



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

**PAULO CÉSAR DA SILVA FILHO**

**EXPLOSÕES SOLARES E SEUS EFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO**

**OUTROS TRABALHOS EM:**

[www.projetoederedes.com.br](http://www.projetoederedes.com.br)

**FORTALEZA – CEARÁ  
2013**

PAULO CÉSAR DA SILVA FILHO

EXPLOSÕES SOLARES E SEUS EFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Licenciatura em Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro

FORTALEZA – CEARÁ  
2013

S586e Silva Filho, Paulo César da  
Explosões solares e seus efeitos no sistema elétrico/ Paulo César da Silva  
Filho. - 2013  
CD-ROM. 49f. : il. (algumas color.) ; 4 ¾ pol.

“CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do trabalho acadêmico, acondicionado em caixa de DVD Slin (19 x 14 cm x 7 mm)”.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciência e Tecnologia, Curso de Licenciatura em Física, Fortaleza, 2013.

Orientação: Prof Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro.

1. Explosões solares. 2. Tempestades geomagnéticas. 3. Correntes geomagneticamente induzidas. I. Título.

CDD: 621.3

PAULO CÉSAR DA SILVA FILHO

EXPLOSÕES SOLARES E SEUS EFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO

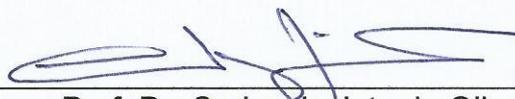
Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciado em Física.

Aprovada em: 24/06/2013.

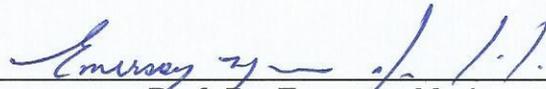
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro (Orientador)  
Universidade Estadual do Ceará – UECE



Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira  
Universidade Estadual do Ceará – UECE



Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva  
Universidade Estadual do Ceará – UECE

Aos meus pais, dedico esta monografia.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me dado esperança e luz em todos os momentos da minha vida.

Aos pais, César e Vera, que não mediram esforços em me proporcionar o melhor em todos os momentos e por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos meus irmãos, Débora e Wladimir, por sempre estarem ao meu lado.

A minha eterna tia Dite por ter tido fundamental e indispensável participação em minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro, pela paciência, atenção e dedicação oferecidas durante a construção deste trabalho.

Aos professores Diego Veloso e Mário César por terem me dado total apoio em meus estágios supervisionados.

E a todos os outros que contribuíram com o meu desenvolvimento.

## RESUMO

A sociedade moderna torna-se cada vez mais dependente dos sistemas elétricos e eletrônicos. Falhas destes podem causar enormes prejuízos econômicos em escala continental ou mundial por conta da alta interdependência destes sistemas nos espaços geopolíticos. Um exemplo muito significativo é o sistema elétrico brasileiro que é interligado na sua maior parte. Linhas de transmissão da ordem de milhares de quilômetros interligam diversos centros de geração de energia a outros diversos centros de consumo com o objetivo de garantir confiabilidade e estabilidade ao sistema. Apesar desta enorme vantagem, ocorre que, devido às extensas linhas de transmissão, estas podem catalisar os efeitos das correntes geomagneticamente induzidas e provocar erros de medida no sistema elétrico, levando os sistemas de proteção a atuarem desligando geração e cargas desestabilizando o sistema de modo perigoso. Este trabalho apresenta os últimos estudos que correlacionam os fenômenos que ocorrem em nossa estrela próxima, o Sol, e as perturbações no sistema elétrico. São descritos os principais fenômenos envolvidos (manchas solares, explosões solares, ejeção de massa coronal e tempestades geomagnéticas). Alguns registros de falhas correlacionadas são apresentados.

**Palavras-chave:** Explosões Solares. Tempestades Geomagnéticas. Correntes Geomagneticamente Induzidas.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Resultados de análises das características de algumas explosões solares.....	20
TABELA 2	Classificação das Tempestades Geomagnéticas.....	33
TABELA 3	Perturbações magnéticas que afetaram sistemas elétricos na Terra.....	35

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Sequência de imagens ilustrando a evolução do Campo Magnético Solar e formação das manchas solares em meio período de um ciclo de atividade solar.....	15
FIGURA 2	Esquema do acoplamento Sol-meio interplanetário-magnetosfera.....	28
FIGURA 3	Sequência de imagens de uma ejeção de massa coronal registrada pela NASA em 15 de março de 2013.....	40
FIGURA 4	Imagens de três explosões solares registradas pela NASA em 13 de maio de 2013.....	41

