solar em períodos curtos e longos. Esses fenômenos são motivo de pesquisas, as quais buscam compreender as mudanças climáticas terrestres em função da atividade solar. O meteorologista britânico Meldrum na Índia, em 1885, considerou o número de ocorrências de ciclones na Índia no período de 1847 a 1873 e o correlacionou com o número de grupos de manchas solares no mesmo período (Figura 1.2). O estudo parece sugerir uma forte correlação entre as bases de dados representadas. A publicação inspirou muitas outras pesquisas para investigar uma possível relação das variações do meio interplanetário controlado pela atividade solar e suas influências no clima terrestre.

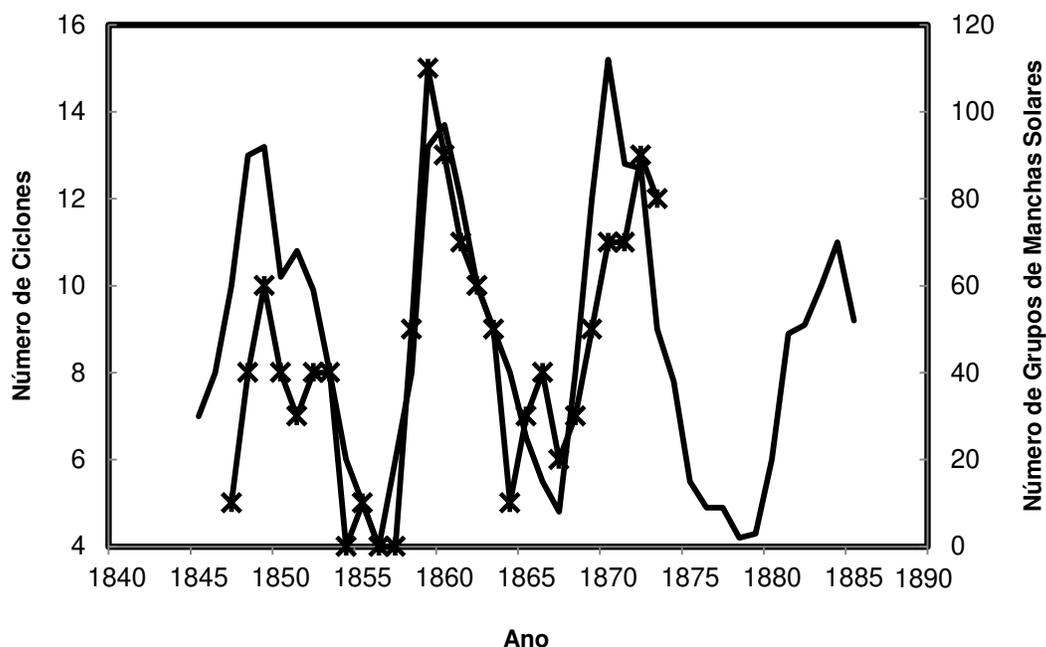


Figura 1.2 – A figura representa o estudo realizado pelo meteorologista Meldrum em 1885, onde estão representados o número de ocorrências de ciclones na Índia (linha com marcação x) e o número de grupos de manchas solares (linha contínua) no período de 1847 a 1873. (adaptado de: Hoyt, Schatten, 1997).

Um estudo realizado por Mauas, Flamenco e Buccino (2008) faz uma análise relativa à vazão do rio Paraná localizado no sudeste do Brasil e o número de manchas solares num período que compreende praticamente 100 anos. Uma forte correlação foi encontrada sugerindo uma possível relação entre a atividade solar e a vazão do rio Paraná. Compreender melhor os resultados possibilitaria uma possível previsão para inundações, as quais podem acarretar grandes impactos sociais e econômicos.

Entender como o clima terrestre pode ter sido influenciado pela atividade solar no passado (antiguidade) tornou-se possível devido à presença de isótopos como o berílio-10 e o carbono-14 (entre outros), que estão presentes nos anéis de crescimento de árvores e em testemunhos de gelo. Como exemplo, pode-se destacar a Era Medieval, período no qual as temperaturas foram elevadas. Esse período corresponde a uma fase de intensa atividade solar. Já no século XVII, houve a mini Era do Gelo, período caracterizado por baixas temperaturas correspondendo a um longo período de baixa atividade solar.

Outros estudos realizados sobre a atividade solar e suas influências no planeta Terra têm sido realizados. Uma preocupação atual está relacionada a possíveis falhas, não

explicadas, nos sistemas tecnológicos. Compreender como eles podem ser afetados por vários processos elétricos que ocorrem na atmosfera, os quais estão correlacionados com a atividade solar, passou a ser uma área de estudo para a comunidade científica, uma vez que se pretende conhecer melhor os fenômenos e implicações com o objetivo de melhor proteção dos sistemas. Os estudos se tornam de grande relevância devido à grande dependência, da sociedade em relação aos sistemas tecnológicos existentes, como os que envolvem telecomunicações, geração, transmissão e distribuição de energia, gasodutos, equipamentos médicos, sistemas de posicionamento global (GPS), entre outros.

Dentro deste contexto, pretende-se com este trabalho contribuir para uma melhor compreensão do relacionamento Sol-Terra em relação aos desligamentos, devido às descargas atmosféricas, que ocorreram em linhas de transmissão na região sudeste do Brasil, em um período que compreende uma significativa fração do ciclo solar 23. Este trabalho se justifica pelo fato de se tentar compreender melhor como pode a atividade solar durante os seus ciclos, possivelmente, influenciar desligamentos em linhas de transmissão devido às descargas atmosféricas, em períodos longos. Compreender essa influência poderá possibilitar um melhor entendimento por parte das concessionárias de energia elétrica sobre possíveis desligamentos futuros que possam ocorrer, minimizando perturbações para a sociedade e prováveis perdas financeiras.

Neste trabalho analisou-se uma base de dados de longa duração de desligamentos em linhas de transmissão localizadas no sudeste do Brasil no período de 1^o de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006. Os principais índices utilizados para especificar o ambiente geofísico foram o número de manchas solares (R), o índice magnético planetário (Kp), o índice magnético que mede a atividade geomagnética, utilizado para avaliar a intensidade das tempestades geomagnéticas (Dst) e a incidência de raios cósmicos no solo.

No Capítulo 2 é apresentada a base científica relacionada ao trabalho desenvolvido. O estudo foi feito por meio de uma revisão bibliográfica na qual foram especificados conceitos sobre o Sol e o que se conhece da sua atividade, o meio interplanetário, a influência da atividade solar no planeta Terra, descrições dos índices

utilizados para especificar o ambiente geofísico, além de apresentar alguns efeitos ocorridos, em função de correntes geomagneticamente induzidas (GIC), em sistemas tecnológicos bastantes conhecidos.

No Capítulo 3 são realizadas análises sobre a base de dados obtida, bem como a discussão para a seleção da escolha das linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV localizadas no sudeste do Brasil e os desligamentos devido às descargas atmosféricas.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da análise realizada em períodos diários, mensais e anuais, para os desligamentos nas linhas de transmissão selecionadas, devido às descargas atmosféricas ocorridas no período de 1^o de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006.

O Capítulo 5 apresenta discussão dos estudos realizados, comparando os índices utilizados para especificar o ambiente geofísico e os desligamentos ocorridos nas linhas de transmissão devidos às descargas atmosféricas no período estudado. Foi investigada a ocorrência de GICs no período mostrando não haver influência em desligamentos nas linhas de transmissão. A eletrosfera constituída pela ionosfera na alta atmosfera e a superfície da Terra, equivalendo a um circuito elétrico global, mostrou ser adequada para explicar a associação entre atividade solar de longo prazo e os desligamentos em linhas de transmissão.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões principais, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. O SOL COMO ESTRELA

A sobrevivência do ser humano está atrelada a vários fatores, como a água, o ar, o alimento, mas é a energia solar o principal fator da existência da vida sobre o planeta Terra. Sem essa característica não haveria vida, pelo menos não da forma que se conhece, sendo o Sol a principal fonte de energia e luz para o planeta Terra. Uma pergunta que surge é: de onde vem a energia solar? Para responder a essa pergunta é preciso entender um pouco mais sobre essa estrela.

O homem sempre compreendeu a importância do Sol para a sua existência. A maioria das civilizações antigas admirava a imponência do Sol e o adorava como um deus. Diversas civilizações da antiguidade realizaram observações do Sol, mas foi por volta do ano 1600 que se questionou se as estrelas e o Sol seriam objetos do mesmo tipo. Atualmente, sabe-se que o Sol é uma estrela entre aproximadamente 10^{11} estrelas em nossa galáxia.

Por volta do ano 1610, Galileu com o uso de um telescópio passou a realizar projeções da imagem do Sol. Ao estudá-las, identificou a presença de manchas no disco solar e passou a observar e registrar as suas ocorrências. Atualmente, sabe-se que as manchas solares estão relacionadas com o ciclo de atividade solar, como será apresentado mais adiante (Briggs e Carlisle, 1996).

Estudos sobre o Sol passaram a ser realizados e publicados por diversos estudiosos. O físico alemão Hans Albrecht Bethe, no ano de 1939, encontrou uma explicação para a fonte de energia das estrelas. Ela é proveniente de reações nucleares em altas temperaturas que ocorrem na região central das estrelas. Segundo Bethe (1939) a temperatura no núcleo do Sol é de aproximadamente 15 milhões de graus Kelvin. Atualmente, os estudos realizados sobre o Sol são diversos, pois a comunidade científica tem interesse em compreender melhor sua estrutura interior bem como as origens dos fenômenos solares e conseqüentemente a sua atividade.

O Sol é basicamente dividido em duas regiões: interior e atmosfera. A região que vai do centro até a sua superfície é denominada de interior solar e é dividida em

camadas: o núcleo, a camada radiativa, a camada de interface (denominada de tacoclina) e a camada convectiva. Acima da superfície do Sol, está a sua atmosfera a qual se subdivide em camadas: a fotosfera, a cromosfera e a coroa. A composição química do Sol é basicamente de 92,1% de hidrogênio (H), 7,8% de gás hélio (He) e uma mistura de elementos mais pesados principalmente como: oxigênio (O), carbono (C), nitrogênio (N), silício (Si), magnésio (Mg), néon (ou neônio) (Ne), ferro (Fe) e enxofre (S) que compõem o 0,1% restante. O raio solar é de aproximadamente 695.000 km que equivale a 109 vezes o raio da Terra (Zirin, 1988).

2.1. O INTERIOR DO SOL

O conhecimento que se tem do interior solar é inferido por modelos de estrutura estelar e testado por modelos e observações de heliossismologia.

Heliossismologia estuda o interior solar a partir das oscilações observadas em sua superfície, as quais são causadas pelas ondas sonoras que se propagam em diferentes profundidades do interior do Sol (Figura 2.1, Vorontsov, 1992).

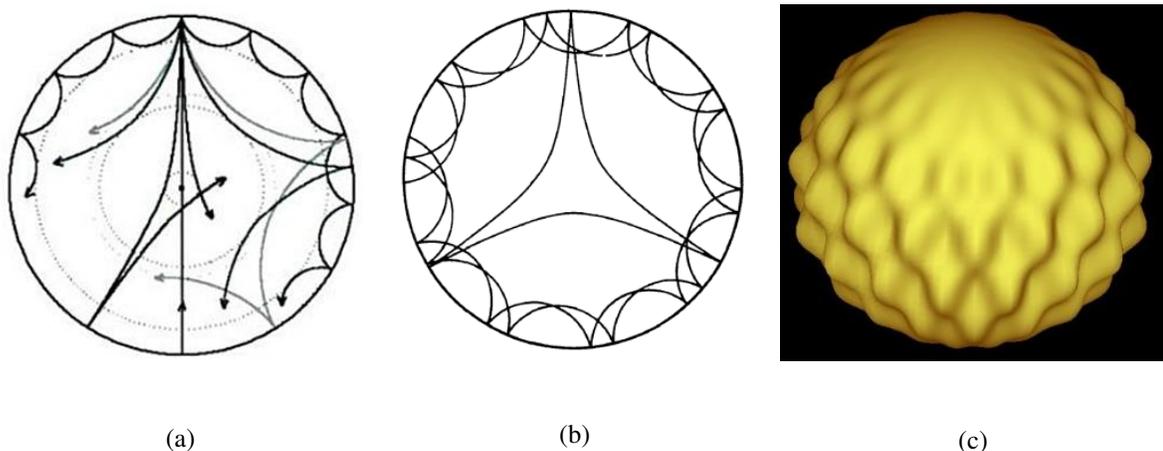


Figura 2.1 – (a) e (b) Propagação de ondas sonoras no interior do Sol com diferentes comprimentos de onda. (Vorontsov, 1992; Silva, 2006). (c) Representação da superfície solar devido à propagação das ondas sonoras em seu interior. (http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/pmode_frame16.jpg)

A Figura 2.2 ilustra um esquema simplificado das camadas do interior solar.

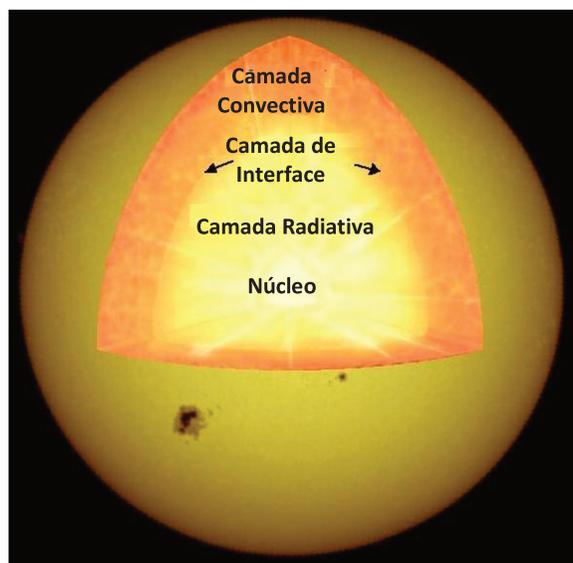


Figura 2.2 – Esquema representativo das camadas do interior do Sol: núcleo, camada radiativa, tacoclina (camada de interface) e camada convectiva. (adaptado de: <http://science.msfc.nasa.gov/ssl>).

O núcleo é a região mais interna e corresponde a aproximadamente a um quarto do raio solar ($0,25R_{\odot}$) tendo aproximadamente, 10% da massa solar. É no núcleo que ocorrem as reações nucleares que são responsáveis pela fonte de energia do Sol, sendo que a sua temperatura é de aproximadamente 15 milhões de graus Kelvin.

A próxima camada é a radiativa. Sua extensão vai a partir do núcleo até 70% do raio solar (de $0,25R_{\odot}$ a $0,70R_{\odot}$), sendo que ela age como um isolante natural o que ajuda a manter a alta temperatura do núcleo. Também é responsável por transportar para a parte externa da estrela a energia gerada no núcleo.

Outra camada é a convectiva. Sua extensão vai a partir de 70% do raio solar (final da camada radiativa) até a superfície solar. Nessa camada a energia é transportada até a superfície solar na sua maior parte por convecção.

Entre a camada radiativa e a convectiva existe uma camada muito fina, denominada tacoclina. A tacoclina está localizada a partir do final da camada radiativa $0,70R_{\odot}$ e tem aproximadamente $0,019R_{\odot}$. Do lado interno da tacoclina estão o núcleo e a camada radiativa, e do lado externo está a camada convectiva. A energia transportada do núcleo à superfície solar, fotosfera, tem início na camada radiativa e passa pela camada

convectiva. A temperatura de aproximadamente 15 milhões de graus Kelvin no núcleo decai para 5800 K na fotosfera (fina camada da atmosfera solar).

2.2. A ATMOSFERA SOLAR

Devido ao Sol ser um elipsóide de gás, não há uma superfície propriamente dita. Assim, a sua superfície é definida como a região a partir da qual não é possível visualizar as camadas interiores. É como se toda a luz solar fosse emitida a partir dessa região.

A Figura 2.3 ilustra os perfis das três camadas da atmosfera solar: fotosfera, cromosfera e coroa. As linhas tracejada e contínua representam a variação da temperatura e da densidade, respectivamente, na atmosfera solar em função da altura.

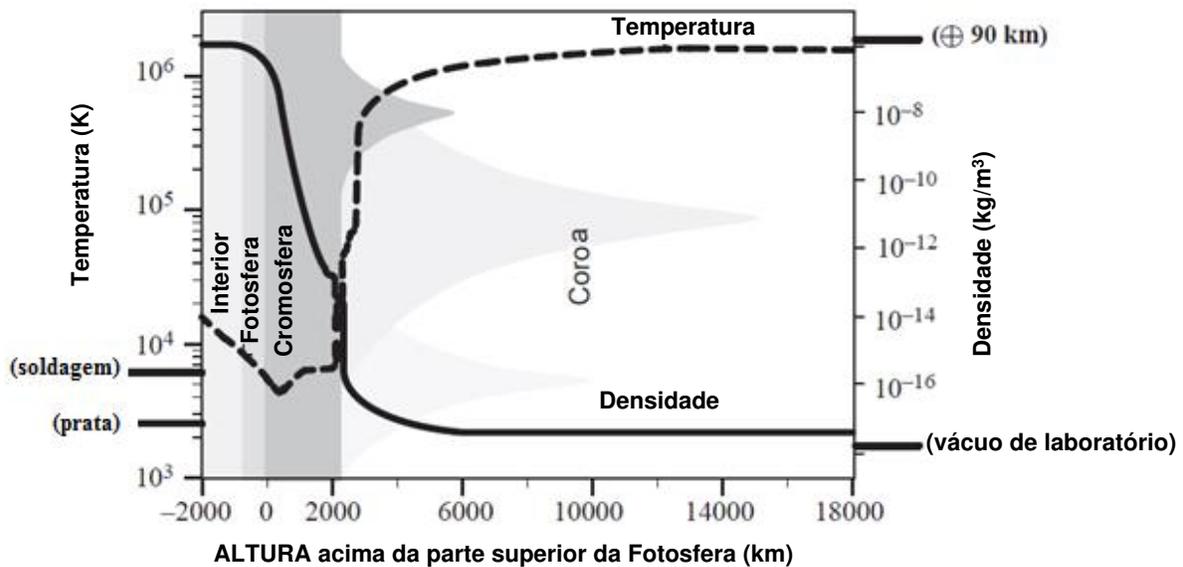


Figura 2.3 – Representação da atmosfera solar, em função da altura referida à fotosfera, indicando suas características com relação à temperatura (linha tracejada) e a densidade (linha contínua). O eixo horizontal indica a espessura (em km) das camadas da atmosfera a partir da fotosfera. (adaptado de: Briggs, Carlisle, 1996).

A fotosfera é a parte visível do Sol e sua espessura é de aproximadamente 500 km, sendo uma região relativamente fria, com temperatura de aproximadamente 5800 K. As manchas solares que surgem e desaparecem durante um ciclo solar são visíveis

em luz branca nessa camada (Figura 2.4) devido às suas temperaturas serem em torno de 1000 a 2000 K inferior ao restante da temperatura dessa camada.

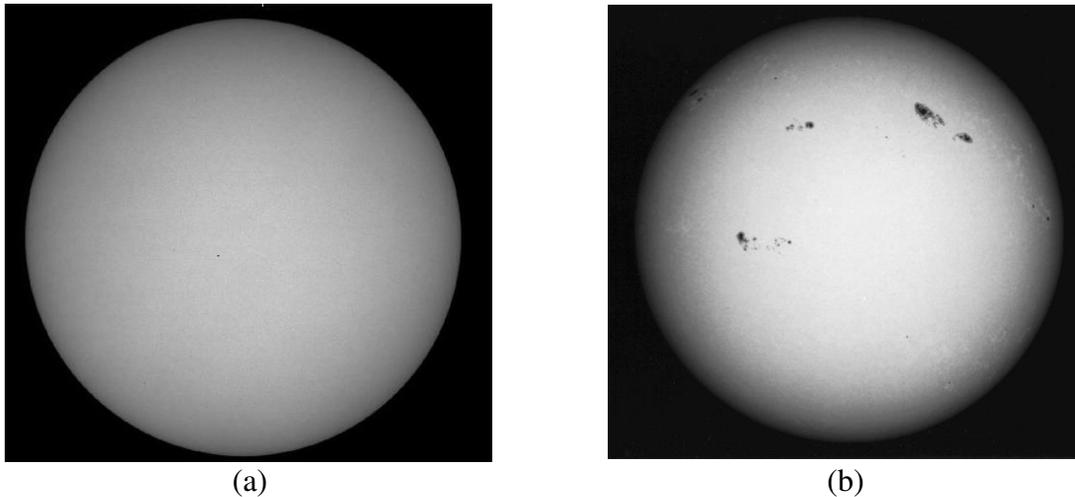


Figura 2.4 – a) Imagem em luz branca da fotosfera sem manchas solares. (http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/synoptic/sunspots/sunspots_20100423.jpg) (b) Fotosfera com manchas solares (http://atmos.nmsu.edu/~nchanove/images/sun_whitelight.gif)

A próxima camada da atmosfera é a cromosfera, possuindo uma cor avermelhada. Durante os eclipses solares totais é possível visualizá-la, uma vez que a Lua serve como um anteparo natural, isto é, no momento máximo total do eclipse a Lua bloqueia a emissão de luz da fotosfera, faixa do visível do Sol. A região visível nessa situação corresponde à cromosfera, Figura 2.5. A temperatura nessa camada varia de 10 000 a 20 000 K. A sua extensão vai desde a fotosfera e varia de dezenas a milhares de quilômetros de acordo com a necessidade dos autores ajustarem sua extensão aos seus modelos (Zirin, 1988).



Figura 2.5 – A região avermelhada corresponde à cromosfera solar, a qual pode ser observada durante um eclipse solar total. (http://www.ced.ufsc.br/men5185/trabalhos/25_osol/chromos1.gif)

A coroa é a próxima camada, sendo a mais externa e estendendo-se por todo o meio interplanetário. A sua temperatura é de milhões de graus Kelvin. A visualização da emissão de luz da coroa só é possível quando ocorre um eclipse total, o qual bloqueia a emissão na faixa do visível da fotosfera. Na Figura 2.6 é possível visualizar a coroa durante um eclipse total.

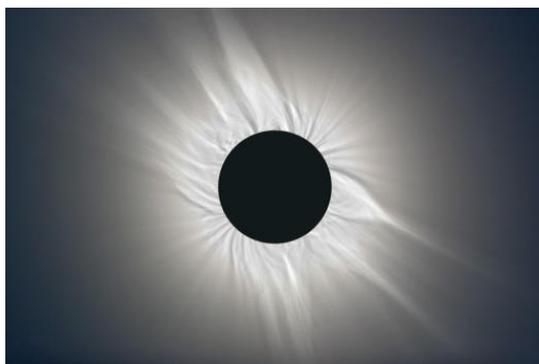


Figura 2.6 – Imagem da coroa solar durante um eclipse total. (http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/image/0907/corona_vangorp.jpg)

Entre a camada da cromosfera e da coroa existe a região de transição, caracterizando-se por ser uma camada bastante fina e irregular da atmosfera solar. Essa região separa a relativamente fria cromosfera da próxima camada, a coroa. Nessa região a temperatura cresce rapidamente de 20.000 K para milhões de graus Kelvin (Figura 2.7). Não existe nenhuma explicação para essa grande variação de temperatura.

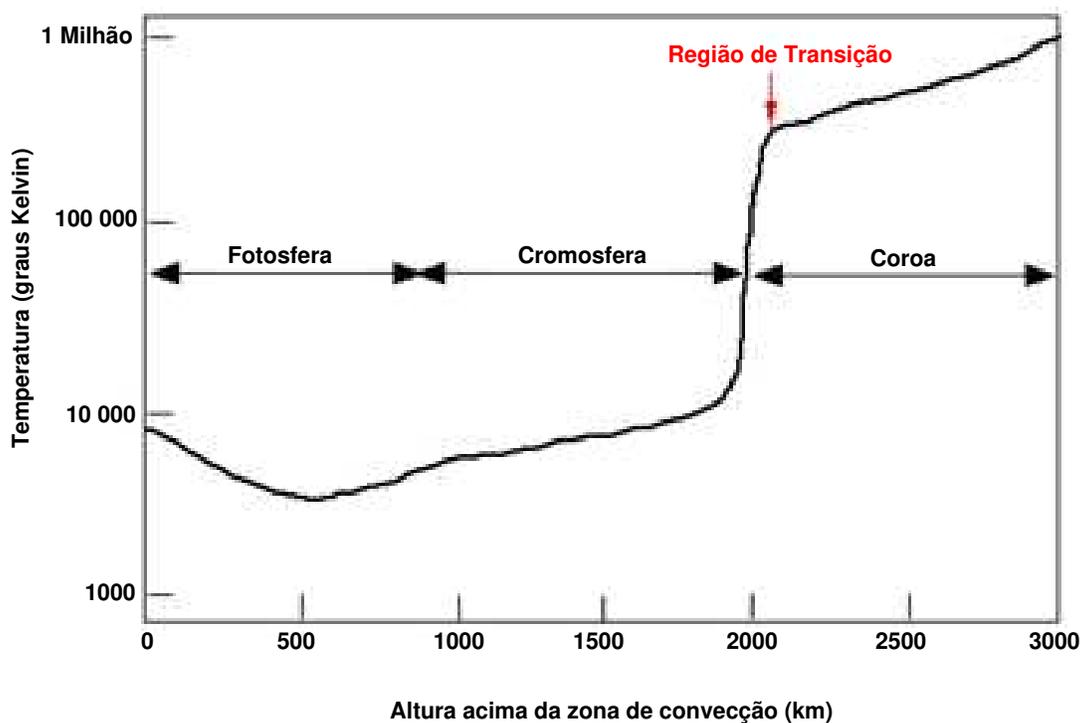


Figura 2.7 – Representação da região de transição existente na atmosfera solar. (adaptado de: <http://solar.physics.montana.edu/yypop/Spotlight/SunInfo/transreg.html>)

2.3. CAMPO MAGNÉTICO SOLAR

No interior do Sol, como já foi visto, existe uma camada muito fina denominada *tacoclina*. Ela está localizada entre as camadas radiativa (lado interno) e convectiva (lado externo). Nessa camada a velocidade do plasma é diferente entre suas interfaces com as camadas radiativa e convectiva. Do lado interno praticamente não há fluxos de matéria. Ao se aproximar do lado externo os fluxos aumentam e na parte superior se igualam aos movimentos da camada convectiva. A importância dessa camada está na súbita mudança de velocidade do plasma. Acredita-se que esse fenômeno seja o responsável pela geração do campo magnético poloidal solar na forma de um processo conhecido como *dínamo* (Spiegel e Zahn, 1992; Garaud, 2002). Na Figura 2.8 estão ilustradas linhas de campos magnéticos no Sol.