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1	Representação de três dias, com base no dia 21 de maio de 2013, do fluxo de raio-X registrados pelo sistema GOES.....	19
GRÁFICO 2	Representação dos três ciclos de atividade solar anteriores ao atual, de acordo com o número de manchas solares e de acordo com as três principais classes de manchas solares.....	21
GRÁFICO 3	Número de manchas solares observadas em relação aos respectivos anos.....	22
GRÁFICO 4	Previsão gráfica referente a manchas solares do ciclo 24.....	24

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
CME	Ejeção de Massa Coronal ( <i>Coronal Mass Ejection</i> )
GOES	Satélites Geoestacionários Operacionais Ambientais ( <i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i> )
XRS	Sensor de Raio-X ( <i>X-ray Sensor</i> )
GIC	Corrente Geomagneticamente induzida ( <i>Geomagnetic Induced Current</i> )
SAMA	Anomalia Magnética do Atlântico Sul ( <i>South Atlantic Magnetic Anomaly</i> )
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço ( <i>National Aeronautics and Space Administration</i> )
STEREO	Observatório Solar ( <i>Solar TERrestrial RELations Observatory</i> )
ESA	Agência Espacial Europeia ( <i>European Space Agency</i> )
SOHO	Observatório Solar e Heliosférico ( <i>Solar and Heliospheric Observatory</i> )
NOAA	Administração Oceânica e Atmosférica Nacional ( <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> )

## SUMÁRIO

	<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>7</b>
	<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>8</b>
	<b>LISTA DE GRÁFICOS.....</b>	<b>9</b>
	<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>O SOL.....</b>	<b>13</b>
2.1.1	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DO SOL.....	13
2.1.2	MANCHAS SOLARES.....	14
2.1.3	CICLO DE ATIVIDADE SOLAR.....	16
2.1.4	VENTO SOLAR.....	16
2.1.5	EJEÇÃO DE MASSA CORONAL.....	17
2.1.6	EXPLOSÕES SOLARES.....	17
2.1.7	O CICLO SOLAR 24 (CICLO SOLAR ATUAL).....	22
<b>2.2</b>	<b>TEMPESTADES GEOMAGÉTICAS.....</b>	<b>25</b>
2.2.1	O CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA.....	25
2.2.2	TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS.....	26
2.2.3	CORRENTES GEOMAGNETIMAMENTE INDUZIDAS (GIC's).....	28
2.2.4	ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL.....	29
<b>2.3</b>	<b>EFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO.....</b>	<b>31</b>
2.3.1	EFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO.....	31
2.3.2	OUTROS EFEITOS.....	34
2.3.3	OCORRÊNCIAS REGISTRADAS.....	34
2.3.4	POSSÍVEIS SOLUÇÕES.....	42
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos em larga escala, a manutenção da vida nas unidades de terapia intensiva de hospitais e em residências, ou mesmo, muitas das atividades lúdicas atuais e, em última análise, o modo de vida de nossa sociedade dependem profundamente de sistemas de geração transmissão e distribuição de energia elétrica. Enormes investimentos financeiros são feitos para atender a demanda por este tipo de energia. Nestes investimentos estão incluídos, de forma importante, recursos aplicados em segurança e qualidade desta energia. Entretanto, falhas ocorrem e, tempestades, queimadas, falhas de equipamentos ou erro humano são apontados como causas destas falhas no sistema elétrico.

As explosões solares podem produzir alteração no magnetismo da Terra e induzir correntes elétricas alterando o funcionamento, podendo danificar sistemas eletrônicos ou elétricos.

Esses eventos já eram observados e estudados desde 1859, mas como atualmente a sociedade tem uma dependência relevante de fornecimento de energia elétrica, surge uma necessidade maior de conhecer e prevenir os danos causados por explosões solares.

Este trabalho é uma pesquisa bibliográfica de estudos que relacionam os distúrbios no sistema de fornecimento de energia elétrica e as explosões solares.

Organizada em capítulos, esta monografia apresenta no Capítulo 2 o Sol, suas características e os seus principais fenômenos, são mostrados detalhes das tempestades geomagnéticas com também de eventos associados, são relatadas algumas explosões e suas consequências, enfatizando os efeitos no sistema elétrico. No Capítulo 3 são citados os materiais e métodos utilizados como base para elaboração deste trabalho. No Capítulo 4 são feitas as considerações finais.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 O SOL**

Estando a 149,6 milhões de km da Terra, a estrela mais próxima da Terra, possuindo indiscutível destaque entre as estrelas e planetas do sistema solar, justificado pelo seu considerável tamanho e massa, possui importantes características, como aquecimento e iluminação, que são fundamentais para a manutenção da vida na Terra.