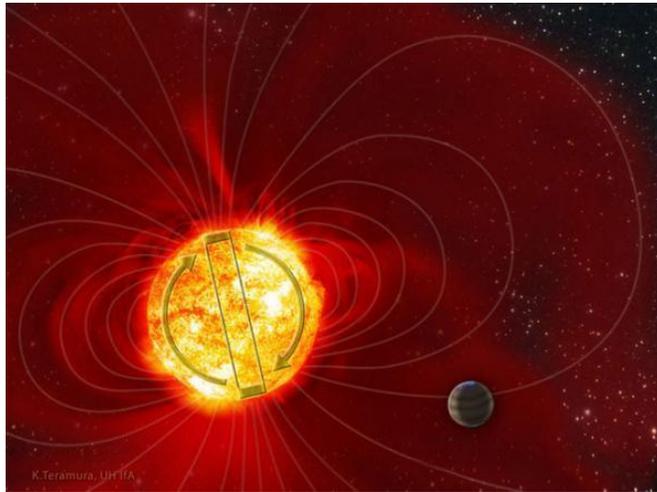


Figura 2.8 – Representação esquemática das linhas do campo magnético poloidal do Sol. (<http://startswithabang.com/wp-content/uploads/2008/11/080225133649-large.jpg>)

As linhas do campo magnético solar permeiam todo o meio interplanetário, definindo o campo magnético interplanetário (IMF – *Interplanetary Magnetic Field*). A magnetosfera solar composta por este campo, denominada heliosfera, engloba todo o sistema solar. Em períodos de aproximadamente 11 anos o campo magnético solar inverte sua polaridade, isto é, em um determinado ciclo solar o pólo magnético positivo está no pólo norte e o pólo magnético negativo está no pólo sul, no ciclo seguinte os pólos estão invertidos. Dessa forma, a duração do ciclo magnético solar é de cerca de 22 anos, isto é, são necessários dois ciclos de manchas solares (as manchas solares estão definidas na seção 2.4) para se ter novamente a mesma configuração de polaridades.

Como todos os astros do sistema solar, o Sol possui o movimento de rotação, que dura, em média, 27 dias. Em consequência da sua composição gasosa a rotação do Sol se diferencia nas diferentes latitudes. Em baixas latitudes, regiões próximas ao equador solar, têm-se rotações mais rápidas. Já nas regiões polares a rotação é mais lenta. É possível estudar a rotação diferencial do Sol acompanhando-se as manchas solares (manchas escuras) presentes na sua superfície, as quais aparecem e desaparecem durante um ciclo solar. A tabela 1 apresenta as diferenças de velocidades e os períodos de rotação em diferentes latitudes do Sol. A Figura 2.9 ilustra, por meio de tonalidades de cores, a

diferença de velocidades da matéria no interior solar. A Figura 2.10 ilustra a duração aproximada, em dias, da rotação da superfície solar nas diferentes latitudes.

Tabela 1 – Diferentes períodos de rotação, devido à variação das velocidades nas diferentes latitudes do Sol. A rotação diferencial da fotosfera foi feita pelo instrumento MDI a bordo do satélite SOHO. (Silva, 2006).

Latitude (graus)	Período de rotação (dias)	Velocidade de Rotação (km/h)
0	25,67	7097
15	25,88	6807
30	26,64	5922
45	28,26	4544
60	30,76	2961
75	33,4	1416

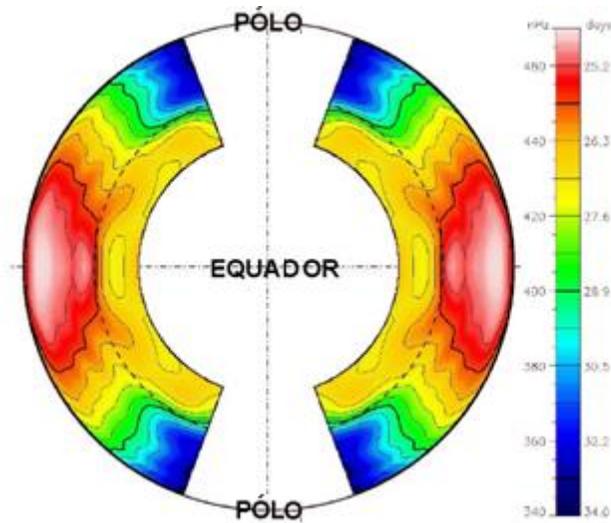


Figura 2.9 – Representação da diferença de velocidade da matéria no interior solar. A cor vermelha indica velocidades mais elevadas. A cor azul indica velocidades mais baixas. É possível perceber que a rotação na região do equador solar é mais rápida do que a dos polos. (adaptado de: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/internal_rotation_mjt.jpg)

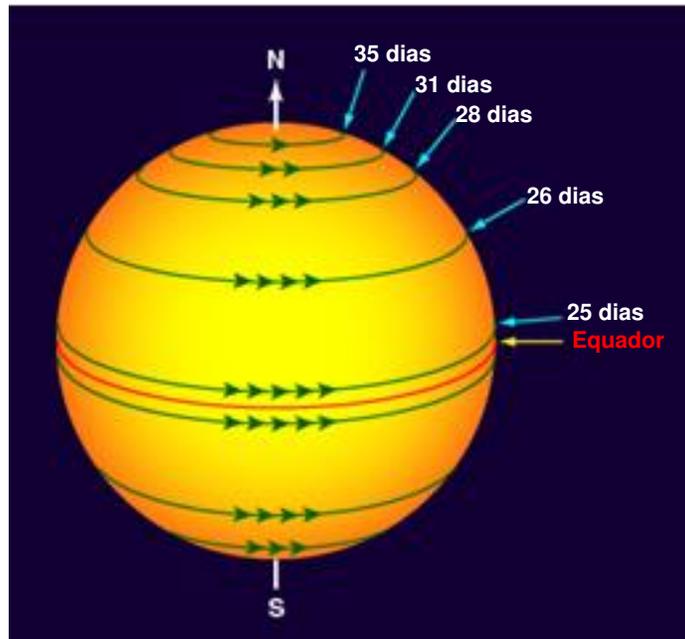


Figura 2.10 – Representação esquemática da duração da rotação da superfície solar (fotosfera) em diferentes latitudes (adaptado de: http://www.physics.hku.hk/~nature/CD/regular_e/lectures/chap11.html).

No início de um novo ciclo solar, após a inversão dos pólos magnéticos, as linhas de campo magnético se encontram perpendiculares à linha do equador solar. Por causa da rotação diferencial (diferença de velocidade), rotações mais rápidas nas baixas latitudes e mais lentas em altas latitudes, após cada rotação as linhas de campo magnético vão sendo distorcidas (esticadas) e suas configurações na região das médias para as baixas latitudes vão ficando praticamente paralelas à linha do equador solar. Os estudos da atividade solar estão relacionados às linhas de campo magnético. Segundo estas interpretações, essa dinâmica pode dar origem a vórtices, e às manchas solares, que são os pólos das configurações que se formam na superfície. A Figura 2.11 ilustra a evolução do campo magnético solar durante um ciclo solar.

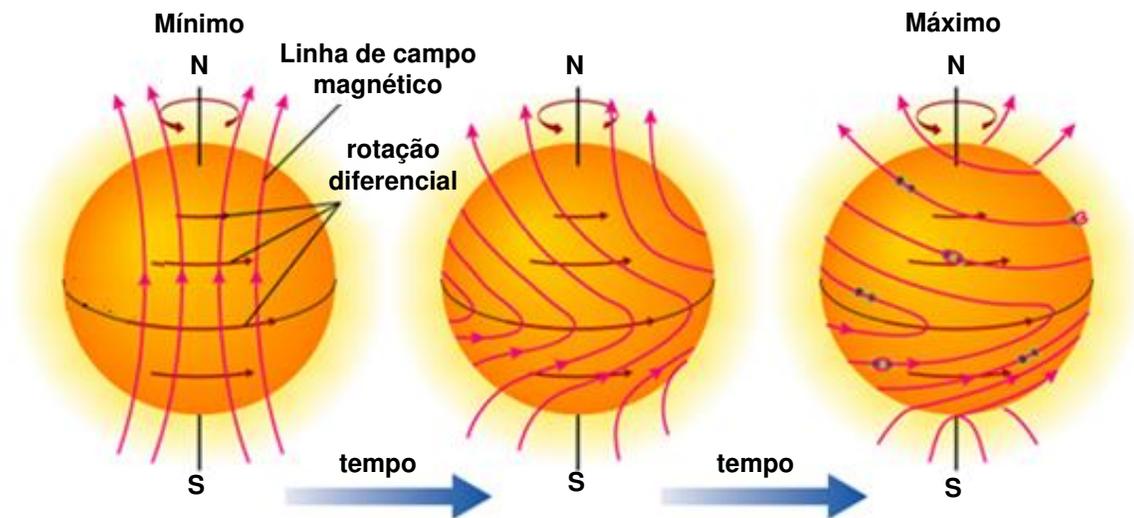


Figura 2.11 – Dinâmica das linhas de campo magnético que se modificam de acordo com a evolução de um ciclo solar. Esse processo pode dar origem a polaridades magnéticas localizadas no disco (as manchas). (adaptado de: http://zebu.uoregon.edu/~imamura/122/images/solarcycle_B.jpg)

2.4. MANCHAS SOLARES

No decorrer de um ciclo solar, o Sol passa por máximos e mínimos de atividade. É na parte visível do Sol, a fotosfera, onde surgem as regiões escuras denominadas de manchas solares, aparecendo e desaparecendo no decorrer de um ciclo solar. Durante um ciclo solar o número de manchas solares cresce atingindo um máximo e decrescendo logo em seguida. As manchas solares são visíveis na fotosfera por apresentarem temperaturas aproximadamente 1000 a 2000 K abaixo da temperatura da superfície solar (fotosfera), a qual é da ordem de 5800 K. Na Figura 2.12 (a) é possível visualizar a ocorrência das manchas solares no magnetograma, obtido pelo experimento MDI no satélite SOHO. As polaridades magnéticas estão em branco e negro. A Figura 2.12 (b) ilustra uma mancha solar na qual a região mais escura, umbra, corresponde à região mais fria. A penumbra corresponde à região externa. No início de um ciclo praticamente não há ocorrência de manchas solares, sendo que suas ocorrências tendem a aparecer, em ambos os hemisférios, em latitudes mais altas (acima de 30°). No decorrer da evolução do ciclo, com o passar dos anos, as novas manchas solares surgem em latitudes mais baixas, próximas ao equador solar (Zirin, 1988).

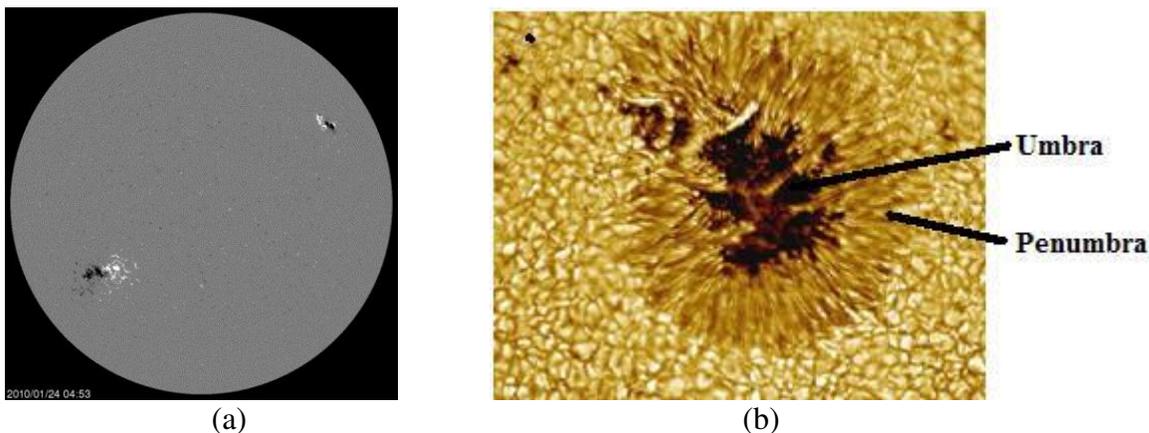


Figura 2.12 – (a) Representação do campo magnético de manchas solares na superfície do Sol. (<http://www.spacearchive.info/2010-01-23-nasa-soho-sun.jpg>). (b) ilustração de uma mancha solar, região escura, com temperatura de aproximadamente 2000 K abaixo da superfície solar (fotosfera). (<http://www.le.ac.uk/ph/faulkes/web/images/sunspot.jpg>).

As manchas solares geralmente ocorrem em grupos de duas ou mais e são lideradas por uma mancha denominada mancha-líder. A polaridade do campo magnético das manchas também é invertida a cada 11 anos, caracterizando um ciclo magnético de 22 anos (denominada lei de Hale–Nicholson). O número de manchas corresponde a um índice, o qual foi introduzido por Rudolf Wolf em 1840. A equação (1) descreve a fórmula para o cálculo desse índice, denominado de R_z ou simplesmente R , sendo g o número de grupo de manchas, f o número individual de manchas e K um fator de correção aplicado pelo observatório. (Zirin, 1988; Hale et. al. 1919; Hoyt e Schatten, 1997).

$$R_z = K(10g + f) \quad (1)$$

Desde a antiguidade, cerca de 4000 anos atrás, os chineses e mais recentemente os gregos já haviam observado manchas escuras no Sol. No entanto, foi por volta do ano 1610 que Galileu, com o uso de um telescópio, projetou a superfície solar e observou a ocorrência das manchas solares, passando a estudá-las e realizando registros de suas ocorrências por meio de representações gráficas, conforme ilustrado na Figura 2.13. A partir do final do século XVIII e início do século XIX, diversos estudos foram feitos dentre os quais se destacam as pesquisas realizadas por Johann Rudolf Wolf (1816-1893). Assim,

as manchas solares passaram a ser acompanhadas, observadas, registradas e estudadas mais sistematicamente como acontece nos dias atuais (Hoyt e Schatten, 1997).

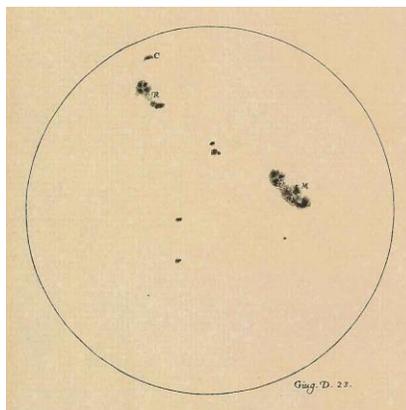


Figura 2.13 – Representações de manchas solares observadas e registradas por Galileu. (<http://astroguyz.com/wp-content/uploads/2009/03/galileo-sunspots.jpg>)

Os registros das ocorrências das manchas solares permitiram verificar que elas aparecem e desaparecem em ciclos de aproximadamente 11 anos. Verificou-se que no início de um ciclo solar elas ocorrem em menor quantidade e em latitudes mais altas, no decorrer do ciclo surgem em latitudes mais baixas e em número mais elevado. Edward Walter Maunder realizou um estudo com os registros das manchas solares ocorridos entre 1874 a 1902, este período compreende a ocorrência de dois ciclos de manchas solares (Maunder, 1904). A Figura 2.14 ilustra o estudo realizado por Maunder e publicado em 1904. As manchas foram sendo localizadas graficamente de acordo com a sua ocorrência, ano e respectiva latitude. O diagrama resultante dessa representação se assemelha às asas de uma borboleta, devido a esta semelhança ele ficou conhecido como “*Butterfly Diagram*” (diagrama de borboleta). A Figura 2.15 ilustra o Diagrama de Borboleta correspondente aos registros das ocorrências de manchas solares desde 1870 até 2010, correspondente a diversos ciclos solares.

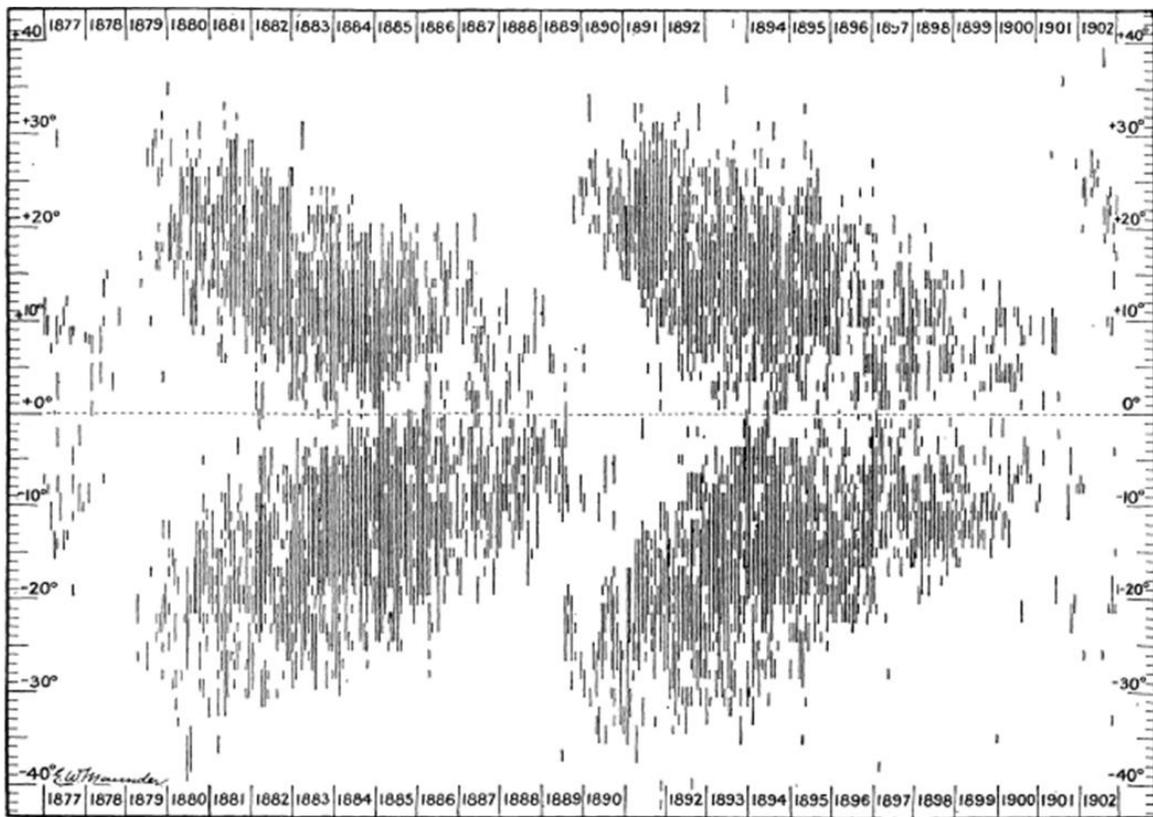


Figura 2.14 – Diagrama realizado por Edward Walter Maunder ao estudar a localização das manchas solares ocorridas entre 1874 e 1902 (publicado em 1904). Conhecido como “diagrama de Borboleta”, por sua representação assemelhar-se com as asas de uma borboleta. (Maunder 1904)

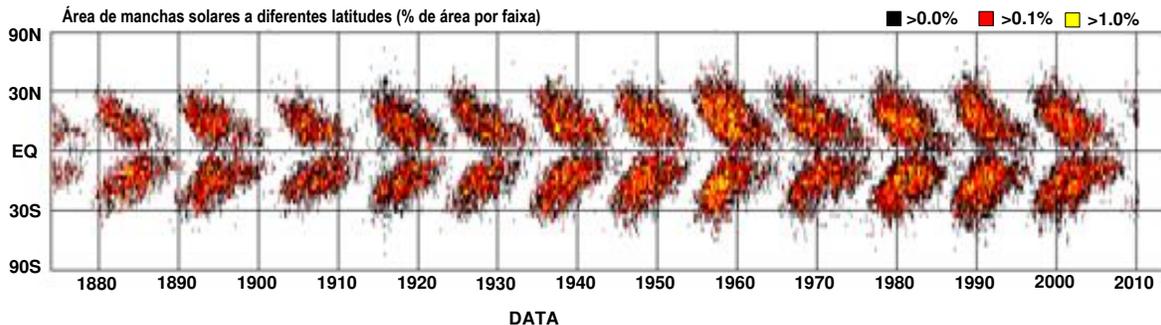


Figura 2.15 – Representação das manchas solares ocorridas durante o período de 1870 até 2010. O período compreende diversos ciclos solares. (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif>).

Em consequência da rotação diferencial (diferentes velocidades a diferentes latitudes solares) que ocorre na camada convectiva, consequentemente na superfície solar (fotosfera), as linhas de campo magnético se distorcem (como descrito anteriormente na seção 2.3). Com a distorção das linhas de campo magnético ocorrem os denominados campos magnéticos concentrados (polos magnéticos). Esses últimos dão origem às regiões

solares ativas, cujas estruturas magnéticas se estendem na forma de arcos. Esses arcos se estendem até a atmosfera solar, região da cromosfera e coroa, Figura 2.16 (a) e (b), favorecendo a concentração de gás ionizado nestas regiões. Os extremos de um arco se localizam na superfície solar, parte visível do Sol, e correspondem às denominadas manchas solares. As manchas solares geralmente ocorrem em pares, Figura 2.17 (a) e (b), correspondendo às polaridades magnéticas opostas de um arco (norte e sul). São regiões caracterizadas por ter um campo magnético mais intenso (milhares de Gauss), o que dificulta a convecção de energia proveniente da camada convectiva situada logo abaixo da fotosfera, Figura 2.18.

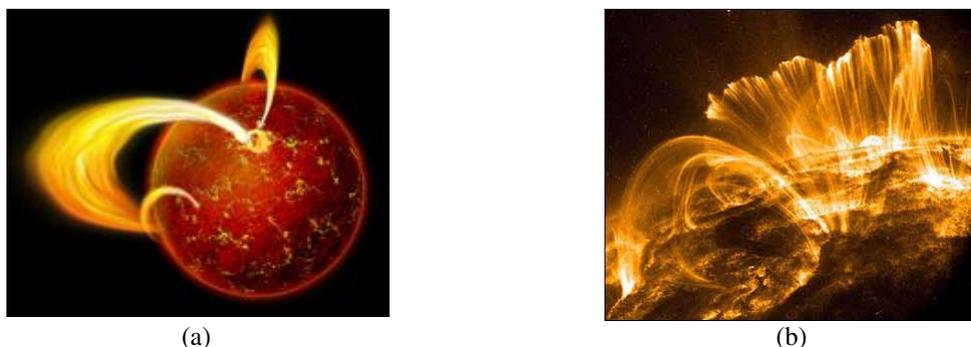


Figura 2.16 – (a) Idealização de arcos magnéticos entre hemisférios (<http://sunearthday.gsfc.nasa.gov/2010/images/tt71-fig5.jpg>). (b) Representação de arcos magnéticos que ocorrem a partir das estruturas magnéticas poloidais na superfície e estendem-se até a atmosfera solar, cromosfera e coroa. Imagem UV tomada pelo satélite TRACE (http://www.astro.washington.edu/users/preamp/images/project_images/solarflare105a.jpg)

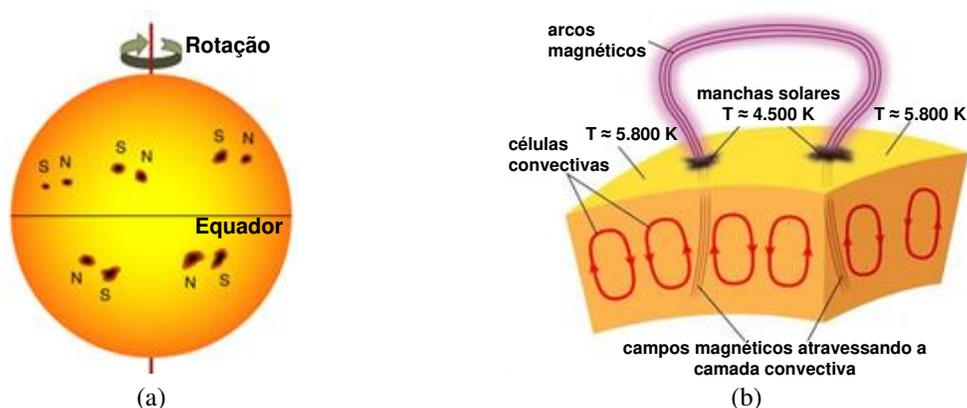
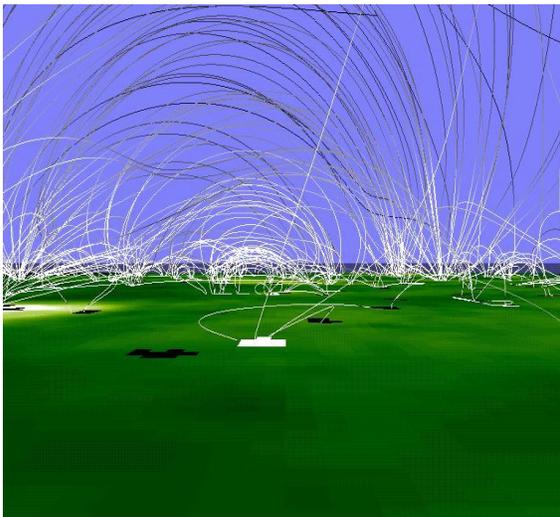


Figura 2.17 – (a) Representação de manchas solares na superfície do Sol (fotosfera) cujas polaridades são opostas. (adaptado de: http://www.windows2universe.org/sun/images/sunspot_horseshoe_magnet_sm.jpg) (b) Na base do arco magnético se encontram as manchas solares, suas temperaturas são de aproximadamente 1000 a 2000 K abaixo da vizinhança da superfície solar (fotosfera), essa condição possibilita sua visualização por contraste. (adaptado de: <http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/images/sunmagnetics.jpg>).