Além de possuir essas características positivas, o Sol é o um dos grandes causadores de distúrbios no sistema elétrico, já que dele advém explosões solares que, dependendo da situação, poderão causar danos catastróficos na Terra. Daí a importância de estudar o agente causar para entender os eventos e efeitos provenientes dele.

#### **2.1.1 Descrição da Estrutura do Sol**

De acordo com SAUERESSIG, 2006 e STEKEL, 2008, sua estrutura é formada por gás ionizado incandescente e equilibrada pela ação de duas principais forças: uma gerada por grandes temperaturas internas, provocando pressão térmica direcionada ao exterior. Outra direcionada ao interior e originada pela ação da gravidade.

Também de acordo com SAUERESSIG, 2006 e STEKEL, 2008, com o raio de 696 mil km, seu interior apresenta três camadas. O núcleo é a camada mais interior que se estende até 25% do raio, onde ocorrem fusões nucleares que produzem energia, onde a temperatura média é de 15 milhões kelvin. Com temperatura média de 8 milhões kelvin, a camada intermediária é a Zona Radiativa, se estendendo dos 25% aos 75% do raio, onde ocorre o processo de difusão

radioativa, dissipando a energia gerada no núcleo. A partir dos 75% do raio até a superfície, compreende a Zona de Convecção, onde ocorre dissipação de energia na forma de convecção e onde a temperatura varia de 500 mil kelvin a 6,6 mil kelvin.

Segundo STEKEL, 2008, a atmosfera do Sol é composta por três camadas. Sendo, a Fotosfera, a camada que se inicia na superfície e se estende até 500 km para o exterior, de onde vem a maior parte da luz solar visível, com temperatura em torno de 5 mil kelvin. É nessa camada que são observadas as manchas solares. A camada intermediária, chamada Cromosfera, estendendo-se de 500 km a 10500 km do exterior da superfície, podendo atingir temperatura de 1 milhão de kelvin. A Coroa é a camada mais externa e extensa, estendendo-se por milhões de km a partir da superfície, de onde origina a matéria ejetada comumente em explosões solares, processo conhecido como ejeção de massa coronal.

Na Coroa solar também são observadas as chamadas regiões ativas, locais onde a temperatura e a densidade são elevadas, além de possuírem campos magnéticos intensos, da ordem de centenas a poucos milhares de gauss, distribuídos em formato de arcos com os pólos magnéticos situados na Fotosfera. É nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como Explosões Solares que ocorrem com maior frequência nos períodos de máximo de atividade do ciclo solar (STEKEL, 2008).

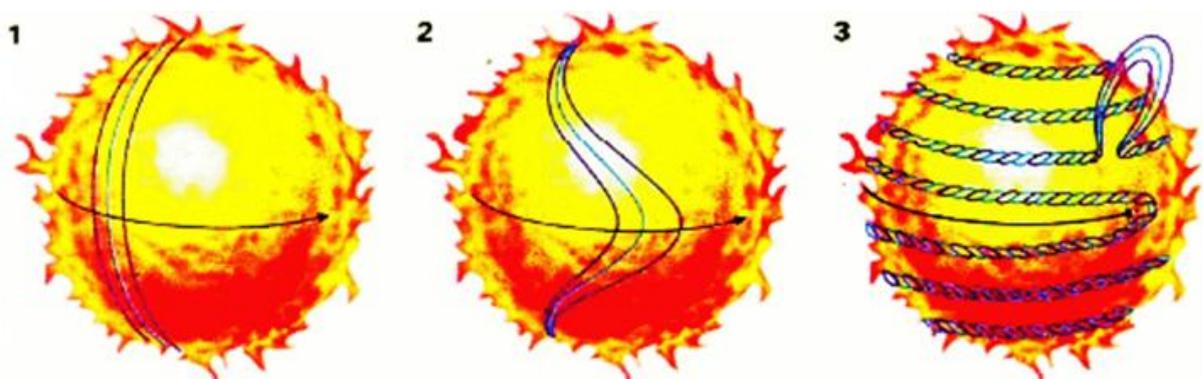
### **2.1.2 MANCHAS SOLARES**

São manchas escuras que podem ser visualizadas na fotosfera e que, a cada período de mais ou menos 11 anos, surgem e desaparecem praticamente por completo. Os chineses já observavam tais manchas a milhares de anos antes de cristo, todavia os estudos só foram aperfeiçoados com a ajuda do telescópio utilizado para observá-las desde Galileu em 1612.

O surgimento das manchas solares está relacionado à evolução do campo magnético solar no decorrer desse ciclo de mais ou menos 11 anos. Quando o Sol está em baixa atividade seu campo magnético é quase bipolar e, quase não

são visualizadas manchas solares. Todavia, no decorrer do ciclo, pelo fato do movimento de rotação ser rápido na região do equador, o gás existente na superfície próximo ao equador arrasta as linhas de campo magnético, causando uma distorção como na Figura 1. Por esse motivo, alguns pontos ficam com intensa concentração de linhas de campo magnético, ocasionando um afloramento subsuperficial dessas linhas de campo, caracterizando as manchas solares, como mostrado na Figura 1.

FIGURA 1: Sequência de imagens ilustrando a evolução do Campo Magnético Solar e formação das manchas solares em meio período de um ciclo de atividade solar. Fonte: STEKEL, 2008.



Na figura 1: 1. As manchas solares ocorrem em função da modificação das linhas do campo magnético provocada pela diferença de velocidade de rotação dos gases, que é maior no equador que nos pólos. 2. Passado determinado tempo, a velocidade de rotação mais elevada dos gases no equador faz com que as linhas de força do campo magnético se alarguem e sofram uma deformação na superfície do Sol. 3. As linhas do campo magnético vão retorcendo-se cada vez mais até o momento em que a pressão magnética provoca sua erupção. Na base das erupções formam-se as manchas solares.

As manchas são formadas por uma parte mais escura, chamada umbra, e por uma parte mais clara que rodeia a umbra, nomeada penumbra. A presença dessas manchas alerta para a existência de intensos campos magnéticos na atmosfera do Sol, também atentando para a atividade do ciclo solar.

As regiões ativas estão situadas no interior de configurações de campo magnético em forma de ferradura ou arco, com linhas de fluxo magnético que se projetam pela Cromosfera até a Coroa solar, cujas extremidades estão presas na Fotosfera associados às manchas. Devido à ação destes campos, é nas regiões ativas que se observam as súbitas variações das radiações Solares das Explosões Solares (STEKEL, 2008).

### **2.1.3 CICLO DE ATIVIDADE SOLAR**

A intensidade de atividade solar está diretamente ligada à quantidade de manchas solares observadas no período, que inicia com o progressivo surgimento dessas manchas, atingindo um pico solar, quando existe uma maior concentração de campo magnético, com grande possibilidade de explosões solares. Este ciclo tem duração média de 11 anos, finalizando com a diminuição das manchas e consequente redução da atividade solar. Depois, o Sol inverte sua polaridade iniciando mais um ciclo de atividades de mesma duração. Esse ciclo de 11 anos que foi mostrado representa metade do ciclo magnético do Sol, que dura em média 22 anos.

Os ciclos têm a característica de que quando um ciclo tiver fortes picos de tempestades, o seguinte terá tempestades mais fracas. Seguindo essa uniformidade, para o ciclo atual, ciclo 24, existe, para este ano (2013) a expectativa de grandes explosões solares.

### **2.1.4 VENTO SOLAR**

O Vento Solar consiste em ejeções de gases de prótons e elétrons que são lançados através do meio interplanetário a uma velocidade próxima de 2 mil km/s, podendo atingir a Terra com uma velocidade de 500 Km/s.

É resultado da enorme diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário, sendo empurrado para longe do Sol apesar da grande atração gravitacional que sofre (Costa, Simões, Cardoso, Alves, 2011).

Por possuir uma origem muito complexa e pela inexistência de medidas ainda restam muitas lacunas a serem preenchidas sobre a geração do vento solar. Diferente de outras áreas da física, o conhecimento de suas propriedades é mais baseado em observações do que em fundamentação teórica (Costa, Simões, Cardoso, Alves, 2011).

### **2.1.5 EJEÇÃO DE MASSA CORONAL**

Na Ejeção de Massa Coronal (*CME – Coronal Mass Ejection*), a matéria que está interligada as linhas de campo magnético será possivelmente lançada do Sol numa explosão solar.

A frequência de ocorrência de CME's está relacionada ao ciclo de manchas solares: em épocas de baixa atividade solar, a frequência é de uma CME por semana; em períodos de alta atividade solar, observa-se, em média, 2 ou 3 CME's por dia (SALOMONI, MATSUOKA, FLORÊNCIO, 2011).

A matéria das CME's é em sua maior parte composto por hélio e hidrogênio ionizados.

### **2.1.6 EXPLOSÕES SOLARES**

Ocorrem quando nas regiões ativas no Sol, local onde há grande concentração de manchas solares, existe uma grande quantidade de energia magnética armazenada. Essa energia é liberada na forma de energia térmica e cinética, provocando aquecimento e aceleração de partículas próximas. Essas partículas energizadas em contato com o meio ambiente provocam a emissão de

radiação, nas mais diversas formas que compreendem grande parte do espectro eletromagnético.