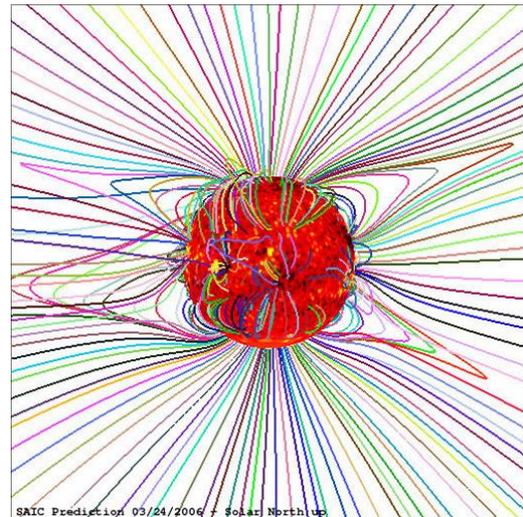


Figura 2.18 – Representação de um par de manchas solares com polaridades opostas dando origem a um arco magnético. Às vezes o arco magnético está associado a uma proeminência.

A geometria da configuração do campo magnético dessas regiões é extremamente complexa, envolvendo a interação de vários arcos de tamanhos diferentes e dinâmicas distintas, Figura 2.19 (a) e (b). Nessas regiões ocorre confinamento de gases quentes ionizados (plasmas) constituindo as denominadas regiões ativas (RA). Nestas magnetosferas podem ocorrer instabilidades dando origem às súbitas liberações de energia na forma de: explosões solares e ejeção de massa coronal (*CME – Coronal Mass Ejections*).



(a)



(b)

Figura 2.19 – Representações de vários arcos magnéticos de tamanhos diferentes e dinâmicas distintas que ocorrem na superfície solar. ((a) <http://umbra.nascom.nasa.gov/ssu/view2.jpg> (b) http://sunearthday.nasa.gov/2008/images/gal_003.jpg)

2.5. ATIVIDADE SOLAR

Durante um ciclo solar podem ser observadas na atmosfera solar, fotosfera, a ocorrência de manchas solares e de fenômenos energéticos e transientes, sendo os principais: as explosões solares (fulgurações), também conhecidas como *flares*, e as ejeções de massa coronal (*CME – Coronal Mass Ejection*). Todos variam periodicamente com o ciclo solar de manchas de aproximadamente 11 anos. Durante o período de máximo de manchas solares os fenômenos energéticos e transientes também são máximos, sendo este período denominado de máximo de atividade solar.

Nas regiões ativas (RA) da superfície solar, fotosfera, ocorre o confinamento de plasma, e como uma possível consequência podem ocorrer súbitas conversões de energia (instabilidade do plasma) com aceleração de partículas de alta energia, tais como: luz, raio X, ultravioleta (UV), rádio, etc. As explosões solares também podem estar acompanhadas por ejeção de massa coronal (*CME – Coronal Mass Ejection*).

2.5.1. Explosões solares

Em 1º de setembro de 1859 entre 11 e 12 horas da manhã, Richard Carrington observava as manchas solares, por meio de um telescópio óptico, quando presenciou a ocorrência de um clarão (brilho intenso) em uma pequena região da superfície do disco solar. Esta foi a primeira observação, registrada e publicada, da ocorrência de uma explosão solar. Em 1705 Stephen Gray observou um clarão na superfície solar, mas essa observação nunca foi publicada. (Hoyt e Schatten, 1997)

As explosões solares (*flares*) geralmente ocorrem próximas às manchas solares, em uma região ativa, local onde há uma alta concentração de campo magnético, e se caracterizam pela emissão de grandes quantidades de energia ($10^{27} - 10^{32}$ erg), em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos até poucas horas, para fenômenos mais intensos (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2012a). É possível visualizar as explosões solares devido ao abrilhantamento da região ativa onde ela ocorre (Figura 2.20).

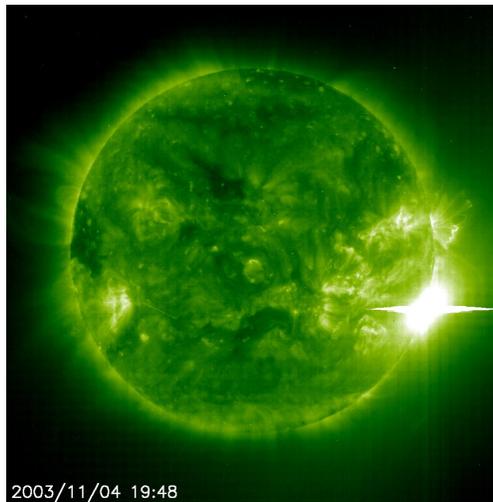


Figura 2.20 – Imagem de uma explosão solar, ocorrida em 4 de novembro de 2003. Luz UV intensa é registrada na margem direita do Sol. A linha horizontal que aparece na imagem da explosão solar não é real, ela corresponde ao efeito devido a forte intensidade de luz no detector do instrumento no momento do registro da imagem. A imagem foi feita pelo instrumento *Extreme-ultraviolet Imaging Telescope*, a bordo da espaçonave SOHO. Crédito *European Space Agency* e NASA. (http://www.nasa.gov/mission_pages/soho/soho_sunquake.html)

Durante as explosões solares, há uma liberação súbita de grandes quantidades de energia que aquecem o plasma local e aceleram as partículas até energias altíssimas, produzindo grandes quantidades de radiação e partículas.

Uma explosão solar também pode estar associada à expulsão de grandes quantidades de matéria a velocidades que variam de centenas a poucos milhares de quilômetros por segundo. Este fenômeno é conhecido como ejeção de massa coronal (*Coronal Mass Ejection – CME*).

2.5.2. Proeminências

As proeminências são fenômenos presentes na superfície solar, sendo caracterizadas por nuvens densas e frias de gás que ficam suspensas sobre arcos de campos magnéticos acima da superfície solar (Figura 2.21 (a)). Devido à força de Lorentz as nuvens densas e frias atuam como uma força equilibrante definindo a sua dinâmica sobre os arcos magnéticos. A dinâmica do campo magnético solar varia continuamente (conforme descrito na seção 2.3), possibilitando com que as proeminências apareçam e cresçam acima da

superfície solar. Devido a uma instabilidade das suas estruturas as proeminências podem se romper expulsando uma enorme quantidade de matéria para o espaço a velocidades que variam de centenas a poucos milhares de quilômetros por segundo. É o fenômeno denominado de ejeção de massa coronal. As proeminências são também visualizadas na forma de filamentos escuros, quando observadas contra o disco solar (Figura 2.21 (b)). Cientistas pesquisam para compreender como e por que as proeminências são formadas (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2012b).

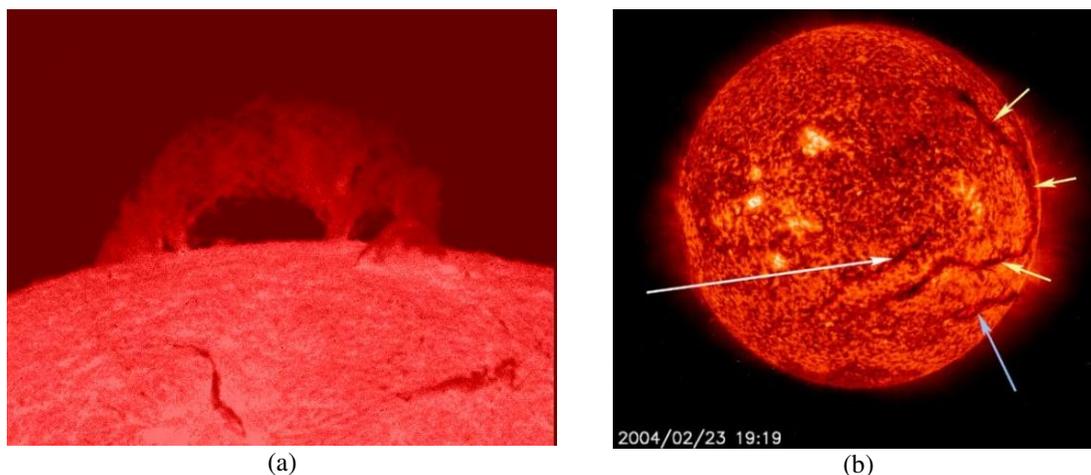


Figura 2.21 – (a) As proeminências (vistas no limbo) são estruturas quiescentes. (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/prominence1.jpg>) (b) As proeminências são vistas no disco como estruturas escuras. As setas indicam as localizações dos filamentos, visualizados em luz ultravioleta extrema (extreme ultraviolet (EUV)). (<http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/0226filament.html>) Crédito NASA/ESA.

2.5.3. Ejeção de Massa Coronal

Atualmente as observações de explosões solares e de ejeção de massa coronal (*Coronal Mass Ejection* - CME), tornou-se possível pela utilização de coronógrafos¹, os quais atuam como anteparos artificiais que bloqueiam a luz do disco solar. As primeiras observações feitas foram no início da década de 1970 (período de 1971 a 1973) com o uso de um coronógrafo a bordo do satélite *7th Orbiting Solar Observatory (OSO-7)*. Embora os eclipses permitam uma observação da coroa solar, devido ao curto período de observação

¹ Coronógrafo - Instrumento destinado à observação da coroa solar fora dos eclipses. Serve como um anteparo artificial que bloqueia a incidência da luz solar na faixa do visível. Seu inventor foi o astrônomo Bernard Lyot (1897-1952).

(minutos), não é possível a observação e registro da ocorrência de uma CME. A ocorrência de uma CME é frequentemente associada com explosões solares e proeminências, porém pode também ocorrer na ausência desses fenômenos. A frequência desses eventos também está associada ao ciclo solar, em período de mínimo do ciclo ocorre em média um evento por semana, enquanto em períodos de máximo do ciclo solar podem ocorrer 2 a 3 eventos por dia. Na Figura 2.22 estão representadas as etapas da ocorrência de uma CME. (National Aeronautics and Space Administration, 2012c).

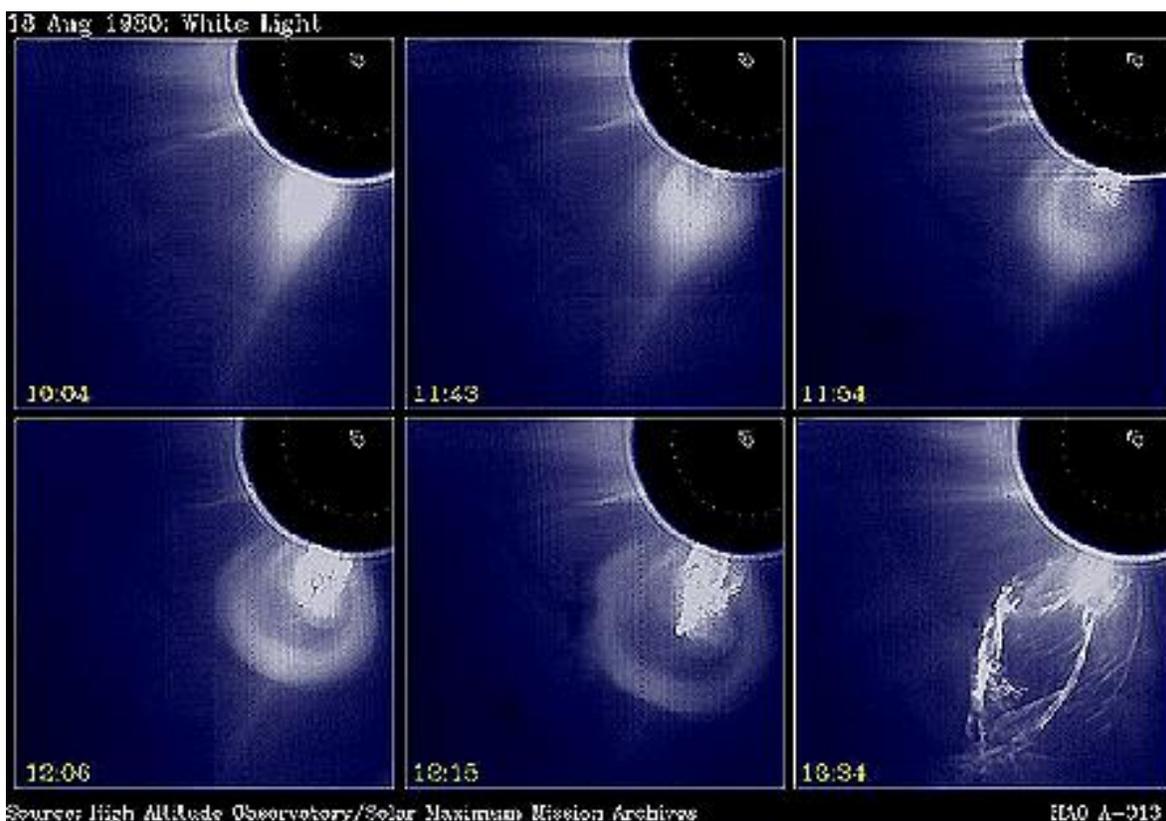


Figura 2.22 – Sequência de imagens mostrando a ocorrência de uma CME. (http://genesissmission.jpl.nasa.gov/science/mod3_SunlightSolarHeat/SolarStructure/cme.jpg)

Nas Figuras 2.23 (a) e (b) é possível observar o registro da ocorrência de explosões solares acompanhada pela ejeção de massa coronal (CME), feito pelo instrumento LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment*) abordo da espaçonave SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*).

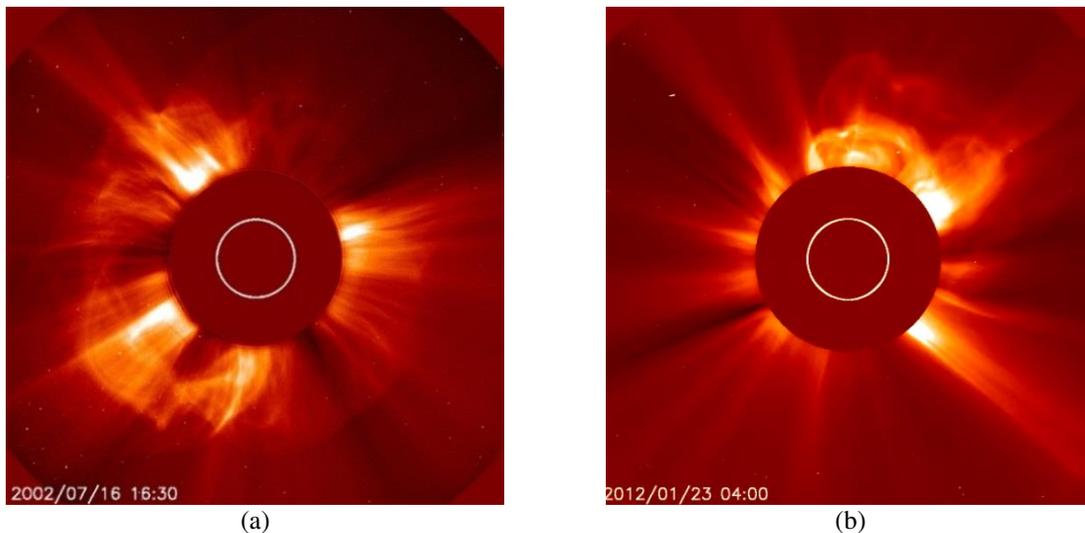


Figura 2.23 – (a) Nesta imagem é possível visualizar um evento denominado de “*halo event*”. Recebe este nome, pois a explosão solar, devido à sua localização, forma uma espécie de halo (círculo luminoso) ao redor do Sol. Crédito SOHO/LASCO. (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/20020716c2halo.html>). (b) Ocorrência de uma explosão solar (*flare*), em 23 de janeiro de 2012, acompanhada de uma CME. Crédito SOHO/ESA & NASA. (<http://www.nasa.gov/multimedia/videogallery/index.html>).

Ainda não se sabe qual a causa destes fenômenos, e também não está certo de onde se originam. A maioria das CMEs produz ondas de choque que, quando se propagam em direção à Terra, percorrem a distância a partir do Sol em cerca de 2 dias.

2.6. VENTO SOLAR

Há um constante fluxo de partículas carregadas que são emitidas pelo Sol, denominado de vento solar. O vento solar não é uniforme, tendo velocidade de aproximadamente 400 km/s na região equatorial e cerca de 800 km/s nas regiões polares. A Figura 2.24 ilustra as diferentes velocidades do vento solar em relação às diferentes latitudes. O vento solar é carregado de partículas e sua densidade varia conforme sua velocidade. O vento solar rápido (700 a 800 Km/s) é menos denso (3 milhões de prótons por m³) enquanto o mais lento (400 Km/s) é mais concentrado (10 milhões de prótons por m³). Suas respectivas variações passam constantemente pela Terra atingindo o seu campo magnético e com possibilidade de produzir tempestades na magnetosfera da Terra.

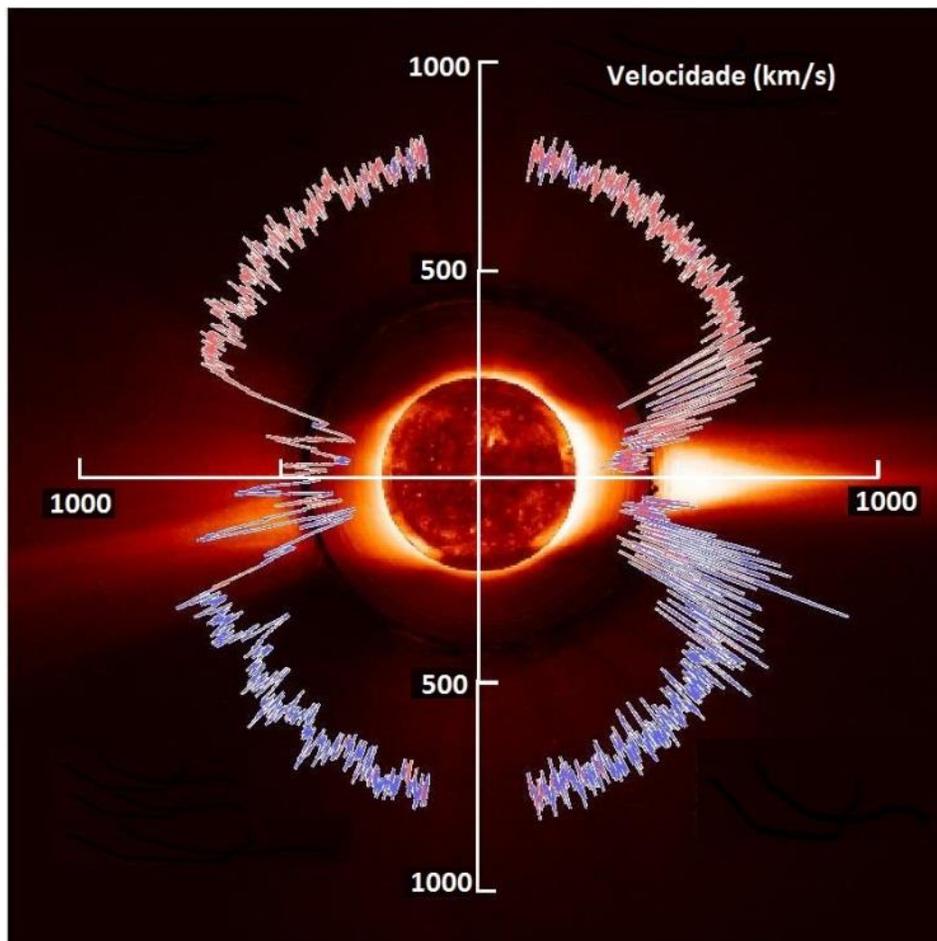


Figura 2.24 – Representação da velocidade do vento solar em relação às diferentes latitudes. (adaptado de <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/DialPlot.jpg>)

A dinâmica do vento solar está associada aos buracos coronais (*Coronal holes*), que são regiões mais frias do que a sua vizinhança e menos densas. Os buracos coronais estão relacionados a linhas de campo magnético abertas, sendo mais frequente nas regiões dos polos, mas podem ocorrer também em outras regiões (Figura 2.25 (a) e (b)). Nas regiões onde há a ocorrência de buracos coronais o vento solar tem maiores velocidades e um maior fluxo de matéria.

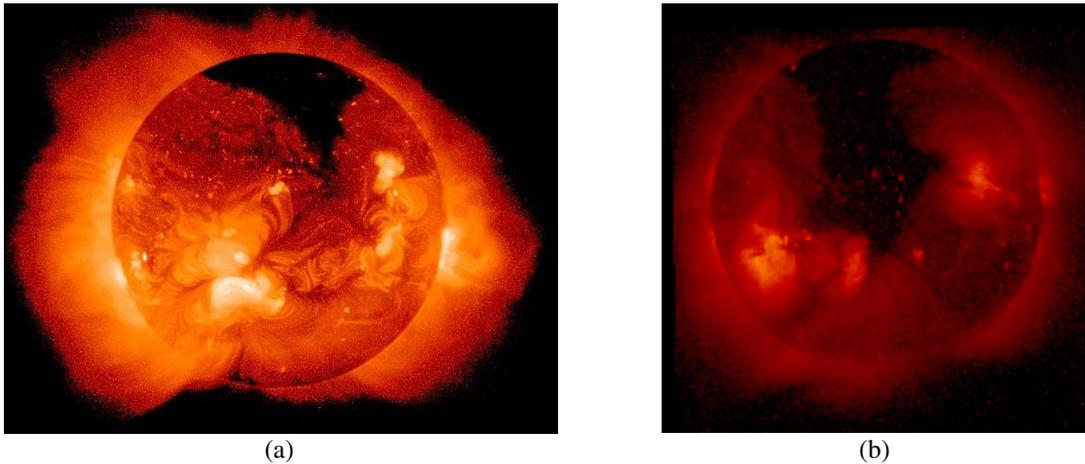


Figura 2.25 – As imagens, feitas pelo satélite Yohkoh: (a) ilustra um buraco coronal no polo norte (http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/Yohkoh_920508.jpg) (b) ilustra um buraco coronal estendendo-se da região norte para o hemisfério sul, próximo ao centro do Sol. (<http://helios.gsfc.nasa.gov/chole.html>)

O vento solar atinge constantemente a Terra, interagindo com o seu campo magnético. Do lado do Sol, o campo magnético terrestre é comprimido pelo vento solar, enquanto do lado oposto se estende formando uma cauda. A Figura 2.26 ilustra a dinâmica do campo magnético terrestre devido a interação com o vento solar.

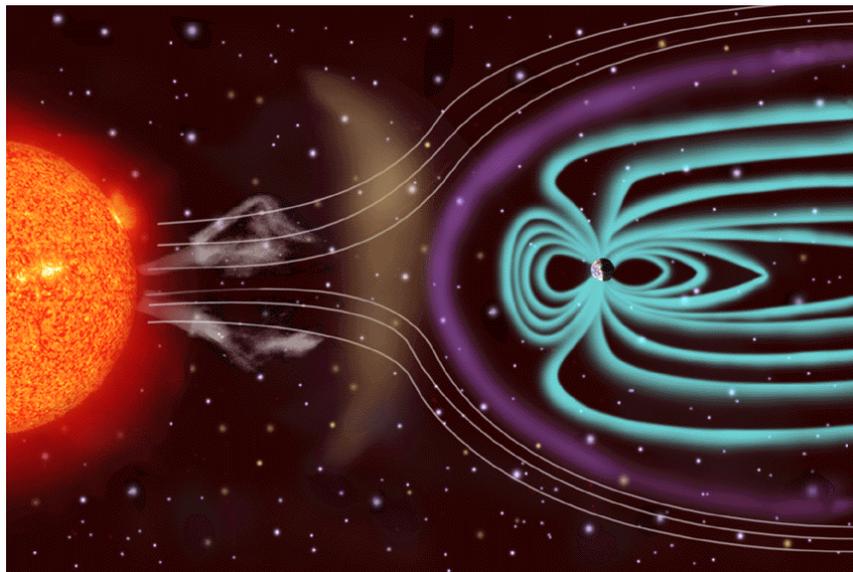


Figura 2.26 – Imagem ilustrativa da interação do vento solar (linhas brancas) com a magnetosfera terrestre (linhas azuis). O contorno roxo é denominado de arco de choque. (http://www.mps.mpg.de/projects/sun-climate/se_body.html)

O vento solar permeia todo o campo magnético interplanetário (IMF – *Interplanetary Magnetic Field*) estende-se por todo o sistema solar definindo os limites da heliosfera, isto é, do sistema solar. A dinâmica da extensão da heliosfera varia com o ciclo solar, em períodos de mínimo de atividade solar há um encolhimento, enquanto que durante o máximo da atividade solar há uma expansão. Durante o período de máximo da atividade solar, o vento solar permeia o meio interplanetário com um maior fluxo de partículas carregadas, as quais agem nos limites da heliosfera como uma barreira natural, limitando a penetração de um número maior de partículas de origem galáctica (Raios Cósmicos Galácticos – *Galactic Cosmic Ray* – GCR), as quais também interagem com o campo magnético terrestre. A Figura 2.27 ilustra a dimensão do sistema solar.

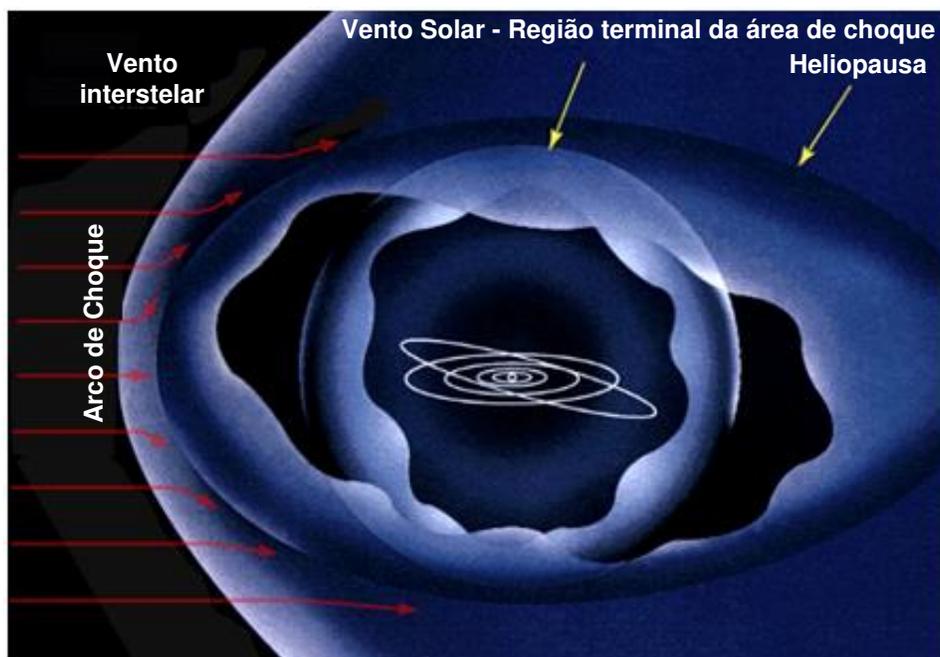


Figura 2.27 – Ilustração dos limites do sistema solar, isto é, limites do campo magnético interplanetário (IMF – Interplanetary Magnetic Field) e vento solar. (adaptado de: <http://helios.gsfc.nasa.gov/heliosph.html>)

2.7. RELAÇÕES SOLARES TERRESTRES

O Sol em regime quiescente emite um fluxo permanente de partículas denominado de vento solar. Com a ocorrência de explosões solares, e de outros transientes, grandes massas de partículas são acrescentadas e aceleradas no meio interplanetário. Essas

partículas bombardeiam a magnetosfera terrestre que as aprisionam nos chamados cinturões de radiação, denominados de “Cinturões de Van Allen”, os quais circundam o planeta Terra (Figura 2.28). Os cinturões de Van Allen, descobertos em 1958, são compostos principalmente por prótons e elétrons. Os íons de hélio, carbono, oxigênio e nitrogênio também são encontrados nestes cinturões. As energias destas partículas podem variar de 200 KeV até dezenas e centenas de MeV (como os prótons de alta energia). As partículas presas na configuração magnética do planeta se concentram em maior número, e se precipitam mais facilmente nas regiões polares da Terra (Van Allen, 1958).

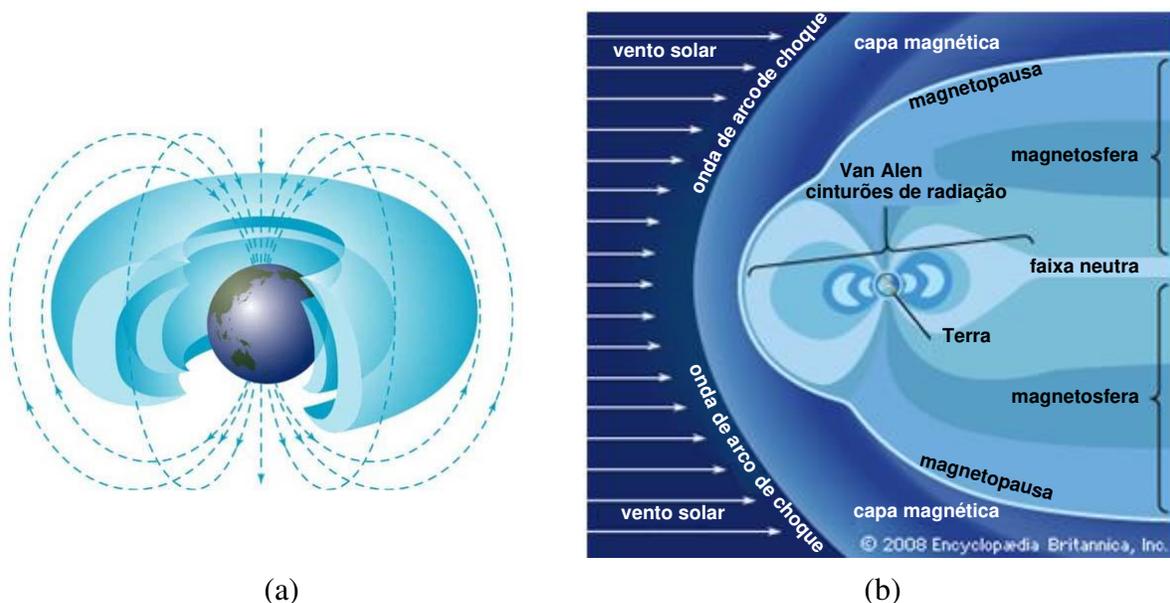


Figura 2.28 – (a) Estrutura magnética da Terra mostrando a morfologia dos “Cinturões de Van Allen” onde ficam aprisionadas partículas. (<http://www.astronomycafe.net/qadir/ask/vanallen1.jpg>) (b) Esquema mostrando a magnetosfera terrestre, sua morfologia e regiões características, e sua interação com o vento solar. (adaptado de: <http://media-2.web.britannica.com/eb-media/31/6031-004-89E5D4FB.gif>).

O regime do clima espacial influencia constantemente a atmosfera e a magnetosfera terrestre. Alguns efeitos são bastante conhecidos como o efeito Forbush e os efeitos de transientes diretos. Boteler et al. (1998) mostram uma listagem de efeitos de transientes solares com consequências no planeta ocorridos em um período de aproximadamente 150 anos (1844 a 1996).

Durante o ciclo solar de 11 anos há uma variação da quantidade de raios cósmicos galácticos (*Galactic Cosmic Ray – GCR*) que penetram na atmosfera terrestre.

Em períodos de máximo de um ciclo solar há uma diminuição da penetração dos GCR e nos períodos de mínimo há um aumento. Essa dinâmica é bastante conhecida sendo denominada de efeito Forbush (Forbush, 1957). Na Figura 2.29 estão relacionados o número médio mensal de manchas solares (R) em um período que corresponde a uma significativa fração do ciclo solar 23 e, a media mensal de GCR no mesmo período. Assim, fica representado o efeito Forbush para o período. Os dados foram obtidos no serviço de dados disponíveis no site *National Oceanic and Atmospheric Administration* em *Solar Indices Data - Estação Climax* (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 1998-2006). A rigidez de corte na região onde os dados foram obtidos para uma altura de 3400 m é de aproximadamente 3,0 GeV.

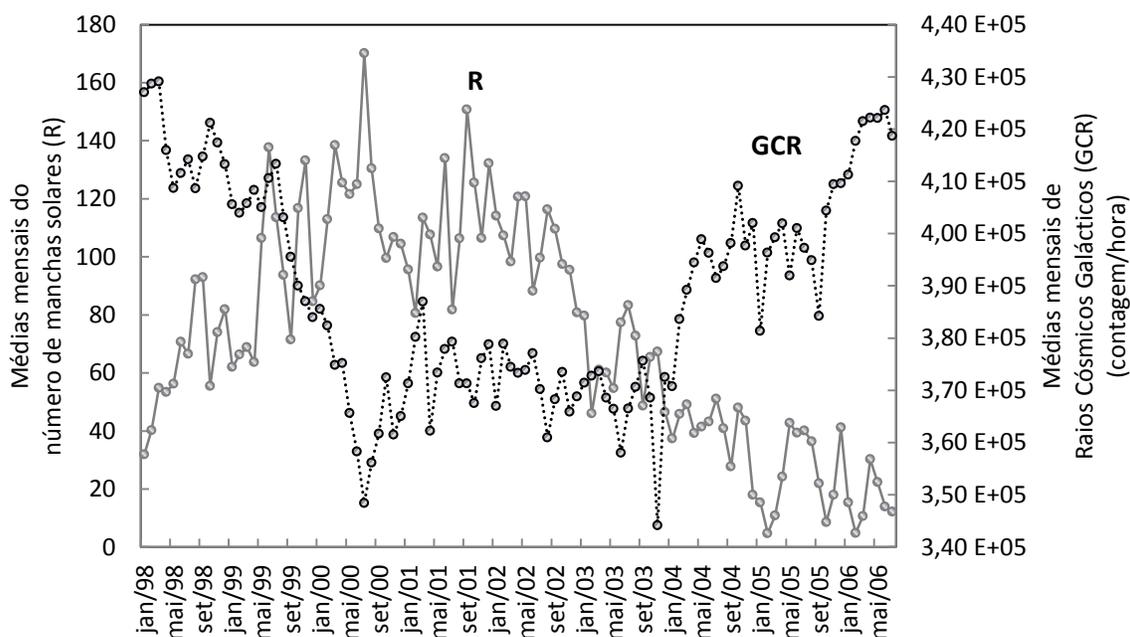


Figura 2.29 – Representação do efeito Forbush para o período de 1º de janeiro de 1998 a 31 de julho de 2006. Período que corresponde a uma importante fração do ciclo solar 23. Número médio de manchas solares (R -linha contínua) e número médio mensal de raios cósmicos galácticos (GCR-linha pontilhada). (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 1998-2006).

Os GCR primários são partículas altamente energéticas, que ao penetrarem na alta atmosfera terrestre e interagirem com moléculas do ar formam novas partículas denominadas de partículas secundárias. Estas últimas reagem novamente com elementos químicos presentes na atmosfera, principalmente os átomos de nitrogênio (^{14}N), elemento

químico em abundância. Dessas reações resultam novos elementos químicos, como o berílio-10 (^{10}Be) e o carbono-14 (^{14}C), sendo este último um isótopo instável, cuja meia-vida é de aproximadamente 5.730 anos, sendo rapidamente oxidado formando o $^{14}\text{CO}_2$, o qual entra no ciclo global do carbono (CO_2).

Os novos elementos químicos formados passam a fazer parte do ciclo de elementos químicos existentes na atmosfera terrestre e interagem com oceanos, minerais, plantas e animais (Figura 2.30).

A maior parte do carbono presente na Terra é composta de uma mistura de dois isótopos estáveis: 98,9% de carbono-12 e 1,1% de carbono-13. Contudo, amostras naturais de carbono sempre contêm traços do terceiro isótopo, o carbono-14, sendo este radioativo (instável) na proporção de 0,00000000010%, significando que um átomo de carbono-14 existe na natureza para cada 1 trilhão de átomos de carbono-12 de matéria viva.

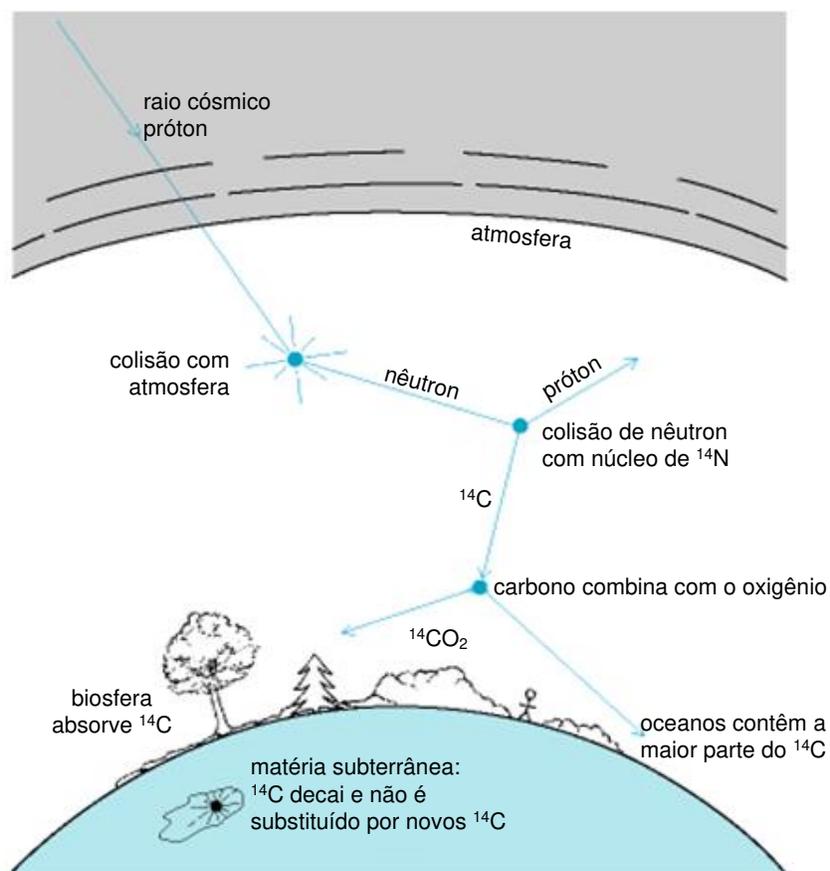


Figura 2.30 – Esquema ilustrativo da geração, absorção e decaimento do isótopo instável ^{14}C . (adaptado de: <http://egeology.blogfa.com/post-69.aspx>)

Ao longo dos anos as geleiras e os mantos de gelo (regiões com extensão superior a 50.000 km²) são formados por meio do acúmulo de camadas horizontais de neve. Ao se precipitar, a neve carrega as impurezas presentes na atmosfera. A sua posterior compactação e recristalização ocorrem pela pressão das camadas sobrepostas. Os registros ali presentes são conservados e preservados ao longo do tempo, os quais passam a ser um arquivo natural da história ambiental do planeta. Para realizar estudos, nessas diversas camadas acumuladas ao longo de anos, são realizadas perfurações verticais cilíndricas obtendo-se os testemunhos de gelo (Figura 2.31). Os testemunhos de gelo são uma importante fonte de informações sobre o clima e os elementos químicos presentes na atmosfera ao longo do tempo (o gelo preserva as características das amostras). As análises químicas realizadas nesses testemunhos possibilitam a obtenção de informações sobre elementos químicos presentes na atmosfera em determinada época como, por exemplo, a quantidade de isótopos de ¹⁴C e ¹⁰Be.



Figura 2.31 – Perfuração e obtenção de testemunhos de sondagem de gelo. (http://www.horizontegeografico.com.br/index.php?acao=exibirMateria&materia%5Bid_materia%5D=100). Participação brasileira na travessia chilena do manto de gelo antártico no âmbito da expedição científica Transantártica Internacional (ITASE - *International Trans-Antarctic Scientific Expedition*) (verão austral 2004-2005) (Mayewski et al., 2005)

As variações climáticas modificam os padrões de temperatura, umidade e precipitação. Esses fenômenos climáticos e geofísicos ocorridos no passado podem ser

estudados por meio dos anéis de crescimentos de árvores, os quais registram as variações do ambiente onde se desenvolveram. Por meio do processo de fotossíntese, os isótopos de $^{14}\text{CO}_2$ são incorporados nas fibras das plantas.

O astrônomo Andrew Ellicott Douglass, da Universidade do Arizona, interessou-se pela influência do ciclo solar no clima terrestre e decidiu estudar os anéis de crescimento das árvores para investigar essa influência, deu-se então início ao termo dendrocronologia (dendro-crono-logia = árvore-tempo-estudo) (Douglass, 1927). Essa técnica determina a idade das árvores pela análise dos anéis de crescimento formados em seu tronco ano a ano, Figura 2.32. Os anéis registram na celulose de suas células a presença do isótopo ^{14}C . Os estudos realizados permitem a obtenção de informações importantes destacando-se os resultados obtidos para estimar os ciclos de manchas solares e conseqüentemente o clima terrestre (estimativa em períodos do passado).

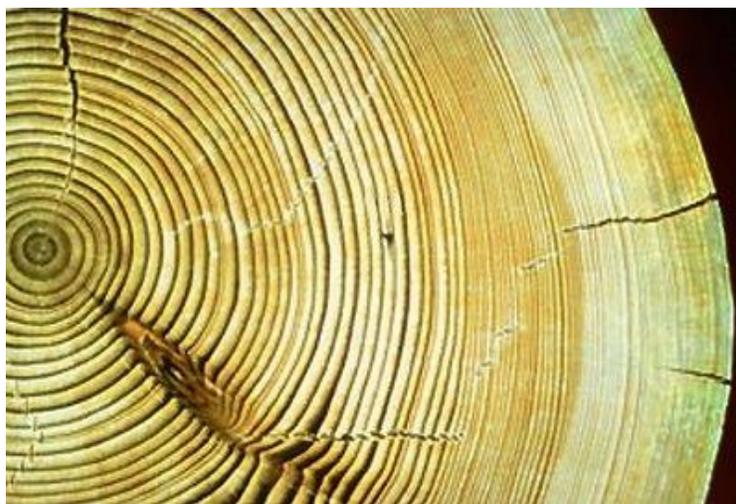


Figura 2.32 – Imagem de um tronco de árvore ilustrando os seus anéis de crescimento. (<http://dinamicaterrestre12h.blogspot.com.br/2010/11/dendrocronologia.html>)

Quando um organismo morre, ele para de absorver ^{14}C e a quantidade já existente no organismo começa a decair formando novamente ^{14}N , com uma vida média de aproximadamente 5.730 anos. Para indicar a proporção de carbono-14 existente em uma amostra estudada em relação a uma amostra padrão de referência é utilizada a notação por mil ($^0/_{00}$ - permille ou permil) por ser mais adequada do que a notação por cento ($^0/_{0}$). (Stuiver, Polach 1977; Mook, van der Plicht, 1999).

O isótopo instável carbono 14 não permaneceu de forma constante na alta atmosfera e ao estudar os anéis de crescimento de diferentes espécies arbóreas, em relação à proporção da presença do isótopo ^{14}C , foi possível identificar períodos de máximo e mínimo da atividade solar. Há um aumento na proporção de isótopos com aumento de GCR, correspondendo a períodos de baixa atividade solar. Com a identificação do número de manchas solares ou suas ausências foi possível verificar as suas influências em relação ao clima da Terra, essa correlação está identificada como: mínimo de *Maunder* (1654-1714), mínimo de *Spörer* (1416-1534), mínimo de *Wolf* (1282-1342) e outro mínimo definido que ocorreu por volta de 1040 além dos períodos de máximo. O período que corresponde ao mínimo de *Maunder* pode ser comparado com os registros de manchas solares que já existiam. Na Figura 2.33 estão ilustrados os períodos de mínimo descritos e os de máximo. (Stuiver, 1979; Stuiver e Quay, 1980).

O clima terrestre pode ser influenciado pela atividade solar. Durante os períodos de baixa atividade solar, tem-se como uma possível consequência o declínio da temperatura no planeta, no mínimo de *Maunder*, por exemplo, houve o congelamento total do rio Tamisa. (Hoyt e Schatten, 1997).

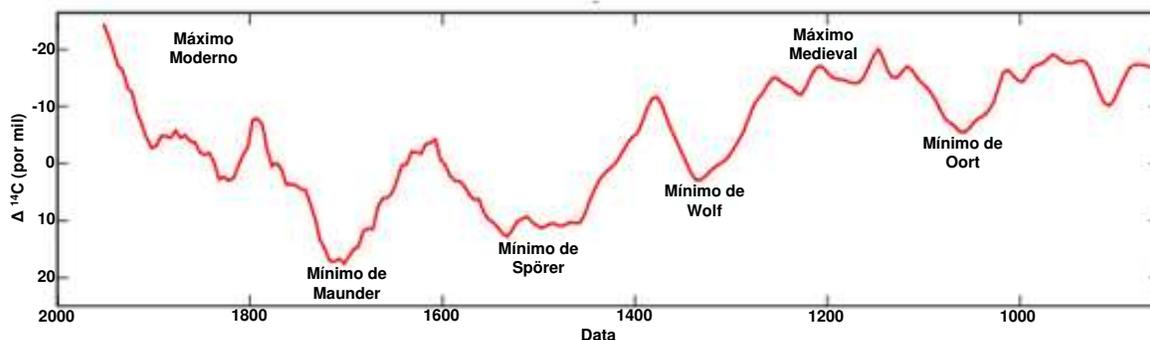


Figura 2.33 – Registros das atividades solares estudadas pela média das variações de medidas do isótopo carbono 14 ($\Delta^{14}\text{C}$). Estão representados os períodos onde houve menores e maiores atividades solares. Estão destacados um mínimo que ocorreu por volta de 1040 (mínimo de Oort), o mínimo de Wolf (1282-1342), o mínimo de Spörer (1416-1534) e o mínimo de Maunder (1654-1714). Há também identificado dois máximos; Medieval e Moderno. (adaptado de: <http://www.landscheidt.info/?q=node/53>)

2.7.1. Efeitos na alta atmosfera terrestre

Durante as explosões solares (*flares*) ocorre uma liberação súbita de grandes quantidades de energia que aquece o plasma local e acelera partículas até energias altíssimas (as quais variam de KeV até centenas/milhares de MeV), produzindo grandes quantidades de radiação e partículas. A energia que é liberada a partir de uma explosão solar correspondente a dez milhões de vezes a energia liberada a partir de uma explosão vulcânica, mas é inferior a um décimo do total de energia emitida pelo Sol a cada segundo (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2012a). O vento solar é acelerado e carrega parte dessa grande quantidade de radiação e partículas que ao atingir o campo magnético terrestre afeta a sua alta atmosfera (Hargreaves, 1995). Associada a uma explosão solar pode estar a ocorrência de uma ejeção de massa coronal (CME), a qual acrescenta uma grande quantidade de matéria para o meio interplanetário. As Figuras 2.34 (a) e (b) ilustram a ocorrência de uma CME, relacionada com uma explosão solar e o seu deslocamento no meio interplanetário. Mostra, também, a sua interação com o campo magnético terrestre com possíveis efeitos no planeta.



Figura 2.34 – (a) Ilustração de uma CME e seu deslocamento no meio interplanetário atingindo o campo magnético terrestre (<http://inhabitat.com/solar-wind-energy-could-provide-100-billion-times-earths-energy-needs/sunwaves/>). (b) Ilustração da interação de uma atividade solar com alguns dos possíveis efeitos no planeta Terra. (adaptado de: <http://nexusilluminati.blogspot.com.br/2011/09/solar-flare-could-unleash-nuclear.html>)

A CME carregada com partículas oriundas de uma explosão solar, ao atingir a magnetosfera terrestre pode causar diversos efeitos físicos, incluindo espetáculos das

auroras polares. As auroras ocorrem nas regiões polares, mas podem surgir pelos céus tropicais durante tempestades solares mais intensas. A aurora é o efeito mais fotogênico da atividade solar no planeta, sendo denominada de aurora austral (quando ocorre no polo sul) ou aurora boreal (quando ocorre no polo norte). Esse fenômeno ocorre quando as partículas carregadas colidem com os diferentes elementos químicos da atmosfera superior, produzindo efeitos de fotoluminescência no céu em várias cores. As Figuras 2.35. (a) e (b) ilustram a ocorrência de auroras nas regiões polares.



Figura 2.35 – As fotografias (a) e (b) ilustram a ocorrência de auroras (a) <http://danielltuc.blogspot.com.br/2010/10/aurora-boreal.html> (b) <http://tvcanal7.blogspot.com.br/2012/06/aurora-boreal-e-aurora-austral.html>

Em meados do século XX foi descoberta a Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (*South American Geomagnetic Anomaly – SAGA*) caracterizada por ser uma área de baixa intensidade do campo geomagnético. A SAGA quando descoberta apresentava seu centro sobre o Atlântico Sul, atualmente ele está sobre o sudeste brasileiro. Na região da SAGA ocorre uma maior precipitação de raios cósmicos, de partículas do vento solar e das CMEs, que ficam aprisionados nos cinturões de radiação ocasionando perturbações no campo magnético e na ionosfera, acentuando, dessa maneira, sua interação com a alta atmosfera terrestre. Alguns outros efeitos originados a partir da SAGA são conhecidos como, por exemplo: perturbação em satélites e estações espaciais que orbitam a Terra, interferências na recepção e transmissão de dados via satélite, entre outros. Os efeitos provocados na região da SAGA têm sido motivadores para diversas pesquisas.

2.7.2. Efeitos nos sistemas tecnológicos

As tempestades geomagnéticas correspondem a perturbações no campo magnético terrestre resultante do impacto de partículas oriundas da atividade solar na alta atmosfera terrestre. O vento solar comprime as linhas do campo magnético terrestre na frente da magnetosfera (do lado do Sol). A dinâmica do vento solar pode ser modificada, por exemplo, pela ocorrência de um buraco coronal, por uma explosão solar (*solar flare*) seguida de uma ejeção de massa coronal, entre outras possibilidades. A mudança no regime do vento solar poderá ocasionar perturbação no campo magnético terrestre, provocando reconfigurações que podem permitir uma maior penetração de partículas.

A ionosfera é a camada mais externa da atmosfera terrestre e tem a propriedade de refletir radiação eletromagnética, em frequências de onda de rádio inferiores à frequência crítica, proporcional a densidade de elétrons. Na sua parte externa, isto é, voltada para o meio interplanetário, reflete as rádio-ondas incidentes. Já na sua parte mais interna, isto é, voltada para o planeta, reflete as rádio-ondas vindas do solo. Essa propriedade da ionosfera é utilizada para as comunicações de longas distâncias por reflexões na ionosfera.

Essa característica presente na ionosfera está relacionada ao fluxo ionizante dos raios ultravioletas do Sol. Durante a atividade solar, o fluxo de radiação ultravioleta aumenta e ao atingir o planeta eleva a densidade de elétrons na ionosfera, comprometendo as telecomunicações.

A alteração da densidade de elétrons na alta atmosfera e da sua circulação em torno da Terra, associada à interação da corrente elétrica resultante com o campo magnético terrestre, causam perturbações no campo magnético do planeta, cujo comportamento é designado como atividade geomagnética.

Para medir a atividade geomagnética são utilizados índices magnéticos, tais como: “*planetarische Kennziffer*” ou índice planetário (K_p) e “*Disturbance Storm-Time*” (Dst).

Observatórios magnéticos ao redor do mundo durante o intervalo de três em três horas registram as mudanças magnéticas de maior amplitude de seus instrumentos. O valor médio dessas observações resulta no índice Kp, o qual indica o quão perturbado está o campo magnético da Terra. O índice Kp é medido por meio de um número inteiro na faixa de 0-9, sendo os valores de 0-4 relacionados a períodos calmos. Valores acima de 5 indicam tempestades geomagnéticas. Na tabela 2 estão identificados os nove valores em correspondência com o índice da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e sua respectiva descrição (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2012a).

Tabela 2 – Classificação do índice Kp com escala do clima espacial segunda a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) para as tempestades geomagnéticas e suas respectivas descrições

Índice Kp	NOAA – Escala do clima espacial Nível da Tempestade Geomagnética	Descrição
0-4	G0	Calmo
5	G1	Fraco
6	G2	Moderado
7	G3	Forte
8	G4	Severo
9	G5	Extremo

Fonte: Adaptado de NOAA Space Weather Scales (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2012b)

O índice Dst (*Disturbance Storm Time*) é a medida da atividade geomagnética utilizada para avaliar a intensidade das tempestades geomagnéticas. É obtida a partir de magnetômetros localizados em baixas latitudes (região equatorial) do globo terrestre, pode ser expresso em unidades de nano Teslas (nT ou $\gamma = 10^{-5}$ Gauss) e tem resolução temporal de uma hora. O parâmetro obtido corresponde a uma medida da componente da corrente de anel simétrica global que circunda a Terra perto do equador magnético Van Allen (ou radiação) cinturão da magnetosfera. O Dst é baseado no valor médio da componente horizontal (H) do campo geomagnético. A utilização do índice Dst como indicador da

intensidade de tempestades magnéticas é possível devido ao valor do campo magnético da superfície, em baixas latitudes, ser inversamente proporcional à energia contida na corrente de anel, que aumenta durante as tempestades geomagnéticas. Antes do início de uma tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade o qual é conhecido como fase inicial. Após essa fase, desenvolve-se a fase principal da tempestade caracterizada pela brusca queda no valor da intensidade do índice. A fase final é a de recuperação e segue até atingir o valor de estado quiescente (característico de quando não há tempestade). Na tabela 3 está representada a escala do índice Dst (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION 2012d).