As explosões solares foram observadas pela primeira vez, em 1859, por R. C. Carrington e R. Hodgson, enquanto eles observavam manchas solares e visualizaram um grande aumento da intensidade luminosa em uma destas regiões. Estes fenômenos caracterizam-se pela emissão de grandes quantidades de energia ( $10^{26} - 10^{32}$  erg), em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos a até poucas horas para os fenômenos mais intensos (STEKEL, 2008).

“Para se ter uma idéia da quantidade de energia envolvida em uma explosão solar típica, esta produz uma quantidade equivalente a cerca de 40 bilhões de vezes à energia da bomba atômica lançada sobre a cidade de Hiroxima no Japão.” (STEKEL, 2008).

“Se a explosão solar for muito intensa, tem-se um segundo fenômeno: a ejeção de uma “nuvem” de plasma, também conhecido como ejeção de massa coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*)” (MATSUOKA, CAMARGO, BATISTA, 2006).

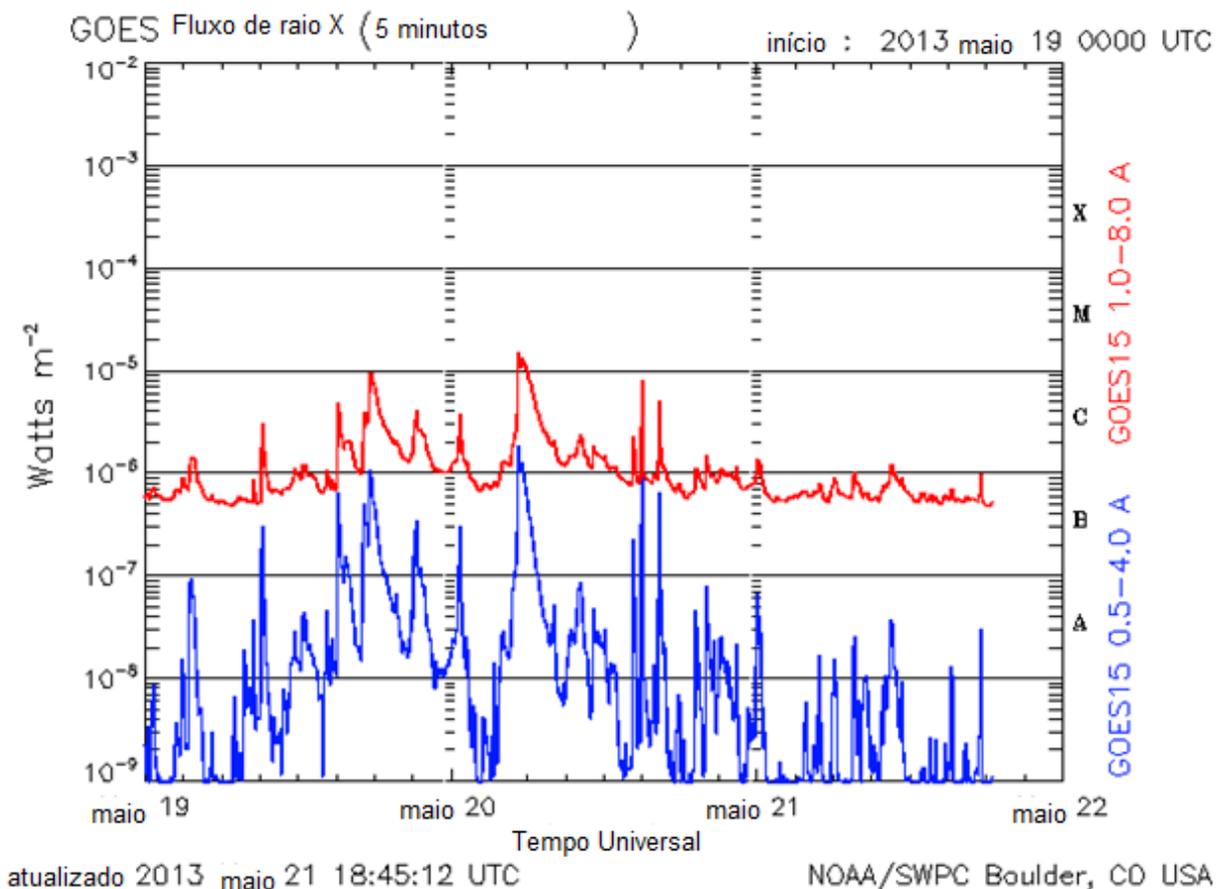
Se direcionada à Terra uma explosão desta magnitude poderá causar desde pequenos distúrbios até grandes apagões em sistemas elétricos.