Tabela 3 – Classificação do índice Dst para tempestades geomagnéticas e suas respectivas descrições.

Índice Dst	Descrição
-50 nT < Dst < -30 nT	Tempestades Fracas
-100 nT < Dst < -50 nT	Tempestades moderadas
- 200 nT < Dst < -100 nT	Tempestades intensas
Dst > -200 nT	Tempestades muito intensas

Fonte: Adaptado de *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia* (ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA, 2012)

As tempestades geomagnéticas podem provocar as correntes geomagnéticas induzidas (GICs – *Geomagnetic Induced Currents*) as quais podem incidir, por exemplo, sobre as linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, gasodutos, oleodutos, afetar telecomunicações, os sistemas de navegação, as órbitas de satélites, as explorações de recursos minerais e os sistemas biológicos.

Tempestades geomagnéticas severas podem ocasionar interrupções em atividades que dependem dos sistemas tecnológicos, isto é, muitos deles estão expostos à ocorrência de transientes espaciais. A maioria dos estudos realizados sobre a influência da atividade solar com efeito em sistemas tecnológicos está relacionado com distúrbios geomagnéticos.

Um primeiro exemplo de GIC foi o ocorrido em 1º de setembro de 1859, conhecida como a grande tempestade de 1859. Richard C. Carrington estudava um grupo de manchas solares quando testemunhou intensos flashes de luz branca deflagrados em dois pontos distintos desse grupo de manchas. Como o brilho do disco solar em luz branca é bastante intenso, esta explosão deve ter sido gigantesca. A Figura 2.36 ilustra o registro desse evento realizado pelo observatório Kew para os dias 1 e 2 de setembro de 1859. Dezessete horas depois da explosão solar foi possível observar o fenômeno das auroras que ocorreram nas primeiras horas do dia seguinte transformando a noite em dia (o fenômeno pôde ser observado inclusive em locais de baixas latitudes). O impacto dessa tempestade só não foi maior pela incipiência do desenvolvimento tecnológico da época, entretanto, atividades como a radiotelegrafia apresentou dificuldades na transmissão de uma simples mensagem. Esse evento é considerado um dos mais intensos. (Stewart, 1861; Carrington, 1859; Cliver e Svalgaard, 2004).

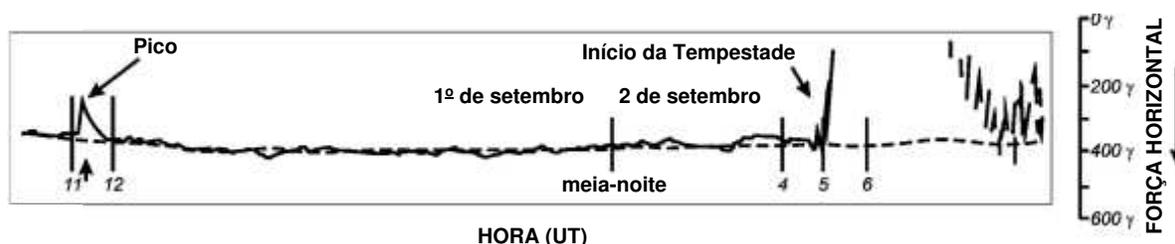


Figura 2.36 – Registro do observatório Kew para os dias 1 e 2 de setembro de 1859. No eixo horizontal tem-se a escala de tempo em UT (*Universal Time*). No eixo vertical está registrada a componente força horizontal do campo magnético terrestre ($1\gamma = 10^{-5}$ Gauss). Às 11h15 UT do dia 1º de setembro há a indicação da representação do registro correspondente ao pico da grande atividade magnética que se seguiu 17,6h depois levando o registro para fora da escala. (adaptado de: Stewart 1861, Bartels, 1937 apud Cliver, e Svalgaard, 2004).

Sistemas elétricos de altas tensão são bastante vulneráveis a vários tipos de perturbações ambientais (Hoyt and Schatten 1997; Pirjola 2007; Thomson et al. 2010, e referências ali citadas). Entretanto a qualidade das linhas de transmissão e distribuição do sistema elétrico depende de vários outros fatores, tais como: manutenção das linhas, qualidade dos equipamentos substituídos, qualidade operacional dos funcionários que manuseiam as linhas, entre outros. As interrupções imprevisíveis são uma séria preocupação para os operadores das redes.

Sabe-se que mudanças no clima espacial podem influenciar diretamente a alta atmosfera causando impactos em sistemas tecnológicos na superfície da Terra (Boteler et al. 1998; Lanzerotti et al. 1999; Hoyt and Schatten 1997; Pirjola et al. 2000; Thomson et al. 2010). Entretanto a interação do clima espacial com os sistemas elétricos é pouco conhecida. Uma razão é a falta de dados referentes às interrupções para longos períodos. As concessionárias de energia elétrica não disponibilizam dados das ocorrências das interrupções, possivelmente em virtude das reclamações dos consumidores para obtenção de uma compensação econômica. A falta de dados disponíveis e a dificuldade em conseguir com as concessionárias, representam um problema para os que tentam estudar os impactos geofísicos em sistemas de energia. Outra dificuldade é que mesmo que se obtenha uma base de dados sobre possíveis falhas no sistema elétrico, as redes de transmissão e distribuição de energia são fisicamente modificadas, ou tecnicamente aperfeiçoadas, em escalas de tempo relativamente curtas (muito mais curtas do que um ciclo solar), com isso tem-se uma base de dados não uniforme e tendenciosa.

A superfície da Terra é um pouco protegida da radiação presente no espaço pela atmosfera superior que se torna ionizada pela radiação Ly- α principalmente, no UV e no EUV (*Extreme UltraViolet* – ultravioleta extremo) solar e das partículas incidentes pela magnetosfera terrestre. Com o aumento da atividade solar esse regime é perturbado, ocorrendo o aumento da ionização na ionosfera e crescendo o fluxo de partículas carregadas que penetram na atmosfera nas altas latitudes e nas regiões polares. Efeitos geofísicos na ionosfera e magnetosfera foram descritos em numerosos estudos (veja por exemplo: Kivelson e Russell 1995; Abdu et al. 2006; Eastwood 2008 e referências ali citadas). Essas perturbações têm efeitos perceptíveis em sistemas tecnológicos presentes na superfície terrestre. (Hoyt e Schatten 1997; Lanzerotti 1983; 2001; Lanzerotti et al. 1999; Thomson et al. 2007; Thomson et al. 2010).

A maioria dos estudos realizados sobre a influência da atividade solar com efeito em sistemas tecnológicos existentes, está relacionado com distúrbios geomagnéticos. Acredita-se que as Correntes Geomagnéticas Induzidas (GICs – *Geomagnetic Induced Currents*) possam ser as grandes responsáveis pelas principais anomalias ou transitórios

que influenciam os sistemas tecnológicos, como por exemplo, as redes de alta tensão de linhas de transmissão e distribuição e gasodutos (Hoyt e Schatten, 1997; Boteler et al 1998;. Pirjola et al 2000;. Molinski et al . de 2000; Molinski 2002; Kappenman 2005; Pirjola 2005; Huttunen et al 2008). Boteler et al. (1998) apresentou uma revisão sobre documentos que relatam GICs que ocasionaram perturbações em sistemas elétricos na superfície terrestre em um período de aproximadamente 150 anos, sugerindo que eles estão agrupados nos anos de máxima atividade solar. Isso significa que quando o número de manchas solares é máximo, representando um período em que os índices geomagnéticos e as tempestades geomagnéticas tornam-se mais frequentes.

O estudo apresentado em Boteler et al. (1998) não apresenta registro de falhas em nenhum período contínuo, representado por uma base de dados diários, no decorrer de muitos anos. Um famoso exemplo sobre desligamentos em linhas de energia referentes às tempestades geomagnéticas intensas é o evento de 13 de março de 1989, o qual causou um “apagão” em Quebec no Canadá. Nesta data 83 % do sistema foi reestabelecido após 9h, causando perdas de 25.000 MW na geração de energia aliada a uma enorme perda financeira. A Figura 2.37 ilustra um transformador que foi supostamente destruído neste evento. (Barnes et al, 1991;. Stauning 2002; Bolduc 2002).

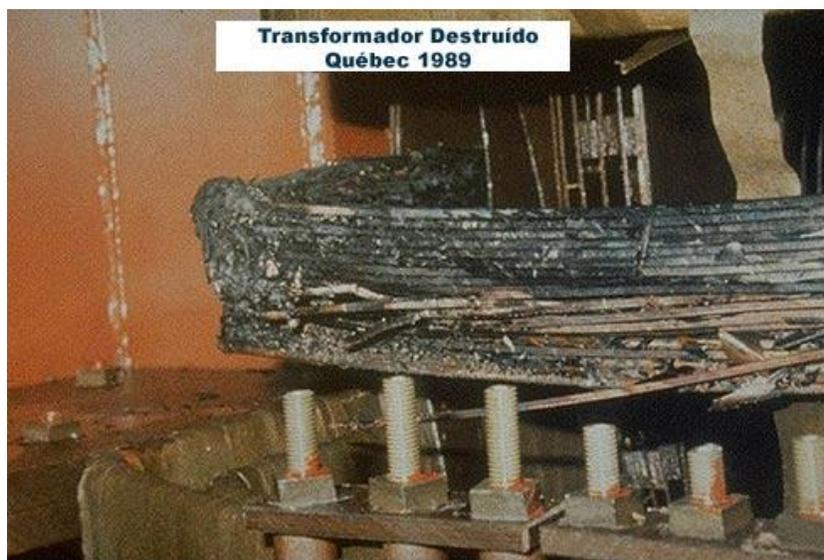


Figura 2.37 – Transformador supostamente destruído em 13 de março de 1989 pela ocorrência de tempestade geomagnética de grande proporção associada a uma explosão solar. (adaptado de: Severe Space Weather Events, 2008)

Durante um longo período (1999-2005), a partir de medições realizadas em gasodutos em regiões de altas latitudes na Europa, estudou-se a distribuição na incidência de GICs por dia ao longo de anos. Sugeriu-se uma diminuição do número de GICs com a diminuição anual do número de manchas solares, com exceção do ano de 2003 (Huttunen et al. 2008). Este ano é suscetível por ter sido relacionado com o período Halloween (outubro-dezembro), período altamente perturbado (Figura 2.38). No entanto, não existem estudos de falhas em sistemas elétricos de energia para linhas de transmissão que sejam monitorados continuamente, embora haja um número de estudos que mostram exemplos individuais altamente sugestivos da incidência de GICs associados com tempestades geomagnéticas (veja por exemplo: Kappenman 2005, Trivedi et al. 2007, Watari et al. 2009). Apesar do famoso evento de Quebec em 13 de março de 1989 ter sido relacionado à falha em sistema de energia elétrica supostamente causada por GICs, não existem muitas correlações óbvias diretas entre a ocorrência de GICs e falhas em sistemas de energia elétrica reais. Em uma revisão em sistemas de energia elétrica feitos na Finlândia verificou-se que a probabilidade de uma falha causada diretamente por GICs ocorrer é de uma a cada 20 anos (Elovaara 2007). Ou seja, os GICs efetivamente ocorrem, porém raramente causam falhas.

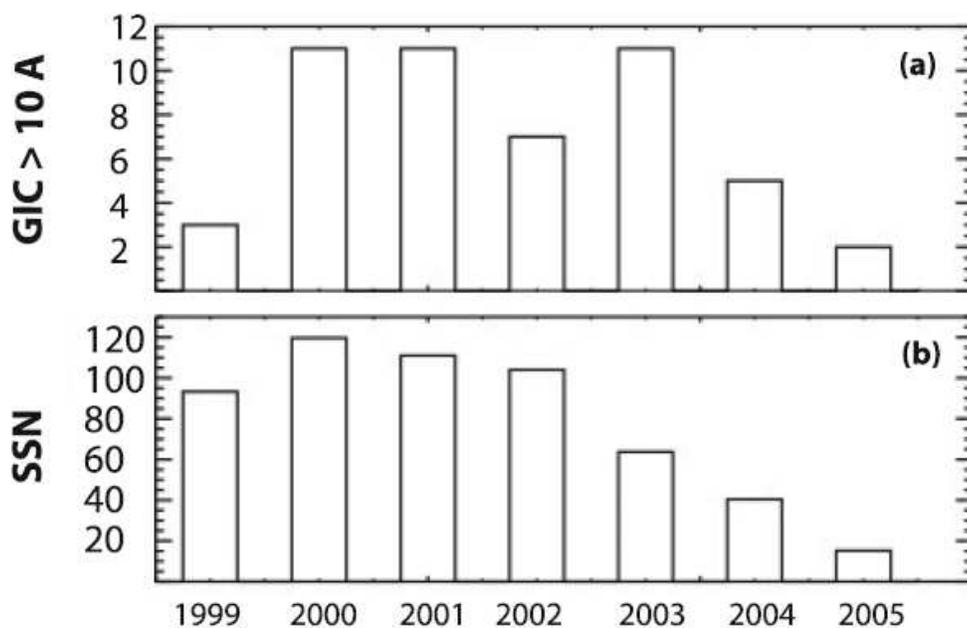


Figura 2.38 (a) histograma com média anual de distribuição diária de GIC (amplitude máxima >10A) entre os anos de 1999-2005 (b) número médio anual de manchas solares (SSN) referente ao ciclo solar 23 no mesmo período (Huttunen et al. 2008).

Em uma revisão Thomson et al. (2010) resumiu os principais “10 fatos conhecidos” e os “10 fatos desconhecidos” sobre os riscos de GICs para as redes de energia elétrica. Entre os fatos desconhecidos, deve-se ressaltar a necessidade de um melhor conhecimento dos registros de eventos solares e os subprodutos do meio interplanetário os quais exercem uma grande influencia sobre a Terra. Vários estudos mostram exemplos altamente sugestivos de falhas de incidência um-para-um em sistemas de energia associadas a ocorrências de GICs (veja por exemplo: Kappenman, 2005; Trivedi et al, 2007; Watari et al, 2009). No entanto, surgem duas questões básicas não suficientemente esclarecidas: (a) quantos GICs significativamente não causam falhas em sistemas de energia? (b) como várias falhas em sistemas de energia não estão associadas aos GICs?

Por outro lado, há escassos relatos em análises sistemáticas de falhas em sistemas (redes) de energia elétricas reais, independentemente de suas causas, obtidos durante um longo período de tempo (Hoyt e Schatten, 1997). Para esses estudos, as condições das redes devem permanecer inalteradas por um longo período de anos. Dessa forma, a base de dados é uniforme e pode ser comparada com a atividade solar ou com as perturbações ambientais geofísicas. Porém os dados nessas condições são raramente encontrados e disponibilizados.

Por outro lado, distúrbios geomagnéticos não são a única causa geofísica que podem afetar sistemas tecnológicos na superfície da Terra. A importância da ionosfera como uma parte do circuito elétrico atmosférico global e a sua influência sobre os sistemas tecnológicos é uma possibilidade que não tem sido muito estudada. Circuitos equivalentes foram propostos para descrever o complexo circuito global formado pela superfície da Terra-ionosfera, definindo a eletrosfera (Rycroft et al., 2000;. Harrison 2004, Tinsley e Yu 2004;. Aplin et al. 2008). Em um simplificado circuito elétrico equivalente, as regiões de tempo bom na eletrosfera podem ser representadas por uma resistência e um capacitor em paralelo, com áreas de tempestades que atuam como geradores de corrente (Figura. 2.39).

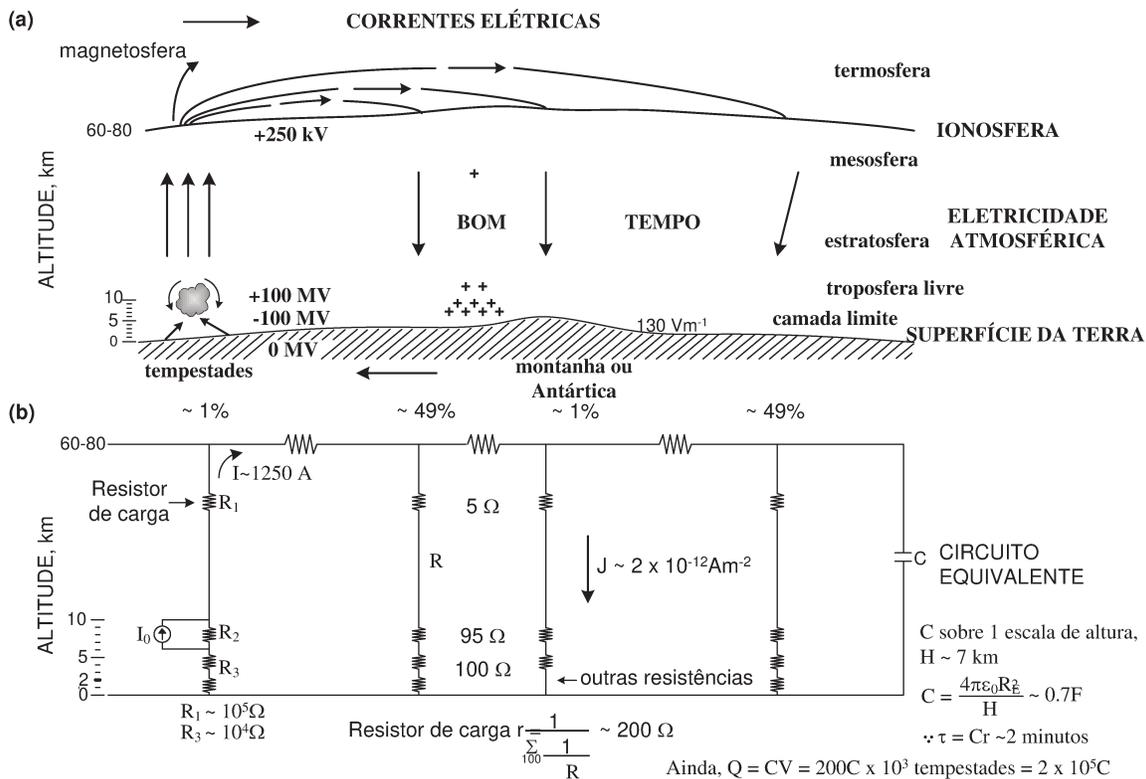


Figura 2.39 - Representação de um modelo do circuito elétrico global equivalente entre a superfície terrestre e a alta atmosfera (ionosfera) apresentado por Rycroft et al. (2000). (a) No diagrama superior está ilustrada uma parte do circuito elétrico global, sendo que do lado esquerdo está uma região de tempestade responsável por fechar o circuito elétrico (descargas atmosféricas). As setas em negrito representam as correntes elétricas. No centro há uma distribuição de cargas positivas indicando uma região de tempo bom. (b) No diagrama inferior, está representado um circuito elétrico equivalente para (a), ilustrando resistores para as regiões de bom tempo e de tempestade. (adaptado de: Rycroft et al. 2000).

Os autores citados têm mostrado que cerca de 95% da resistência ionosfera-solo está abaixo de 10 km de altura, destacando a importância da troposfera no circuito elétrico global. Segundo, Harrison (2004) e Rycroft (2006) algumas alterações na condutividade da troposfera podem surgir a partir de influências externas sobre a atmosfera superior. O aumento da incidência de raios cósmicos (GCR – Galactic Cosmic Rays) com a redução da atividade no ciclo solar é conhecido por aumentar a condutividade atmosférica, afetando, assim, o regime de eletricidade e das nuvens (Rycroft et al 2000; Stozhkov et al, 2001a, b; Stozhkov 2003; Rycroft 2006). Um aumento da condutividade atmosférica tem sido associado também com a mudança da cobertura de nuvens sobre o planeta e o aumento da ocorrência de raios (Rycroft et al 2000; Stozhkov et al, 2001a, b; Stozhkov 2003; Rycroft

2006). Essas alterações na troposfera podem ter uma influência significativa sobre os sistemas tecnológicos na superfície da Terra.

Neste estudo, foram analisados os primeiros dados de uma série longa e ininterrupta sobre falhas em linhas de transmissão de alta tensão no sudeste do Brasil. Os dados foram consistentemente anotados por quase nove anos (1^o de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006), ou seja, cobrindo uma significativa parte da atividade solar do ciclo 23.

3. REDES DE TRANSMISSÃO ELÉTRICA

O sistema elétrico consiste de segmentos de circuitos que transportam e distribuem a energia elétrica. Corresponde, de uma forma simplificada, à geração, transmissão, conversão, distribuição e consumo, conforme ilustra a Figura 3.1. No Brasil, a maior parte da energia elétrica é gerada por usinas hidrelétricas, percorrendo longas distâncias. A transmissão da energia é ilustrada nas Figuras 3.2 (a) e (b). A interligação da malha elétrica brasileira possibilita a troca de energia entre todas as regiões do país.

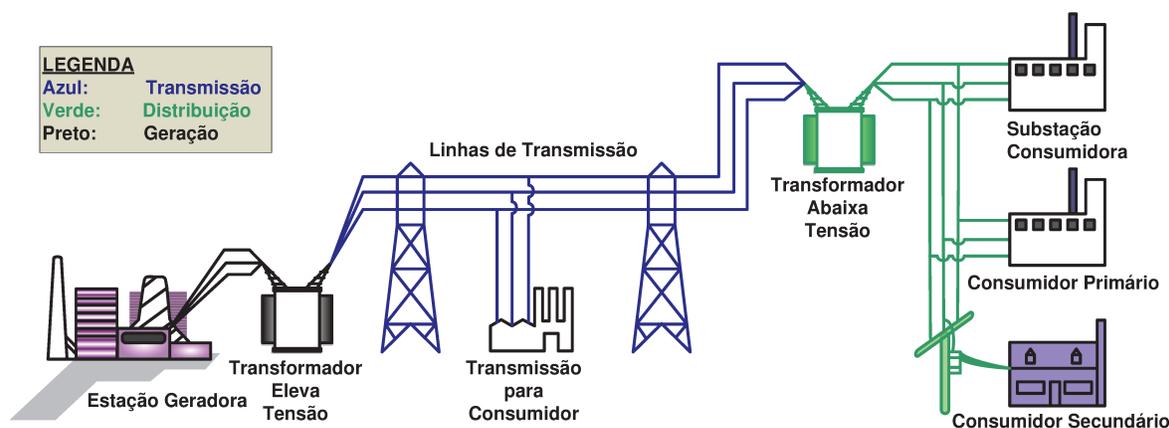
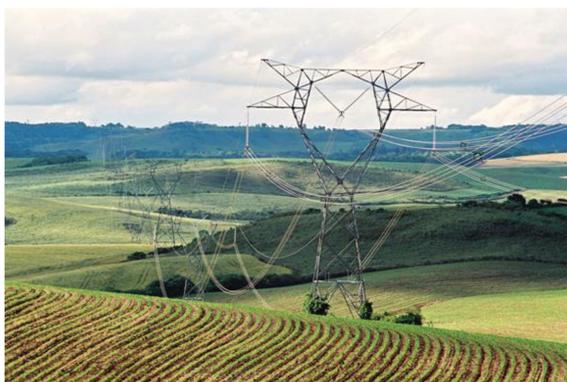


Figura 3.1 – Esquema simplificado do sistema elétrico (geração, transmissão, conversão, distribuição e consumo) (adaptado de: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABcoUAF/trabalho-escrito-transmissao-media-tensao>)



(a)



(b)

Figura 3.2 – Fotos de linhas de transmissão de alta tensão. (<http://www.energianobrasil.com.br/category/linhas-de-transmissao/>).

O presente estudo está focado em desligamentos de linhas de transmissão de alta tensão distribuídas no Estado de São Paulo (região sudeste do Brasil).

3.1. AS LINHAS DE TRANSMISSÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO

Os dados aqui analisados foram disponibilizados pela concessionária ISA.CTEEP, sucessora de empresas previamente estabelecida no Estado de São Paulo. Em função do programa de privatização do Governo paulista (fevereiro de 1999) e pela cisão de ativos da Companhia Energética de São Paulo (CESP), deu-se origem à Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP). Em 2001, a Empresa Paulista de Transmissão de Energia Elétrica (EPTE) foi incorporada à CTEEP, consolidando-se como a única concessionária de transmissão do Estado de São Paulo. Essa nova configuração acabou por fortalecer ainda mais a empresa. Em junho de 2006, com a privatização da empresa por meio de um leilão público na Bovespa, o Grupo ISA passa a ser o novo controlador da CTEEP (ISA.CTEEP, 2009a).

Atualmente a ISA.CTEEP é a principal empresa privada de transmissão de energia elétrica em atuação no Brasil. Ela é responsável pela transmissão de 30% de toda a energia elétrica produzida no país e por 60% da consumida na região sudeste. (ISA.CTEEP, 2009b, 2009c), possuindo redes de linhas de transmissão em várias tensões. Essas linhas de alta voltagem são responsáveis pelo transporte da energia, desde os pontos de conexão com as usinas geradoras e interligações com outras transmissoras até as redes das concessionárias distribuidoras, as quais atendem aos consumidores finais de energia elétrica.

A concessionária ISA.CTEEP disponibilizou uma completa base de dados de desligamentos relativa a nove de suas linhas de transmissão para o período de 1o de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006 no Estado de São Paulo. Esse período é de aproximadamente nove anos, compreendendo uma significativa fração do ciclo solar 23. Na tabela 4 estão as extensões em km de nove linhas de transmissão da ISA.CTEEP.

Tabela 4 – Extensão de nove das linhas de transmissão da concessionária de energia ISA. CTEEP (período de 1998-2006).

Linha (kV)	Extensão em km
20	50,00
34,5	25,00
69	1.377,60
88	2.828,70
138	10.625,40
230	1.589,80
345	422,10
440	7.294,50
460	42,80

3.2. SELEÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138 kV E 440 kV

Os critérios nos registros dos dados referentes aos desligamentos devem apresentar uniformidade para todo o período, sendo essa exigência fundamental para a consistência nos estudos realizados. Um complicador na uniformidade das amostragens de desligamentos pode ter ocorrido com a mudança na administração da concessionária no período referente à base de dados fornecida.

Uma inspeção na distribuição dos eventos de desligamentos das nove linhas de transmissão mostrou que as linhas de 138 kV e 440 kV apresentam a melhor homogeneidade e consistência nos registros dos desligamentos. As linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV permaneceram basicamente com a mesma extensão no período estudado (1998 – 2006) e apresentam as maiores extensões como pode ser observado na tabela 4.

Os registros dos desligamentos nas linhas de transmissão é uma prática sistemática realizada desde a época da CESP até os dias atuais pelo grupo ISA.CTEEP. Cada desligamento é classificado e registrado de acordo com o tipo de interrupção ocorrida. A concessionária classifica as causas das interrupções em 95 tipos distintos, como por exemplo: aeronaves, animais, causas indeterminadas, circuitos abertos, descargas

atmosféricas, explosões, fogo, manobras indevidas, queimadas, sobreaquecimento, entre outras.

Os desligamentos de todo o histórico em todas as linhas da tabela 4 para o período observado totalizam 12.047 interrupções. A maior quantidade dos desligamentos está claramente relacionada a eventos atribuídos às descargas atmosféricas (DA) 4.695 (39%) e às causas indeterminadas (CI) 3.092 (25,7%). Os percentuais relativos às duas causas somam aproximadamente 65% dos desligamentos de todas as nove linhas de transmissão. As demais causas apresentam percentuais de incidência muito baixos, sem significado estatístico para o presente estudo.

Os desligamentos atribuídos às descargas atmosféricas (DDA) apresentam características típicas, como as escalas rápidas de religamento da linha de transmissão (milissegundos), constituindo uma coleção de dados uniforme, largamente independente dos critérios de busca das causas que levaram aos respectivos desligamentos. Por outro lado, os desligamentos por causas indeterminadas (DCI) não foram considerados nesta pesquisa, pois os dados podem apresentar possíveis efeitos de seleção, dependendo do número de profissionais da concessionária dedicados à investigação das causas. Estes efeitos de seleção seriam causados pela variação dos critérios utilizados na identificação das causas finais de parte dos desligamentos, que não foram uniformes em diferentes períodos considerados da amostragem. Por exemplo, uma interrupção classificada como causa indeterminada, poderia ser colocada em outra categoria após uma investigação mais criteriosa (profunda). O número de desligamentos atribuídos às causas indeterminadas depende de quão cuidadosa foi a pesquisa para a identificação do desligamento. Essa busca depende do número de pessoas contratadas para realizar esse trabalho, sendo distinto para diferentes anos. O número total de desligamentos atribuído a causas indeterminadas, no entanto, é real e foi incluído nas estatísticas. A classificação das 93 causas restantes é bastante subjetiva. Elas correspondem a poucos casos em cada categoria e por serem demasiadamente pequenos não tem significância estatística para o estudo.

A representação das linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV no Estado de São Paulo está na Figura 3.3. A Figura 3.4 indica a localização do Estado de São Paulo em

relação à América do Sul e à Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA – *South American Geomagnetic Anomaly*) descrita pelo contorno das linhas de campo magnético.

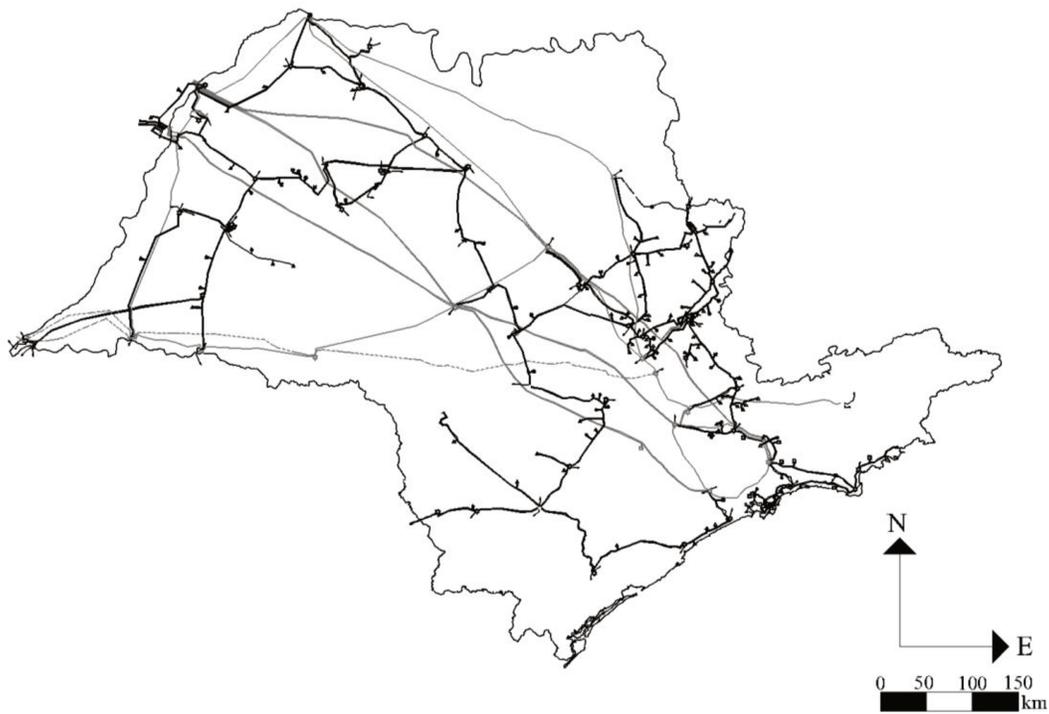


Figura 3.3 – Representação das redes de transmissão de alta tensão das linhas de 138 kV (linhas pretas) e 440 kV (linhas cinzas) da ISA.CTEEP no Estado de São Paulo. As coordenadas geográficas da cidade de São Paulo são 23°32'51''S e 46°38'10''W.

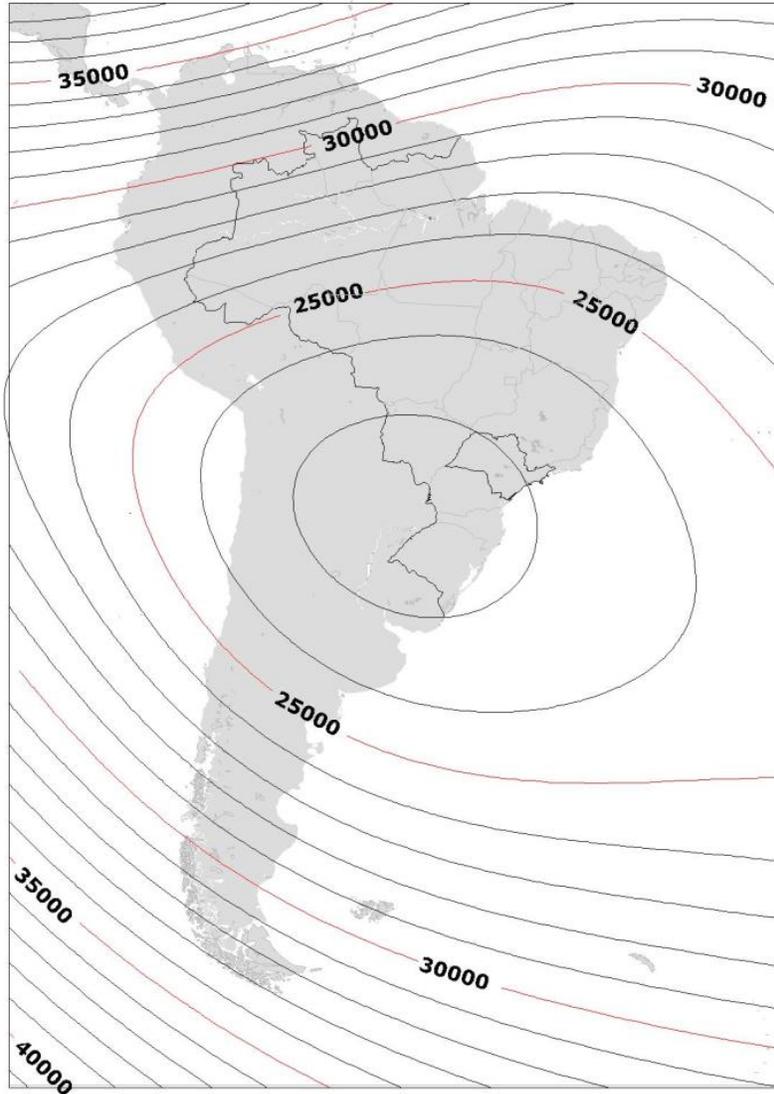


Figura 3.4 – Localização do Brasil na América do Sul e do Estado de São Paulo que está no centro da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA – *South American Geomagnetic Anomaly*), adaptado a partir do mapa geomagnético da NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (2010).

Os desligamentos para todo o período devido às descargas atmosféricas na rede de 138 kV é de 1.957 em um total de 4.572 correspondendo a 42,80%. Já para a rede de 440 kV são 170 em um total de 763 correspondendo a 22,28%. Nas tabelas 5 e 6 estão listadas as 10 causas de desligamentos mais significativas, com as quantidades e respectivos percentuais relativos às linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV para todo o período estudado.

Tabela 5 – Percentuais das interrupções devido às 10 primeiras causas para a rede de 138 kV da ISA.CTEEP para todo o período (1º de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006).

Causa das falhas	Número de falhas	%
Descarga Atmosférica	1957	42.80%
Indeterminada	868	18.99%
Ocorrência em Outro Componente da Empresa	176	3.85%
Queimada/Fogo sob a Linha	145	3.17%
Falha de Proteção de Outros Componentes	126	2.76%
Condições Anormais de Operação	109	2.38%
Relé de Proteção - Falha/Defeito	108	2.36%
Atuação Direta Prot. Outros Componentes	93	2.03%
Outras - Sistema Elétrico	90	1.97%
Perturbação em Concessionária Reg/Mun	81	1.77%
85 causas restantes	819	17.91%
Total	4572	100.00%

Tabela 6 – Percentuais das interrupções devido às 10 primeiras causas para a rede de 440 kV da ISA.CTEEP para todo o período (1º de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006).

Causa das falhas	Número de falhas	%
Descarga Atmosférica	170	22.28%
Queimada/Fogo sob a Linha	92	12.06%
Indeterminada	55	7.21%
Atuação Direta Prot. Outros Componentes	52	6.82%
Acidental - Serviços/Testes	48	6.29%
Ocorrência em Outro Componente da Empresa	44	5.77%
Condições Anormais de Operação	26	3.41%
Outras - Sistema Elétrico	24	3.15%
Relé de Proteção - Falha/Defeito	22	2.88%
Teleproteção - Ruído/Falha/Defeito	19	2.49%
85 causas restantes	211	27.65%
Total	763	100.00%

De acordo com o critério da ISA.CTEEP, os desligamentos atribuídos às descargas atmosféricas correspondem à presença de chuvas/temporais nas áreas onde e quando ocorreram os desligamentos. A distribuição temporal dos desligamentos (totais mensais) atribuídos às descargas atmosféricas para todo o período estudado está representado na Figura 3.5 para a rede de transmissão de 138 kV. A Figura 3.6 mostra as mesmas informações para a rede de transmissão de 440 kV.

Em princípio são observadas três tendências:

- (a) O número de desligamentos é consideravelmente maior para a rede de 138 kV.
- (b) O número de falhas é maior para a época das chuvas, período em que as tempestades são mais frequentes na parte sudeste do Brasil (outubro a março).

(c) Há uma significativa redução (mais do que 50%) do número de desligamentos atribuídos às descargas atmosféricas (acumulado nos meses chuvosos) na progressão do período estudado (tempo).

As tendências (b) e (c) são evidentes para a linha de transmissão de 138 kV e fortemente verificadas para a linha de transmissão de 440 kV.

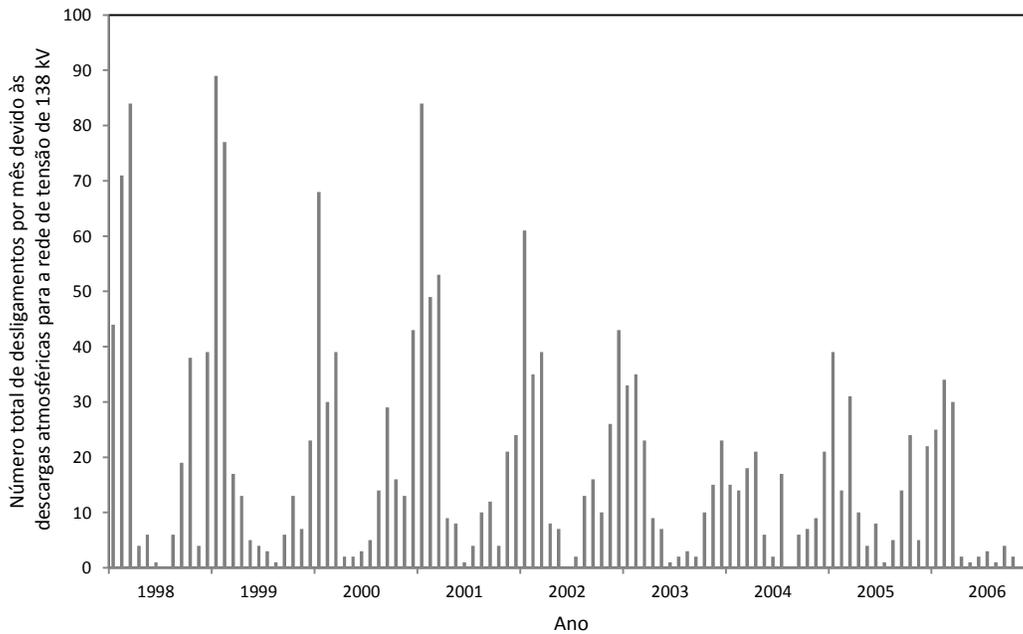


Figura 3.5 – Total dos desligamentos mensais da rede de transmissão de 138 kV atribuídas às descargas atmosféricas. Há um número expressivo de ocorrências durante o período das chuvas (outubro – março) e uma queda progressiva para anos sucessivos.

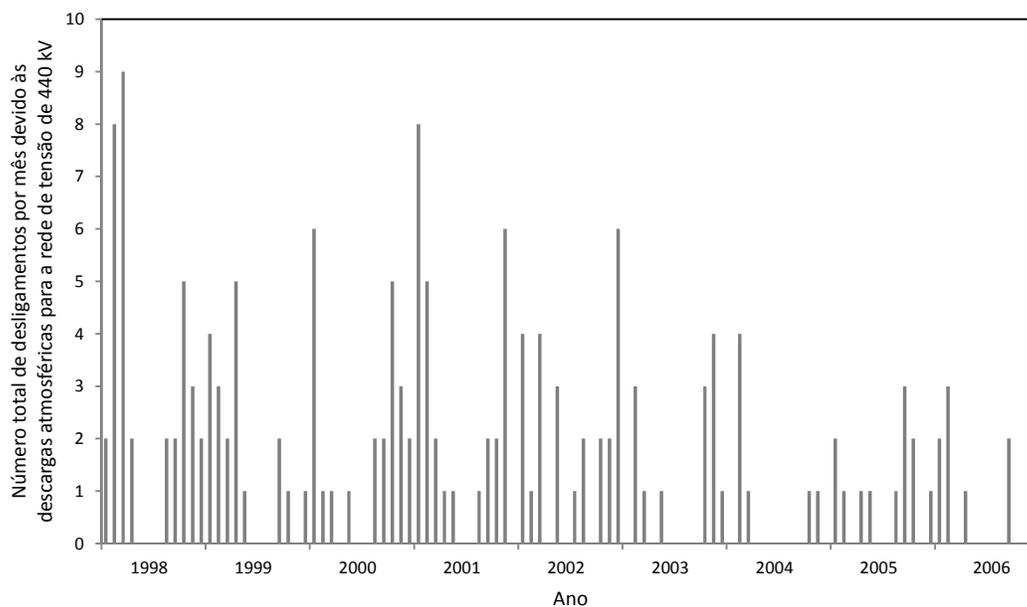


Figura 3.6 – Total dos desligamentos mensais da rede de transmissão de 440 kV atribuídas às descargas atmosféricas. As tendências são similares à distribuição dos eventos em 138 kV, apresentando um decréscimo nos anos sucessivos e um número expressivo de ocorrências durante o período das chuvas (outubro – março).

4. ATIVIDADE SOLAR NO CICLO 23 E DESLIGAMENTOS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138 kV E 440 kV

Conforme exposto anteriormente, durante um ciclo solar podem ser observadas na atmosfera solar (fotosfera) a ocorrência de manchas e de fenômenos energéticos e transientes. Todos variam periodicamente com o ciclo solar de manchas de aproximadamente 11 anos. É sabido que no início de um novo ciclo praticamente não há ocorrência de manchas solares, porém no decorrer do ciclo o número de manchas cresce atingindo um máximo e, em seguida, decresce. Durante o período de máximo de manchas solares os fenômenos energéticos e transientes também são mais frequentes, sendo esse período denominado de máximo da atividade solar.

O ciclo solar 23 teve seu início aproximado em maio de 1996 e seu término em dezembro de 2008. O período de máximo do ciclo se iniciou no final do ano de 1999 e estendeu-se até o ano de 2002, tendo sua maior concentração nos anos 2000 e 2001. Durante esse ciclo, no final do ano de 2003 houve um período com atividades solares e geomagnéticas excepcionalmente intensas. Seu início ocorreu em meados do mês de outubro e estendeu-se até dezembro, sendo denominado de “período *Halloween*”. A Figura 4.1 ilustra o número de manchas solares durante o ciclo solar 23 e as do início do ciclo solar 24, indicando uma previsão para o restante do ciclo solar 24 (linha preta mais intensa).

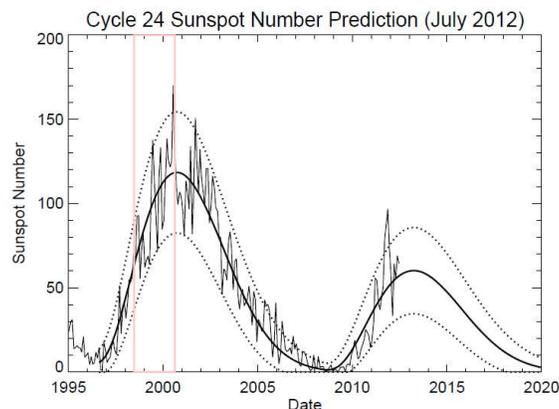


Figura 4.1 – Representação do número de manchas solares durante o ciclo solar 23 e as do início do ciclo solar 24. A linha preta mais intensa indica uma média para o ciclo de manchas solares para o restante do ciclo solar 24. (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>)

4.1. CORRELAÇÕES ENTRE ATIVIDADE SOLAR E DESLIGAMENTOS

Os principais índices utilizados para especificar o ambiente geofísico para esta pesquisa foram o número de manchas solares (R), o índice magnético planetário (Kp), o índice magnético que mede a atividade geomagnética, utilizado para avaliar a intensidade das tempestades geomagnéticas (Dst) e o número de raios cósmicos que atingem o solo (CR – *Cosmic Ray*). Os dados foram obtidos no serviço de dados disponíveis no site da *National Oceanic and Atmospheric Administration em Solar Indices Data* (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 1998-2006). Embora haja relações de causalidade entre a atividade solar, índices magnéticos e os fluxos de raios cósmicos, essas relações variam ao longo de um ciclo de atividade solar.

4.1.1. Falhas nas redes de transmissão e índices geomagnéticos

Observa-se que as análises diária, mensal e anual dos desligamentos nas redes de transmissão estudadas, não apresentaram relacionamento claro com nenhum dos índices geomagnéticos Kp e Dst em todo o período de aproximadamente 9 anos. A Figura 4.2 (a) mostra que para todo o período estudado (painéis intermediário e inferior) estão ilustradas as médias mensais dos índices Kp e Dst, respectivamente. Já no painel superior tem-se o total de desligamentos mensais ocorridos nas linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV devido às descargas atmosféricas. A parte (b) da figura ilustra, para o ano de 2003, nos painéis intermediário e inferior, os valores diários dos índices Kp e Dst, respectivamente. O painel superior mostra o total de desligamentos diários das linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV devido às descargas atmosféricas para o mesmo ano. Para os anos de 1998 a 2002 e 2004 a 2006, a representação gráfica dos dados apresenta uma configuração similar. Durante o período de outubro a dezembro do ano de 2003 ocorreram atividades solares e geomagnéticas excepcionalmente intensas, caracterizando o período denominado “*Halloween*”. Entretanto nenhuma correlação clara foi encontrada entre os índices solares, geomagnéticos e incidência de desligamentos.

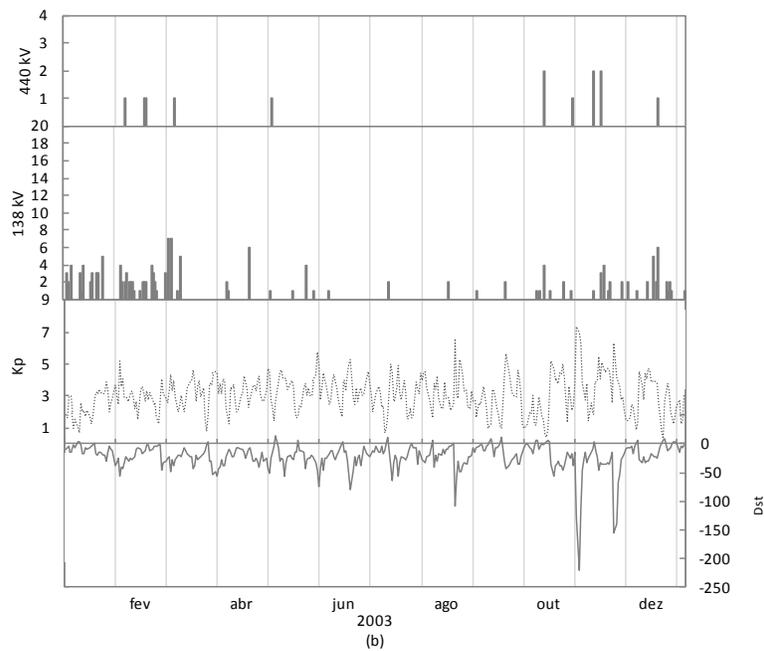
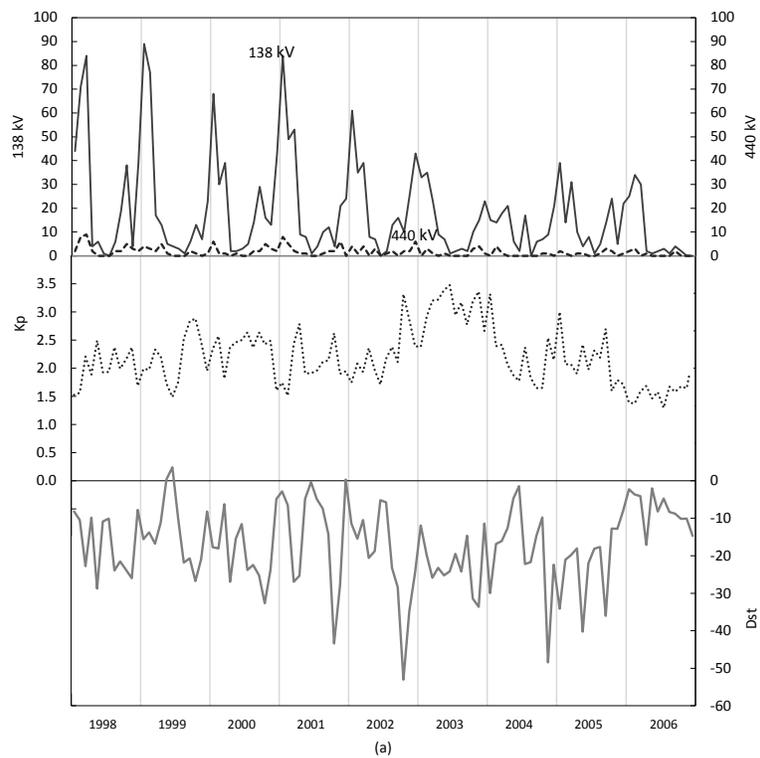


Figura 4.2 – Desligamentos por descargas atmosféricas nas redes de transmissão 138 kV e 440 kV comparados com índices geomagnéticos Kp e Dst. Médias mensais dos índices e totais mensais de desligamentos são mostradas em (a) e valores diários são mostrados em (b) para o ano de 2003.

4.2. MANCHAS SOLARES (*R*) E RAIOS CÓSMICOS (*CR*)

Como já descrito, a variação da quantidade de raios cósmicos (*CR*) que penetram na atmosfera terrestre varia ao longo de um ciclo solar de aproximadamente 11 anos. Em períodos de alta atividade solar há uma diminuição da quantidade de *CR*, em períodos de baixa atividade há um aumento. Essa dinâmica é bastante conhecida sendo denominada de efeito Forbush.

4.2.1. Análise em grande escala de tempo (anual)

Os desligamentos anuais ocorridos por descargas atmosféricas e sua comparação com o número de manchas solares (*R*) e o de raios cósmicos (*CR*) estão representados na Figura 4.3. No painel superior estão representados os desligamentos por descargas atmosféricas para as redes de transmissão de 138 kV e 440 kV. O painel inferior mostra o número médio mensal para as manchas solares (*R*) e raios cósmicos (*CR*). O decaimento do número de desligamentos é de 67% para a rede de 138 kV (316 desligamentos em 1998 para 104 em 2006) e de 77% para a rede de transmissão de 440 kV (35 desligamentos em 1998 para 8 em 2006). A redução do número de desligamentos por descargas atmosféricas acompanha aproximadamente a redução do número de manchas solares (*R*). Para o primeiro ano da análise (1998), no entanto, houve uma tendência oposta, um elevado número de desligamentos para um fluxo elevado de raios cósmicos (*CR*). Como não se tem o número de desligamentos disponíveis para os anos anteriores, pode-se provisoriamente atribuir essa discrepância a uma probabilidade estatística.