Telescópios e Radiotelescópios são utilizados para visualizar as explosões, pois não é possível observá-las a olho nu. Já as emissões de Raios-X, Raios-Gama, e Ultravioleta somente podem ser observadas através de equipamentos específicos instalados em satélites, justificado pela média e alta atmosfera terrestre impedirem a penetração desses comprimentos de onda até a superfície da Terra.

Um dos métodos utilizados para classificar a intensidade das Explosões Solares é de acordo com o seu brilho nas bandas de Raios-X, para comprimentos de onda na faixa de 1 a 8 Å. Para isso os satélites da série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) são tidos como uma das principais referências e monitoram este fluxo de Raios-X com o instrumento *X-ray Sensor* (XRS) (STEKEL, ECHER, SCHUCH, 2008).

Abaixo o Gráfico 1, com os dados do satélite GOES, referente à três dias, com base no dia 21/05/2013:

GRAFICO 1: Representação, com base no dia 21 de maio de 2013, do fluxo de raio-X registrados pelo sistema GOES. Fonte: Adaptado de [http://www.swpc.noaa.gov/rt\\_plots/xray\\_5m.html](http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/xray_5m.html)



Utilizando o método anterior as explosões solares podem ser nas classes: X, com as maiores intensidades e relacionada aos maiores eventos; M, com média intensidade; C, com baixa intensidade e poucos efeitos. Existem também as categorias A e B, que por não terem tanta intensidade comparadas às outras classes, podem não ser consideradas explosões solares.

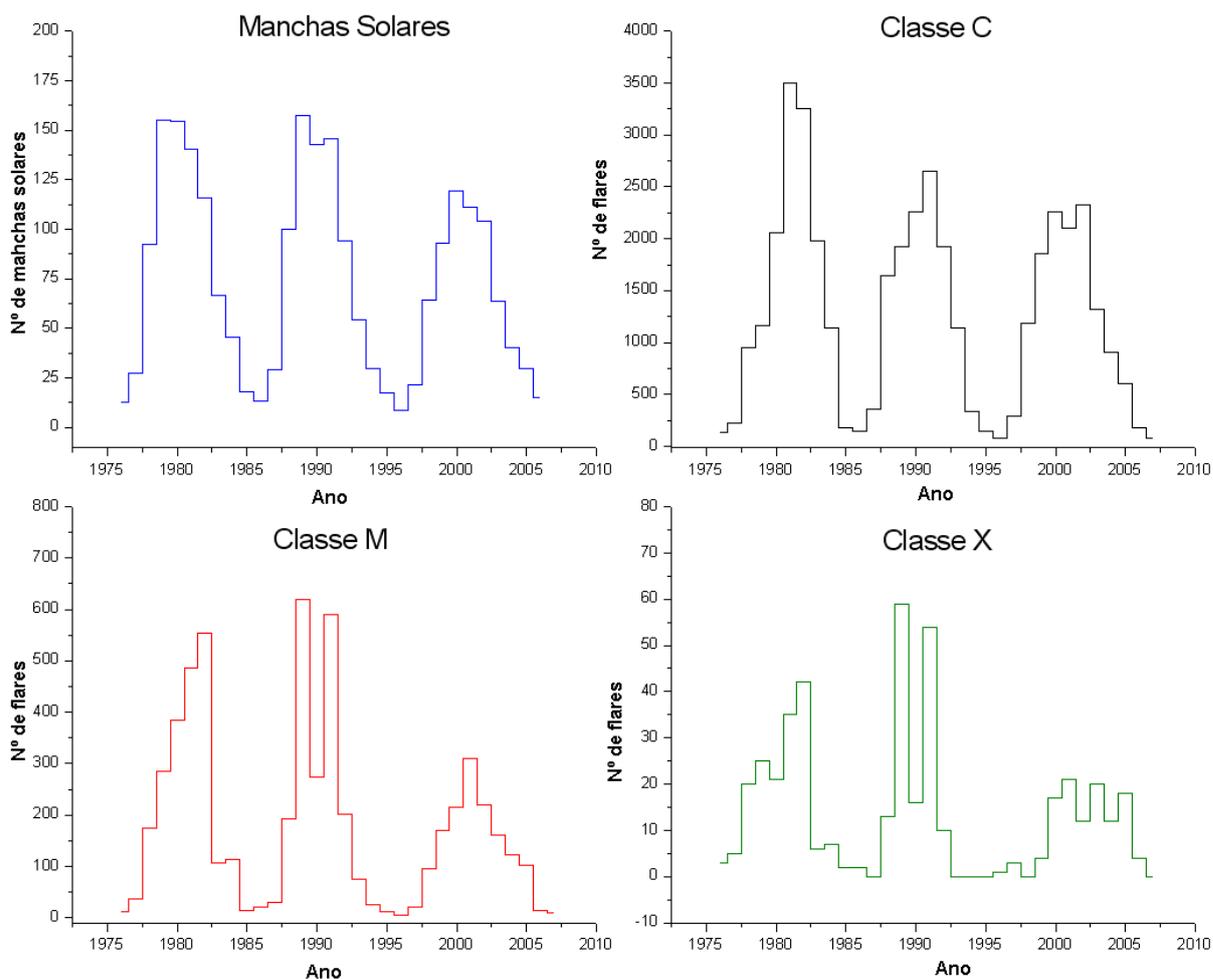
Na tabela 1 estão expostos resultados de análises das características de algumas explosões solares (*flare*):