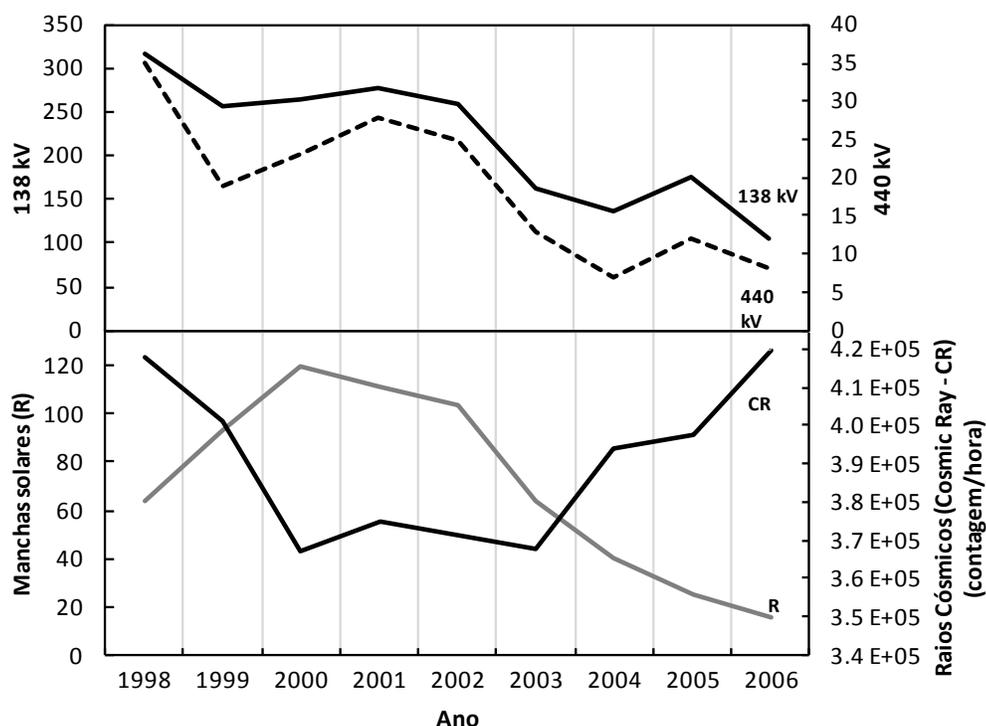


Figura 4.3 – O painel inferior apresenta as médias anuais de manchas solares (R) e fluxo de raios cósmicos (CR) (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION 1998-2006). No painel superior estão os totais anuais dos desligamentos por descargas atmosféricas nas redes de transmissão de 138 kV (linha contínua) e 440 kV (linha tracejada).

Na Figura 4.4 (a) e (b) tem-se o diagrama de dispersão, a longo prazo, dos desligamentos, totais anuais por descargas atmosféricas das redes de transmissão de 138 kV e 440 kV com o número médio anual de manchas solares (R). Os melhores ajustes de linhas de tendência apresentam coeficiente de correlação de 0,78 para a rede de 138 kV e de 0,67 para a rede de 440 kV. A probabilidade correspondente para esses coeficientes de correlação para ser acidental é inferior a 2% e 5%, respectivamente (Bevington e Robinson, 1992). A associação é bastante significativa, sugerindo a possibilidade de poder haver uma ligação física verdadeira entre estes dois processos bastante distintos.

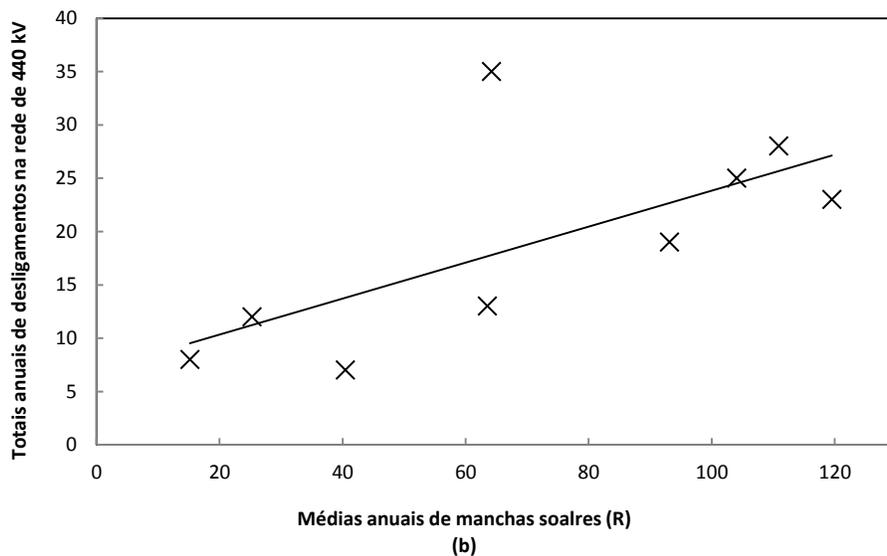
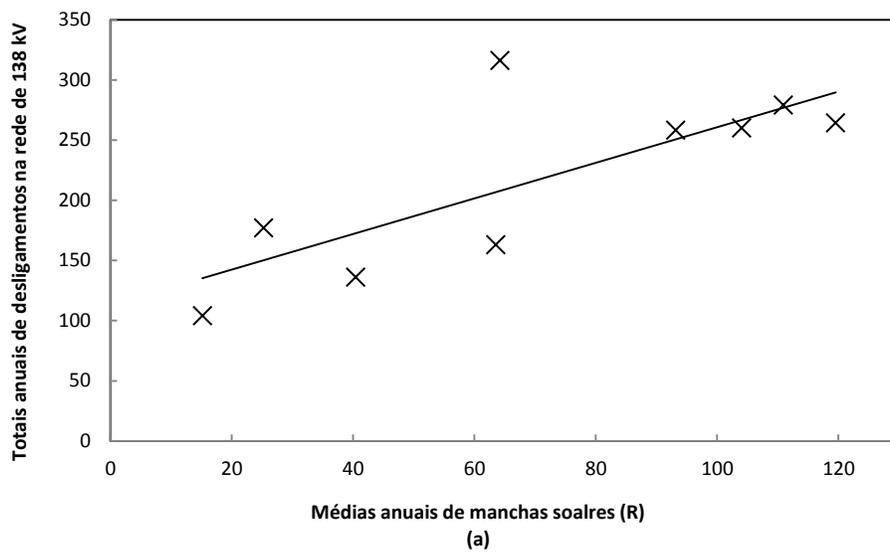


Figura 4.4 – (a) Diagrama de espalhamento para os totais anuais dos desligamentos em consequência das descargas atmosféricas para a linha de transmissão de 138 kV e as médias anuais de manchas solares (R). (b) Diagrama de espalhamento para os totais anuais dos desligamentos em virtude das descargas atmosféricas para a linha de transmissão de 440 kV e as médias anuais de manchas solares (R).

4.2.2. Análise de falhas em escalas mensais

O total dos desligamentos mensais para as linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV, os valores médios mensais das manchas solares (R) e o fluxo de raios cósmicos (CR) para todo o período estudado estão ilustrados na Figura 4.5. Nesta figura é possível a

visualização de outras informações. Com a diminuição do número de manchas solares há um aumento do fluxo de raios cósmicos. Observa-se um grande aumento do número de raios cósmicos após o período de atividades geomagnéticas excepcionalmente intensas (*Halloween*) de outubro a dezembro de 2003. Esse resultado é muito similar a valores mensais de manchas solares contra a contagem mensal de ejeções de massa coronal, diretamente relacionada à atividade geomagnética no período 1996-2007 (Thomson et al. 2010).

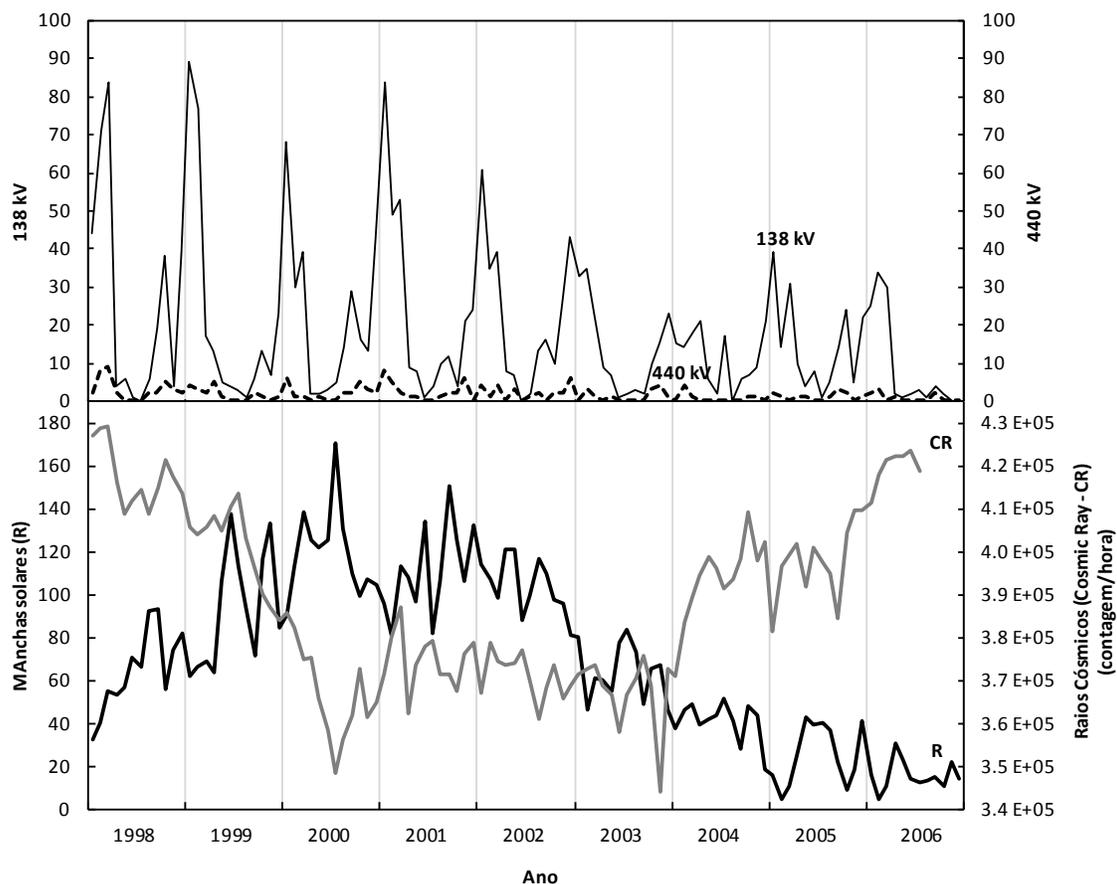


Figura 4.5 – No painel inferior estão os valores médios mensais de manchas solares (R) e fluxo de raios cósmicos (CR) (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION 1998-2006). O painel superior mostra o total mensal dos desligamentos causadas pelas descargas atmosféricas nas redes de transmissão de 138 kV (linha contínua) e 440 kV (linha tracejada).

4.2.3. Análise de falhas em curtas escalas de tempo

Valores diários do número de manchas solares, fluxo de raios cósmicos e desligamentos atribuídos às descargas atmosféricas para as redes de 138 kV e 440 kV, relativo ao ano de 2003, estão ilustrados na Figura 4.6. Para os períodos de 1998-2002 e 2004-2006 as curvas apresentam tendência similar às 2003.

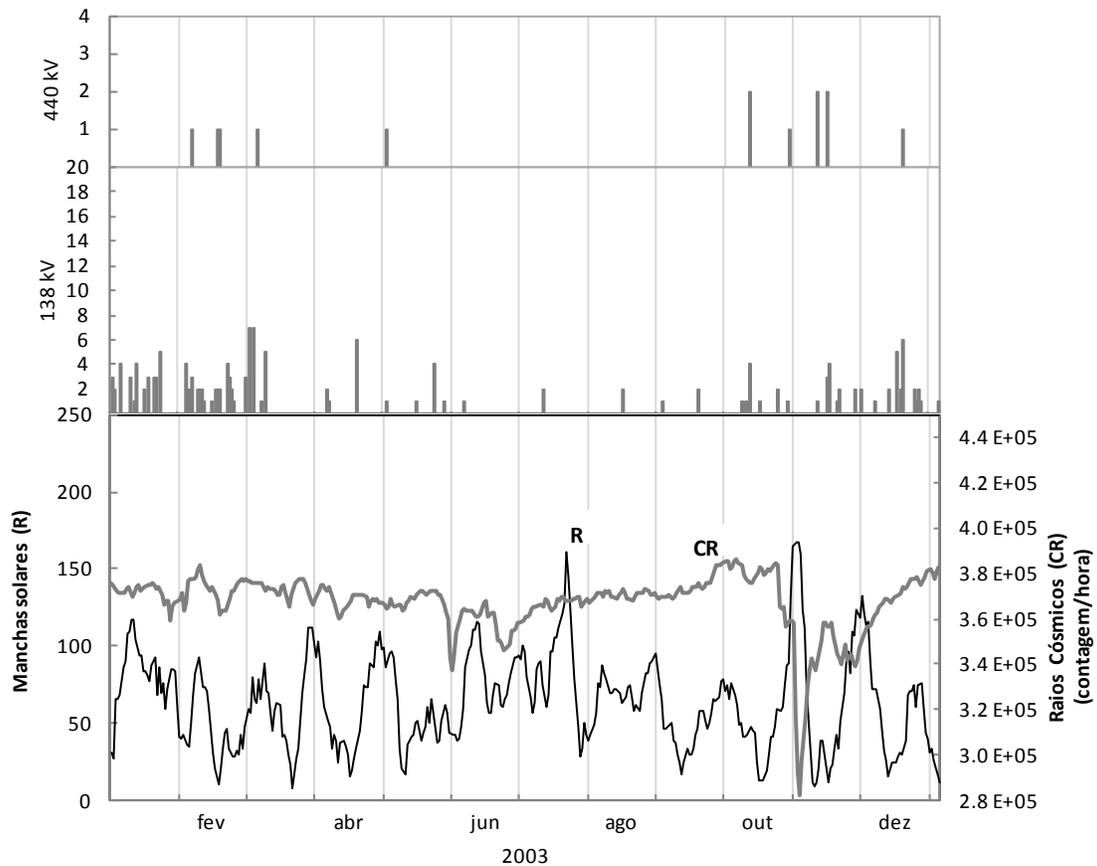


Figura 4.6 – Para o ano de 2003 estão representados: no painel inferior os valores diários de manchas solares e fluxo de raios cósmicos (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION 1998-2006). O painel superior indica o total diário dos desligamentos devido às descargas atmosféricas nas linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV.

Os desligamentos nas linhas de transmissão estão claramente concentrados durante os meses de tempestades (outubro–março) em todos os anos. Pode-se dizer que os desligamentos não apresentam uma associação mais estreita com os índices *R* e *CR* em variação de tempos curtos.

4.3. INCIDÊNCIA DE RELÂMPAGOS

Durante o mínimo da atividade solar, em um ciclo de 11 anos, o fluxo de raios cósmicos galácticos entra na atmosfera terrestre dezenas de vezes mais do que durante o máximo da atividade solar. Esse comportamento é contrário quando se verifica as partículas carregadas do Sol (fluxo de energia). Elas chegam em menor quantidade em relação à fase de um mínimo solar. Ambos os tipos de partículas interagem com a atmosfera terrestre provocando alterações químicas que acabam afetando a nucleação de gotas de água para a formação de nuvens. (Rycroft, Israelsson, Price, 2000).

Um completo levantamento sobre a ocorrência de raios detectada pela rede de sensores de raios sobre o Brasil, abrangendo o período estudado, foi revisado por Pinto et al. (2007). Esse estudo indica uma significativa ocorrência de relâmpagos nuvem-solo na região sudeste do Brasil. Além disso, Pinto (2009, comunicação pessoal) informou que 0,8 a $1,4 \times 10^6$ de descargas atmosféricas por ano, no período de 1999 a 2006, ocorreram somente no Estado São Paulo. Aproximadamente 70% dessas descargas atmosféricas ocorreram durante os meses de verão/tempestades (outubro-março), concordando com a tendência sazonal de falhas de energias mostradas nas Figuras 3.5, 3.6 e 4.5.

O total anual de descargas atmosféricas detectado no sudeste do Brasil (fornecido por Pinto 2009, comunicação pessoal) foi comparado com a média anual do número de manchas solares (R), para todo o período. Essa comparação está retratada na Figura 4.7. Não se observa nenhuma associação evidente entre os fenômenos, embora um pequeno excesso de raios possa ser observado nos anos de máximo da atividade solar (2000 e 2001). Outra elevação desse fenômeno é verificada após o ano de 2004.

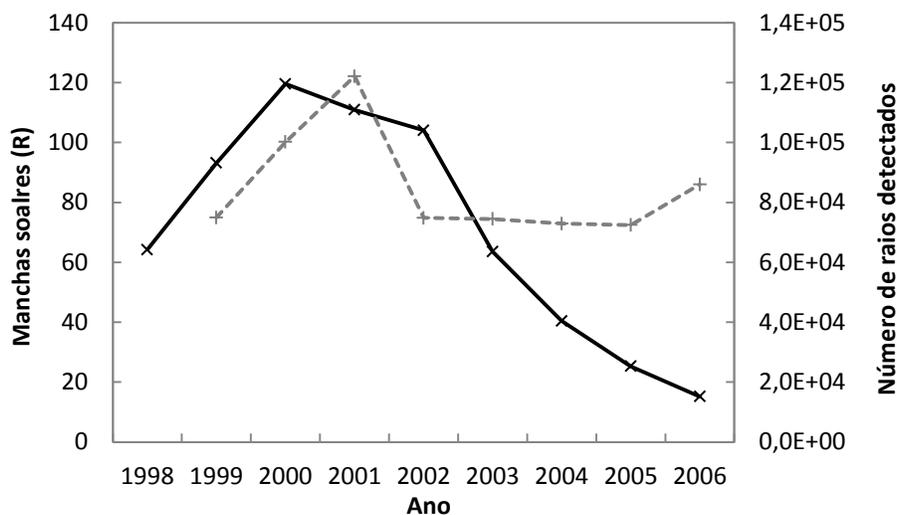


Figura 4.7 – Totais anuais de raios nuvem-solo (linha cinza tracejada) na região sudeste do Brasil (Pinto 2009), para o período de 1999-2006, detectado pela rede de sensores de raios do Brasil, comparado com o número médio anual de manchas solares (R) (linha preta contínua).

Por outro lado, deve-se notar que o número total de descargas atmosféricas detectadas pela rede de sensores é de mais de 3 ordens de grandeza quando comparado ao número de desligamentos nas linhas de energia de 138 kV e 440 kV atribuídos às descargas atmosféricas. As duas bases de dados não são facilmente comparáveis, em consequência da grande diferença numérica. Além disso, as linhas de transmissão de energia elétrica são planejadas para responder ao menor número possível de descargas atmosféricas, diferentemente da rede de sensores de raios que é concebida para responder ao maior número possível de eventos.

A ausência de uma associação entre tempestades e atividade solar representada pelo número de manchas solares havia sido obtida para a fase de declínio do ciclo solar 20 no período de 1967-1976 (Freier 1978). O estudo desenvolvido por Freier (1978) apresenta restrições para comparação por se referir à localização de uma única cidade (Minneapolis, Minnesota, EUA) e envolveu um número consideravelmente menor de tempestades (apenas dezenas por ano).

5. DISCUSSÃO DAS CORRELAÇÕES

As linhas de transmissão 138 kV e 440 kV da concessionária de energia elétrica ISA.CTEEP localizadas na região sudeste do Brasil, mostraram-se extremamente robustas e insensíveis às atividades de raios, apresentando respostas extremamente baixas para todos os raios registrados na região e no período estudado (cerca de 0,25% e 0,02% respectivamente). Embora o número de desligamentos das linhas de transmissão atribuído às descargas atmosféricas representar uma pequena fração percentual do número total de raios efetivamente detectados na mesma região para o período estudado, ele reduz substancialmente (isto é, para 67% e 77% nas linhas de transmissão 138 kV e 440 kV, respectivamente, para o período estudado) com a evolução do ciclo solar para um mínimo de manchas solares, fato que merece um estudo mais aprofundado.

O maior número de desligamentos corresponde ao máximo da atividade do ciclo solar 23, coincidindo com o agrupamento de relatos de perturbações causadas por GIC em vários anos de máxima atividade solar (Boteler et al., 1998). No entanto, é notável que não haja nenhuma forte evidência de uma relação direta entre os desligamentos atribuídos por descargas atmosféricas nas linhas de transmissão de energia no sudeste do Brasil e os diversos índices geomagnéticos, tanto no curto quanto no longo prazo. A região estudada está localizada em baixas latitudes geomagnéticas, que podem ter algumas implicações para menor eficácia para os efeitos da tempestade geomagnética (Tinsley, 2000; Pirjola 2007. Thomson et al 2010, e referências ali citadas). Além disso, foi indicado que, mesmo em altas latitudes a probabilidade de uma falha de energia causada por GICs em linhas de transmissão é apenas uma a cada 20 anos (Elovaara 2007). No entanto, não existem relatos para falhas em longo prazo. Outras correlações não podem ser exploradas por falta de bases de dados de falhas em longo prazo em redes de energia para outras localizações geográficas.

As linhas de energia ISA.CTEEP em São Paulo estão localizadas perto do centro da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (*South American Geomagnetic Anomaly* – SAGA), como mostrado na Figura 3.4. O campo magnético é particularmente

fraco ao longo desta região e as partículas energéticas carregadas aprisionadas nos cinturões de Van Allen penetram mais profundamente na atmosfera e são preferencialmente perdidas neste meridiano. Este efeito pode induzir mais correntes na ionosfera, quando a atividade solar é mais intensa e, portanto, pode ter algum efeito sobre o acoplamento ionosfera–solo. Entretanto, é difícil descrever como tal acoplamento pode causar falhas nas redes de energia. A principal consequência pode ser um aumento de GICs que não causaram interrupções de energia. Nota-se que não há registros sistemáticos e similares de longos períodos de falhas em linhas de energia elétrica em outras latitudes geomagnéticas que possam ser comparados com as estudadas neste trabalho.

Por outro lado, o acoplamento elétrico implicado pelo circuito elétrico global entre a ionosfera e o solo pode desempenhar um importante papel na explicação das correlações encontradas neste estudo (Roble 1985; Rycroft et al. 2000, Rycroft 2006, Aplin et al. 2008). A diminuição do número de desligamentos nas linhas de energia elétrica à medida que o número de manchas solares diminui pode ser uma resposta às alterações físicas na eletrosfera com a evolução do ciclo solar. O circuito elétrico atmosférico terrestre é definido por mudanças climáticas, assim como o sistema climático pode responder às mudanças elétricas atmosféricas. Um aspecto sensível ao sistema climático são as formações de nuvens. (Carslaw, Harrison, Kirkby, 2002). Um circuito elétrico global simplificado equivalente para a eletrosfera é o proposto na Figura 5.1 (Rycroft 2000). Do lado direito da figura está ilustrada uma região de tempo bom, a qual corresponde a uma resistência em paralelo com a capacitância entre as duas superfícies condutoras. As regiões de tempestades correspondem a um gerador de corrente, o qual impulsiona o circuito. Um número maior de tempestades naturalmente implica em uma maior possibilidade de falhas nas linhas de energia elétrica, uma vez que elas estão no caminho do gerador desse circuito.

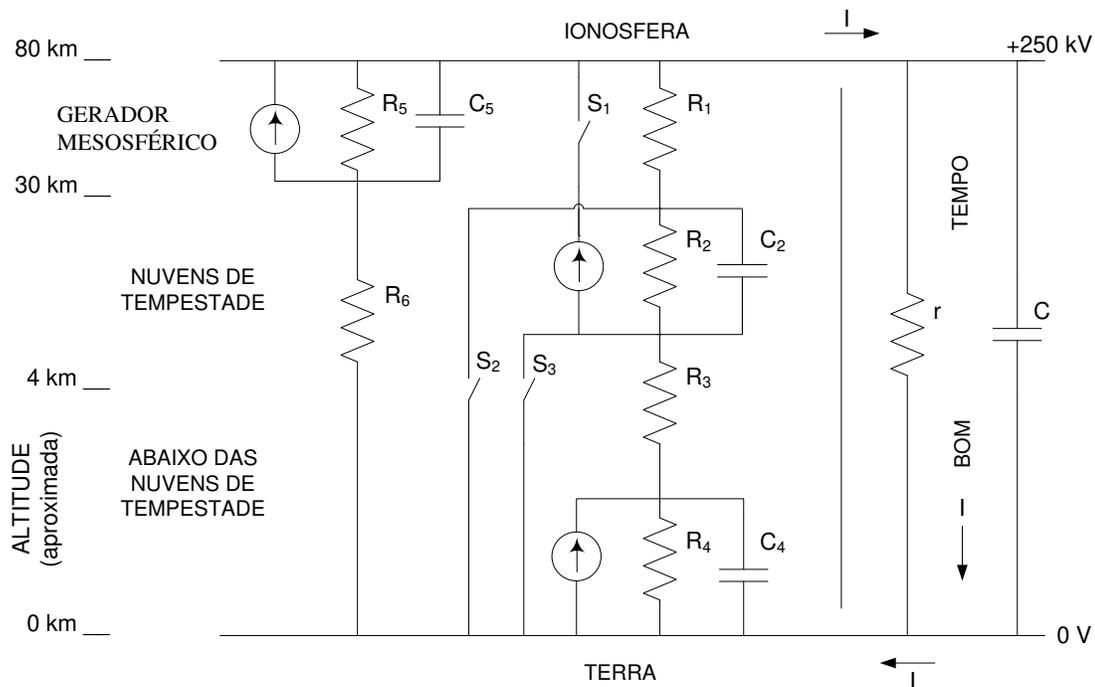


Figura 5.1 – Representação de um modelo do circuito elétrico equivalente global da ionosfera, adaptado a partir do apresentado por Rycroft (2006). Do lado direito está ilustrada a região de tempo bom, representada por uma certa resistência em paralelo com a capacitância entre as duas superfícies condutoras. Do lado esquerdo está ilustrada a região de tempestades, onde os interruptores servem para fechar o circuito devido às descargas atmosféricas, que são equivalentes aos geradores.

Este efeito foi observado na prática para as linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV localizadas no sudeste do Brasil, para os meses de tempestades (outubro–março) (Figuras. 3.5, 3.6 e 4.5). É bem conhecido que há um aumento do fluxo de raios cósmicos na atmosfera com a diminuição do número de manchas solares. Este efeito é sugerido para o período pesquisado neste estudo (Figura. 4.3) depois do ano de 2002. O aumento do fluxo de raios cósmicos produz mais ionização na atmosfera, aumentando a sua condutividade (Stozhkov 2003) (veja Figura 5.2 (a)). A média anual de correntes atmosféricas medida sobre o meio da América do Norte e nas regiões polares apresentaram um aumento para o máximo do ciclo solar 20 (1978-1983) por quase um fator de dois (de $1 \times 10^{-12} \text{ J/m}^2$ para $1,8 \times 10^{-12} \text{ J/m}^2$) (Roble, 1985;. Stozhkov et al, 2001a, b; Stozhkov 2003, e referências ali citadas). Por outro lado, existe uma correlação entre a cobertura global de nuvens e o número de descargas atmosféricas com o fluxo de raios cósmicos (Svensmark e Friis-Christensen 1997; Stozhkov et al, 2001a, b; Stozhkov 2003) (veja Figura 5.2 (b)).

O aumento da condutividade causada por estes dois efeitos pode reduzir o limiar de tensão eletrostática necessária para produzir descargas atmosféricas, que por sua vez podem tornar-se menos eficazes para causar desligamentos nas linhas de energia. Em outras palavras, em anos de Sol calmo existem dois efeitos opostos, ambos resultando em um maior número de descargas atmosféricas, que parecem ser menos eficientes para perturbar os sistemas de linhas de energia elétrica.

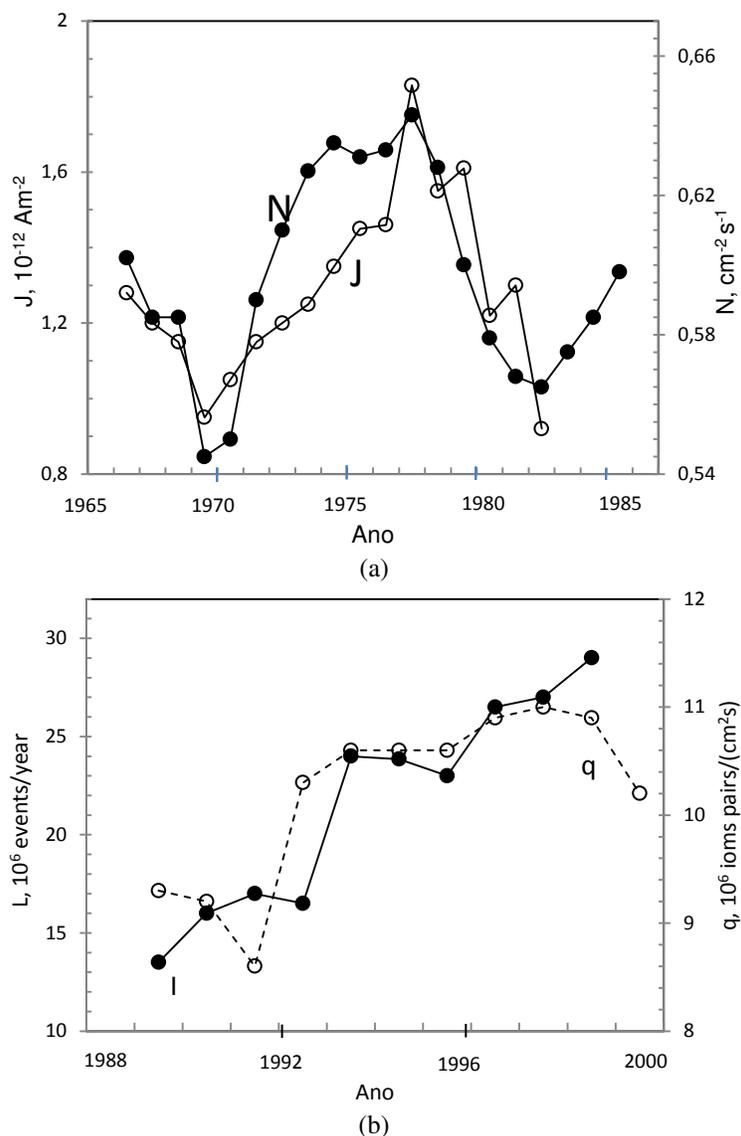


Figura 5.2 – O aumento dos raios e da ionização na troposfera devido aos raios cósmicos (Stozhkov et al. 2001a). **(a)** aumento médio anual da corrente na atmosfera $J(h)$ (círculos vazios) e fluxo de raios cósmicos $N(h)$ para $h = 8 \text{ km}$ na região polar (círculos cheios). **(b)** aumento do número anual de relâmpagos (L) detectados nos Estados Unidos (círculos cheios) e taxa de produção de íons em coluna de ar (q) (2–10 km) em latitudes médias (círculos vazios).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos desligamentos nas linhas de transmissão de alta tensão da ISA.CTEEP localizadas na região sudeste do Brasil proporcionou a oportunidade única para desenvolver um estudo abrangente para um longo período de tempo (1º de janeiro de 1998 a 16 de outubro de 2006), e o possível acoplamento com o ambiente geofísico. O ideal seria ter tido a possibilidade de análise para períodos mais longos, entretanto, os desligamentos em linhas de transmissão não estão disponíveis, principalmente, porque (a) as concessionárias de energia não disponibilizam suas bases de dados relativas aos desligamentos e (b) as linhas de transmissão de alta tensão podem sofrer significativas modificações técnicas de um ano para outro, situação que compromete a uniformidade dos dados.

O estudo realizado foi feito para as linhas de transmissão 138 kV (a mais longa e mais confiável) e de 440 kV, ambas com extensão em todo o Estado de São Paulo na região sudeste do Brasil. A maior parte dos desligamentos em ambas as linhas de transmissão é causada pelas descargas atmosféricas, isto é, 42,80% para a linha de 138 kV e 22,28% para a de 440 kV. Os desligamentos apresentam fortes variações sazonais, períodos de máximos durante as estações das chuvas (período com mais tempestades – outubro a março).

O maior número corresponde ao total anual dos desligamentos que ocorreram durante o período de máximo do ciclo solar 23. Para todo o período estudado, houve redução de 67% e de 77% no número de desligamentos devido às descargas atmosféricas para as linhas de transmissão de 138 kV e 440 kV, respectivamente, havendo uma boa correspondência com a evolução do ciclo solar de manchas, isto é, redução do número de manchas solares. Não houve nenhuma correlação encontrada em relação aos índices planetários das atividades geomagnéticas ou das grandes tempestades geomagnéticas, nem em escalas de tempo longo ou curto (como o período “*Halloween*” de excepcional atividade – ocorrido entre outubro-dezembro de 2003). Esta tendência é semelhante à distribuição anual de GICs em alta latitudes no hemisfério norte para oleodutos/gasodutos

(Huttunen et al. 2008), com exceção do ano de 2003 no qual houve um período com atividades geomagnéticas excepcionalmente intensas (período “*Halloween*”). A incidência de GICs, no entanto, não está necessariamente correlacionada com desligamentos em linhas de transmissão, conforme constatado no hemisfério norte, similarmente em altas latitudes. Entretanto, da mesma forma, os efeitos geomagnéticos que podem ter ocorridos, não foram eficazes para causar desligamentos nas linhas de transmissão da ISA. CTEEP.

Uma explicação associa a diminuição da atividade solar (diminuição do número de manchas solares) ao aumento da condutividade na atmosfera causada pelo aumento do fluxo de raios cósmicos. Como consequência pode ocorrer uma redução do limiar de voltagem necessário para produzir descargas atmosféricas, reduzindo a eficácia para provocar desligamentos nas linhas de transmissão. O circuito elétrico global descrito pelo acoplamento eletrosfera/ionosfera-terra, exerce um papel importante para tentar explicar a redução dos desligamentos. Com o aumento da condutividade atmosférica e diminuição das manchas solares (evolução do ciclo solar), as descargas são menos potentes resultando em menor número de desligamentos, isto é, há uma importante associação entre a ocorrência de desligamentos em linhas de transmissão e o regime do clima espacial.

Desta forma, com a evolução do ciclo solar 23, as alterações nos parâmetros físicos da eletrosfera podem tornar-se significativas e assim serem capazes de explicar o decréscimo observado nos desligamentos das linhas de transmissão devido às descargas atmosféricas. Os circuitos elétricos globais são bastante complexos (veja, Rycroft et al 2000;. Tinsley e Yu 2004; Rycroft 2006;. Aplin et al 2008). A resistência elétrica no circuito se torna mais pronunciada em altitudes troposféricas, abaixo de 10 km (Rycroft et al 2000;. Harrison 2004;. Aplin et al 2008). Os raios cósmicos galácticos produzem ionização da troposfera, aumentando a condutividade e, possivelmente, influenciando as nuvens de eletrificação (Svensmark e Friis-Christensen, 1997;. Stozhkov et al, 2001a, b; Stozhkov 2003). Estes processos podem também reduzir a tensão do limiar de voltagem nuvem-solo necessário para produzir descargas atmosféricas capazes de provocar um desligamento. Além disso, o aumento de fluxo de raios cósmicos influencia a cobertura de nuvens e conseqüentemente o número de descargas atmosféricas (Stozhkov et al 2001a, b;.

Stozhkov 2003) podendo, por sua vez, aumentar a produção de íons, a qual aumenta ainda mais a condutividade na troposfera. Este resultado produz dois efeitos opostos, a produção de um maior número de descargas atmosféricas, mas com menos eficiência para causar desligamentos nas linhas de transmissão.

A dependência das propriedades físicas da eletrosfera sobre o meio ambiente externo geofísico é de grande importância para a compreensão do seu impacto sobre os sistemas tecnológicos em atuação na superfície terrestre, como as linhas de transmissão de alta tensão. Ainda são necessários esforços substanciais de pesquisas para a compreensão dos processos de eletrificação das nuvens, a ocorrência de descargas atmosféricas e os regimes de limiar de voltagem, a ionização na atmosfera ocasionada pelo fluxo de raios cósmicos e a relação com a cobertura de nuvens, tanto no âmbito regional como sobre o planeta.

Para trabalhos futuros tem-se a perspectiva da realização de novas pesquisas para outras redes de linhas de transmissão para eventuais períodos mais longos desde que sejam conhecidos os seus parâmetros técnicos de manutenção e que possam ter outras escalas espaciais em diversas regiões do território brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; de SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I. S. **Magnetic storm associated disturbance dynamo effects in the low and equatorial latitude ionosphere**, in Recurrent Magnetic Storms: Corotating Solar Wind Streams, Geophys. Monogr. Ser., vol. 167, edited by B. Tsurutani et al., pp. 283–304, AGU, Washington, D.C., 2006.
doi:10.1029/167GM22.

APLIN, K. L.; HARRISON, R. G.; RYCROFT, M. J. **Investigating Earth's Atmospheric Electricity: a Role Model for Planetary Studies**. Space Sci. Rev., 137:11–27, 2008.
doi: 10.1007/s11214-008-9372-x

BARNES, P. R.; RIZY, D. T.; MCCONNELL, B. W. **Electric Utility Industry experience with geomagnetic disturbances**. Oak Ridge National Laboratory – Power Systems Technology Program. Report ORNL–6665, 1991.

BEVINGTON, PHILIP R.; ROBINSON, D. KEITH. **Data reduction and error analysis for the physical sciences** New York: McGraw-Hill, 2nd ed. 1992. p. 328.

BETHE, HANS ALBRECHT. **Energy Production in Stars**. Physical Review, Volume 55, pp. 434–456, 1939.

BOLDUC, LÉONARD. **GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system**. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, volume 64, Issue 16, pp.1793–1802. 2002.
doi: 10.1016/S1364-6826(02)00128-1

BOTELER, D. H.; PIRJOLA, R. J.; NEVANLINNA, H. The Effects of Geomagnetic Disturbances on Electrical Systems at the Earth's Surface. Adv. Space Res., 22:17–21. 1998.
doi: 10.1016/S0273-1177(97)01096-X.

BOTELER, DAVID; PIRJOLA, RISTO; NEVANLINNA, HEIKKI. **The Effects of Geomagnetic Disturbances on Electrical Systems at the Earth's Surface**. Advances in Space Research, Volume 22, Issue 1, pp. 17-27. 1998.
doi: 10.1016/S0273-1177(97)01096-X

BRIGGS, R. P.; CARLISLE, R. J. **Solar Physics and terrestrial Effects**. Space Environment Center – National Oceanic and Atmospheric Administration, 2nd ed., 1996.

CARRINGTON, R. C. **Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 20, p.13-15, 1859.

CARSLAW, K. S.; HARRISON, R. G.; KIRKBY, J. **Cosmic Rays, Clouds, and Climate.** Science, Volume 298, Issue 5599, pp. 1732-1737, 2002.
doi: 10.1126/science.1076964

CLIVER, E. W.; SVALGAARD, L.; **The 1859 solar–terrestrial disturbance and the current limits of extreme space weather activity.** Solar Physics, Volume 224; Issue1-2, pp. 407–422, 2004.
doi: 10.1007/s11207-005-4980-z

DOUGLASS, A. E.; **Solar Records in Tree Growth,** Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Volume 21, pp. 276-280, 1927.

EASTWOOD, J. P. **The science of space weather.** Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Volume 366, Issue 1844 pp.4489–4500, 2008.
doi: 10.1098/rsta.2008.0161

ELOVAARA, JARMO. **Finnish experiences with grid effects of GICs.** In Space Weather (Ed) Jean Liliensten, Astrophysics and Space Science Library, Volume 344, pp. 311–326, ISBN: 978-1-4020-5445-7 (e-book),2007.
doi: 10.1007/1-4020-5446-7_27

FORBUSH SCOTT E. **Solar Influences on Cosmic Rays.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 43, Issue 1, pp. 28-41, 1957.
doi: 10.1073/pnas.43.1.28.

FREIER, GEORGE D. **A 10-Year Study of Thunderstorm Electric Fields.** Journal of Geophysical Research, Volume 83, pp.1373–1376, 1978.
doi:10.1029/JC083iC03p01373

GARAUD, PASCALE. **Dynamics of the solar tachocline – I. An incompressible study.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 329, Issue 1, pp. 1-17, 2003.
doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.04961.x

HALE, GEORGE E.; ELLERMAN, FERDINAND; NICHOLSON, S. B.; JOY, A. H. **The Magnetic Polarity of Sun-Spots.** Astrophysical Journal, Volume 49, pp.153-178, 1919
doi:10.1086/142452

HARGREAVES, JOHN KEITH. **The solar-terrestrial environment.** Cambridge Cambridge University Press, 1995. p.434.

HARRISON, R. G. **The global atmospheric electrical circuit and climate.** Surveys in Geophysics, Volume 25, Issue 5-6, pp. 441–484, 2004.
doi: 10.1007/s10712-004-5439-8

HOYT, DOUGLAS V., SCHATTEN, KENNETH H. **The Role of the Sun in Climate.** New York, Oxford University Press, 1997.

HUTTUNEN K. E. J; KILPUA, S. P.; PULKKINEN, A.; VILJANEN, A.; TANSKANEN, E. **Solar wind drivers of large geomagnetically induced currents during the solar cycle 23.** Space Weather, Volume 6, Issue 10, 2008.
doi:10.1029/2007SW000374.

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA (INGV) **Dst index**, 2012
Disponível em: <http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/27/dst_index>
Acessado em: 16.07.2012.

ISA.CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista. **Histórico.**
Disponível em <<http://www.cteep.com.br/port/ri/empresa/historico.asp>> Acessado em: 29 de agosto de 2009a.

ISA.CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista. **Release dos Resultados do 1T09.** Disponível em <<http://www.cteep.com.br/port/ri/home/downloads.asp>> Acessado em: 29 de agosto de 2009b.

ISA.CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista. **Linhas de Transmissão.** Disponível em <<http://www.cteep.com.br/port/ri/empresa/linhasdetransmissao.asp>> Acessado em: 29 de agosto de 2009c.

KAPPENMAN, JOHN G. **An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 20-31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms.** Space Weather, Volume 3, 2005.
doi:10.1029/2004SW000128.

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. (Ed) **Introduction to Space Physics.** Cambridge , Cambridge University Press, p 568, 1995.

LANZEROTTI, L. J.; THOMSON, D. J.; MACLENNAN. C. G. **Engineering issues in space weather, in Modern Radio Science 1999** (Ed) International Union of Radio Science (URSI), Oxford University Press, Oxford, 25-50, 1999.

LANZEROTTI, L. J. **Geomagnetic induction effects in ground-based systems.** Space Science Reviews, Volume 34.pp. 347-356, 1983.
doi: 10.1007/BF00175289.

LANZEROTTI, L. J. **Space Storms and Space Weather Hazards.** (Ed) I.A. Daglis Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Space Storms and Space Weather Hazards, held in Hersonissos, Crete, Greece, 2000. Published by Kluwer Academic Publishers, 2001. p.313.

MAUAS, P. J. D.; FLAMENCO E.; BUCCINO, A. P. **Solar Forcing of the Stream Flow of a Continental Scale South American River**. Physical Review Letters, volume 101, Issue 16, 2008.

doi: 10.1103/PhysRevLett.101.168501

MAUNDER, E. W. **Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874-1902**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 64, pp.747-761, 1904.

MAYEWSKI, PAUL ANDREW; FREZZOTTI, MASSIMO; BERTLER, NANCY; VAN OMMEN, TAS; HAMILTON, GORDON; JACKA, TIM H.; WELCH, BRIAN; FREY, MARKUS; DAHE, QIN; JIAWEN, REN; SIMÕES, JEFFERSON; FILY, MICHEL; OERTER, HANS; NISHIO, FUMIHIKO; ISAKSSON, ELISABETH; MULVANEY, ROBERT; HOLMUND, PER; LIPENKOV, VOLODYA; GOODWIN, IAN. **The International Trans-Antarctic Scientific Expedition (ITASE): an overview**. Annals of Glaciology, Cambridge, v. 41, p. 180-185, 2005.

MOLINSKI, TOM S.; FEERO, W. E.; DAMSKY, B. L. **Shielding grids from solar storms [power system protection]**. Spectrum IEEE, Volume 37, Issue 11, pp.55–60, 2000

doi: 10.1109/6.880955

MOLINSKI, TOM S. **Why utilities respect geomagnetically induced currents**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Volume 64, Issue 16, pp. 1765–1778, 2002.

doi: 10.1016/S1364-6826(02)00126-8

MOOK, W. G., VAN DER PLICHT, J. **Reporting 14C activities and concentrations**. Journal Radiocarbon, University of Arizona, Volume 41, n^o3, pp.227-239, 1999 .

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2012a. **Solar Flare theory**. Disponível em <<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/index.htm>> Acessado em: 15.03.12

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2012b. **Chromospheric Features**. Disponível em <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/feature2.shtml#Prominences>> Acessado em: 15.03.12

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2012c. **Coronal Mass Ejections**. Disponível em <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/CMEs.shtml>> Acessado em: 15.03.12

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2012d **Dst Index**. Disponível em <<http://modelweb.gsfc.nasa.gov/solar/dst.html>> Acessado em: 16.07.12

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) **1998-2006**. Disponível em <<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/>> Acessado em: 21.07.2009.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). 2010 Disponível em <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/wmm-F10.pdf>. Acessado em: 23.11.2010

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **The K-index**. (2012a). Disponível em: <http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html>>. Acesso em: 16 jul. 2012.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **NOAA Space weather Scales**. (2012b). Disponível em: http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales/>. Acesso em: 16 jul. 2012.

PINTO Jr. O., PINTO I. R. C. A, NACCARATO K. P. **Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review**. Atmospheric Research, Volume 84, pp. 189–200, 2007
doi:10.1016/j.atmosres.2006.11.007

PINTO Jr., O. **Comunicação pessoal**, 2009.

PIRJOLA, RISTO. **Effects of space weather on high-latitude ground systems**. Advances in Space Research, Volume 36, Issue 12, pp 2231–2240, 2005.
doi:10.1016/j.asr.2003.04.074

PIRJOLA, RISTO. **Calculation of geomagnetically induced currents (GIC) in a high-voltage electric power transmission system and estimation of effects of overhead shield wires on GIC modeling**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 69, Issue 12, pp.1305–1311, 2007.
doi:10.1016/j.jastp.2007.04.001

PIRJOLA, RISTO; VILJANEN, A; PULKKINEN A; AMM, O. **Space Weather Risk in Power Systems and Pipelines**. Physics Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, Volume 25, pp.333–337, 2000.
doi:10.1016/S1464-1917(00)00027-1

ROBLE, R. G. **On solar-terrestrial relationships in atmospheric electricity**. Journal of Geophysical Research, Volume 90, pp 6000-6012, 1985.
doi: 10.1029/JD090iD04p06000

RYCROFT, M. J. **Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: An overview**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 68, Issue 3-5, pp. 445–456, 2006.
doi: 10.1016/j.jastp.2005.04.009

RYCROFT, M. J.; ISRAELSSON S; PRICE, C. **The Global Atmospheric Electric Circuit, Solar Activity and Climate Change**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 62, Issue 17-18, pp.1563–1576. 2000.

doi: 10.1016/S1364-6826(00)00112-7

SEVERE SPACE WEATHER EVENTS (SSWE) - UNDERSTANDING SOCIETAL AND ECONOMIC IMPACTS: A WORKSHOP REPORT, THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, 2008. Washington, D.C. 2008 Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12507> Acessado em: 20.08.12

SILVA, A. V. R. **Nossa estrela: o Sol**. Editora Livraria da Física, São Paulo, Brasil, 2006.

SPIEGEL, E. A.; ZAHN, J. P. **The solar tachocline** Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361), Volume 265, no. 1, pp. 106-114, 1992

STAUNING, PETER. **High-voltage Power grid disturbances during geomagnetic storms**. Proceedings of the Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference, 24 - 29 September 2001, Vico Equense, Italy. Editor: Huguetta Sawaya-Lacoste. ESA SP-477, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-749-6, p. 521 – 524,2002

STOZHKOVA, Y. I.; SVIRZHEVSKY, N. S.; MAKHMUTOV, V. S.; **Cosmic ray measurements in the atmosphere**. Workshop on Ion-Aerosol-Cloud Interactions, CERN, Geneva, Switzerland, 18-20 Apr 2001, pp.41-62, 2001a.

STOZHKOVA, Y. I.; ERMAKOV, V. I.; MAKHMUTOV V. S.; **Cosmic rays and atmospheric processes**. Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference. 07-15 August, Hamburg Germany – International Union of Pure and Applied Physics, 2001b.

STOZHKOVA, Y. I. **The role of cosmic rays in the atmosphere processes**. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Volume 29, Issue 5, pp. 913-923, 2003.

STEWART, BALFOUR. **On the Great Magnetic Disturbance Which Extended from August 28 to September 7, 1859, as Recorded by Photography at the Kew Observatory**. Source: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 151, pp. 423-430, 1861. Disponível em <<http://www.jstor.org/stable/108745>> Acessado em: 24.01.12.

STUIVER M.; QUAY, P.D. **Changes in Atmospheric Carbon-14 Attributed to a Variable Sun**, American Association for the Advancement of Science , Volume 207, n°. 4426, pp. 11-19, 1980.

doi: 10.1126/science.207.4426.11

STUIVER, M. **Trees and the ancient record of heliomagnetic cosmic ray flux modulation**. (Abstracts of) Papers Presented to the Conference on The Ancient Sun: Fossil Record in the Earth, Moon and Meteorites. A Lunar and Planetary Institute Topical Conference held October 15-19, in Boulder, Colorado. Hosted by the National Center for Atmospheric Research. Conference co-sponsored by the National Center for Atmospheric Research, NASA, and the National Science Foundation. LPI Contribution 390, edited by P. C. Robertson, R. O. Pepin, J. A. Eddy and R. B. Merrill, published by the Lunar and

Planetary Institute, 3303 Nasa Road 1, Houston, TX 77058, p.100, Bibliographic 1979, Code: 1979LPICo.390..100S

STUIVER, M.; POLACH, H. **Discussion Reporting of 14c data**. Journal Radiocarbon, Volume 19, pp. 355-363, 1977.

SVENSMARK, HENRIK; FRIIS-CHRISTENSEN, EIGIL. **Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage - a missing link in solar-climate relationships**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, volume 59, Issue 11, pp 1225-1232, 1997.
doi: 10.1016/S1364-6826(97)00001-1

THOMSON D. J.; LANZEROTTI L. J.; VERNON F. L.; LESSARD M. R.; SMITH L. T. **P. Solar Modal Structure of the engineering Environment**, Proceedings IEEE, Volume 95, Issue 5, pp. 1085–1132, 2007

THOMSON A. W. P.; GAUNT C. T.; CILLIERS P.; WILD J. A.; OPPERMAN B.; MCKINNELL L. A.; KOTZE P.; NGWIRA C. M.; LOTZ S. I. **Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids**. Advances. In Space Research, Volume 45, Issue 9, pp. 1182-1190, 2010.
doi: 10.1016/j.asr.2009.11.023

TINSLEY, BRIAN A. **Influence of Solar Wind on the Global Electric Circuit, and Inferred Effects on Cloud Microphysics, Temperature, and Dynamics in the Troposphere**. Space Science Reviews of ISSI, Volume 11, pp 231-258., 2001.
doi: 10.1007/978-94-010-0888-4_22

TINSLEY, BRIAN A.; BURNS, G. B.; LIMIN ZHOU. **The role of the global electric circuit in solar and internal forcing of clouds and climate**, Advances in Space Research, Volume 40, Issue 7, pp. 1126-1139, 2007
doi:10.1016/j.asr.2007.01.071

TINSLEY BRIAN A.; YU, FANGQUN. **Atmospheric Ionization and Clouds as Links Between Solar Activity and Climate**. Solar Variability and its Effects on Climate (Ed. by Judit M. Pap, Peter Fox, Claus Frohlich, Hugh S. Hudson, Jeffrey Kuhn, John McCormack, Gerald North, William Sprigg and S. T. Wu), Published by the American Geophysical Union, Washington, DC, USA, pp 321–339., 2004.

TRIVEDI N. B.; VITORELLO I.; KABATA W.; DUTRA S. L. G.; PADILHA A. L.; BOLOGNA M. S.; DE PÁDUA M. B.; SOARES A. P.; LUZ G. S. , PINTO F. A.; PIRJOLA R.; VILJANEN A. **Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in brazil: a case study**. Space Weather, Volume 5, 2007.
doi:10.1029/2006SW000282

VAN ALLEN, JAMES. A. **Radiation Belts Around the Earth**. San Francisco: Freeman, 1958.

VORONTSOV, S. V. **Helioseismology**. American Institute of Physics – Provided by the NASA Astrophysics Data System, Volume 36, pp. 175-184, 1992.

WATARI S.; KUNITAKE M.; KITAMURA K.; HORI T.; KIKUCHI T., SHIOKAWA K.; NISHITANI N.; KATAOKA R.; KAMIDE Y.; ASO T.; WATANABE Y.; TSUNETA Y. **Measurements of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido**, Space Weather, volume 7, 2009.
doi:10.1029/2008SW000417.

Zirin, H. **Astrophysics of the Sun**. New York: Cambridge University Press, 1988.