TABELA 1: Resultados de análises das características de algumas explosões solares. Fonte: STEKEL, 2008.

<b>Data do <i>flare</i></b>	<b>Intensidade (classe)</b>	<b>Horário do Pico</b>	<b>Horário de Início</b>	<b>Horário de Fim</b>	<b>Integral (J/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tempo de duração</b>
26/10/2003	X1.2	06:52	05:57	07:32	6,09E-06	01:35
26/10/2003	X1.2	18:14	17:20	19:20	7,76E-06	02:00
26/10/2003	M7.6	21:40	21:34	21:47	4,94E-07	00:13
27/10/2003	M5.0	09:27	09:21	09:32	3,08E-07	00:11
27/10/2003	M6.7	12:43	12:28	12:52	7,57E-07	00:24
28/10/2003	X17.2	11:10	09:52	11:24	2,24E-05	01:32
29/10/2003	X10.0	20:49	20:36	21:01	1,07E-05	00:25
02/11/2003	X8.3	17:25	17:03	17:39	1,14E-05	00:36
03/11/2003	X2.7	01:29	00:59	01:45	4,66E-06	00:46
03/11/2003	X3.9	09:55	09:43	10:19	7,14E-06	00:36
04/11/2003	X28.0	19:44	19:29	20:07	2,89E-05	00:38
05/11/2003	M5.3	10:52	10:47	10:56	1,97E-07	00:09

O gráfico 2 mostra a representação dos três ciclos de atividade solar anteriores ao atual, de acordo com o número de manchas solares e de acordo com as três principais classes de manchas solares:

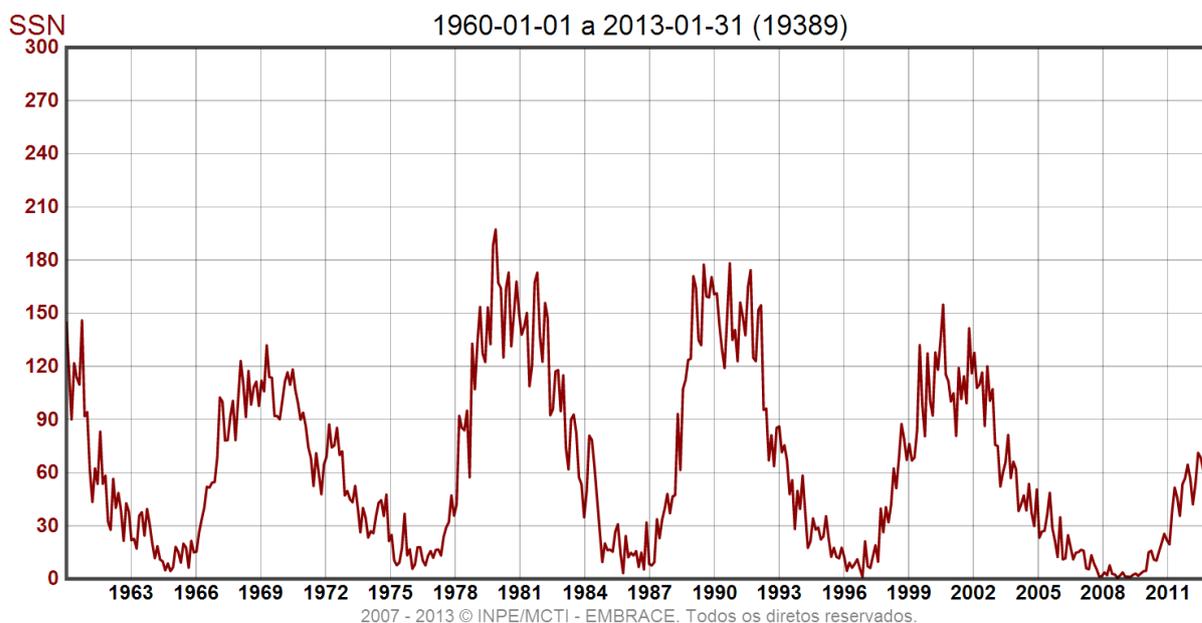
GRAFICO 2: Representação dos três ciclos de atividade solar anteriores ao atual, de acordo com o número de manchas solares e de acordo com as três principais classes de explosões solares. Fonte: STEKEL, 2008.



Nos últimos três ciclos, notou-se um decréscimo no número absoluto de manchas solares, e conseqüentemente a quantidade de Explosões Solares também aparentou uma diminuição. No entanto, o ciclo solar nº 23 apresentou Explosões Solares de intensidades muito altas, valores que ainda não tinham sido detectadas, o que ocasionou até em uma saturação na escala dos equipamentos dos satélites GOES, como foi ocorrido no dia 4 de novembro de 2003 (STEKEL, ECHER, SCHUCH, 2008).

O gráfico 3 mostra no eixo vertical o número de manchas solares observadas em relação aos respectivos anos no eixo horizontal.

GRÁFICO 3: Número de manchas solares observadas em relação aos respectivos anos. Fonte: DENARDINI, COSTA, LAGO, 2013.



### 2.1.7 O CICLO 24 (CICLO ATUAL)

Algo inesperado está acontecendo no sol. 2013 deve ser o ano do Máximo Solar, o pico do ciclo de manchas solares de 11 anos. No entanto, 2013 já chegou e a atividade solar é relativamente baixa. O número de manchas solares está bem abaixo de seus valores em 2011, e fortes explosões solares têm sido frequentes durante muitos meses (PHILLIPS, 2013).

A calma do Sol levou alguns observadores a se perguntar se os meteorologistas erraram o alvo. O físico solar Dean Pesnell do Goddard Space Flight Center tem uma explicação diferente (PHILLIPS, 2013): "Este é o máximo solar. Mas parece diferente do que esperávamos, pois está apresentando duplo pico."

A sabedoria popular diz que oscilações de atividade solar foram para trás como um pêndulo simples. Em uma extremidade do ciclo, há um tempo tranquilo

com poucas manchas e erupções. Na outra ponta, o Máximo Solar traz um elevado número de manchas solares e tempestades solares. É um ritmo regular que se repete a cada 11 anos (PHILLIPS, 2013).

A realidade, no entanto, é mais complexa. Os astrônomos foram contando as manchas solares ao longo de séculos, e eles viram que o ciclo solar não é perfeitamente regular. Por um lado, o balanço do vai-e-vem na contagem de manchas solares pode levar de 10 a 13 anos para ser concluída, também, a amplitude do ciclo varia. Alguns máximos solares são muito fracos, outros muito fortes (PHILLIPS, 2013).

Pesnell observa ainda uma outra complexidade: "Os dois últimos máximos solares, por volta de 1989 e 2001, tiveram não um, mas dois picos." A atividade solar aumentou, mergulhado, em seguida, retomou, realizando um mini-ciclo que durou cerca de dois anos (PHILLIPS, 2013).

A mesma coisa poderia estar acontecendo agora. Contagem de manchas solares saltou em 2011, caiu em 2012, e Pesnell espera que a repercussão novamente em 2013: "Eu me sinto confortável em dizer que um outro pico vai acontecer em 2013 e, possivelmente, última em 2014", prevê (PHILLIPS, 2013).

Pesnell é um dos principais membros do Painel de Previsão do Ciclo Solar (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), NOAA / NASA, um grupo de fita azul de físicos solares que se reuniram em 2006 e 2008, para prever o próximo Máximo Solar. Na época, o sol estava experimentando seu mínimo mais profundo em quase uma centena de anos. O número de manchas solares foi atrelado perto de zero e atividade explosão de raios-x alinhada por meses em um momento. Reconhecendo que mínimos extremos são muitas vezes seguidos por máximos fracos, e reúnem muitas outras linhas de evidências preditivas, o painel emitiu a seguinte declaração (PHILLIPS, 2013):

"O ciclo 24 Painel de Previsão Solar chegou a um consenso. O painel decidiu que o próximo ciclo solar (ciclo 24) será abaixo da média em intensidade, com um número máximo de manchas solares de 90. Dada a data de mínimo solar e a máxima prevista intensidade, máximo solar está previsto para ocorrer em maio de

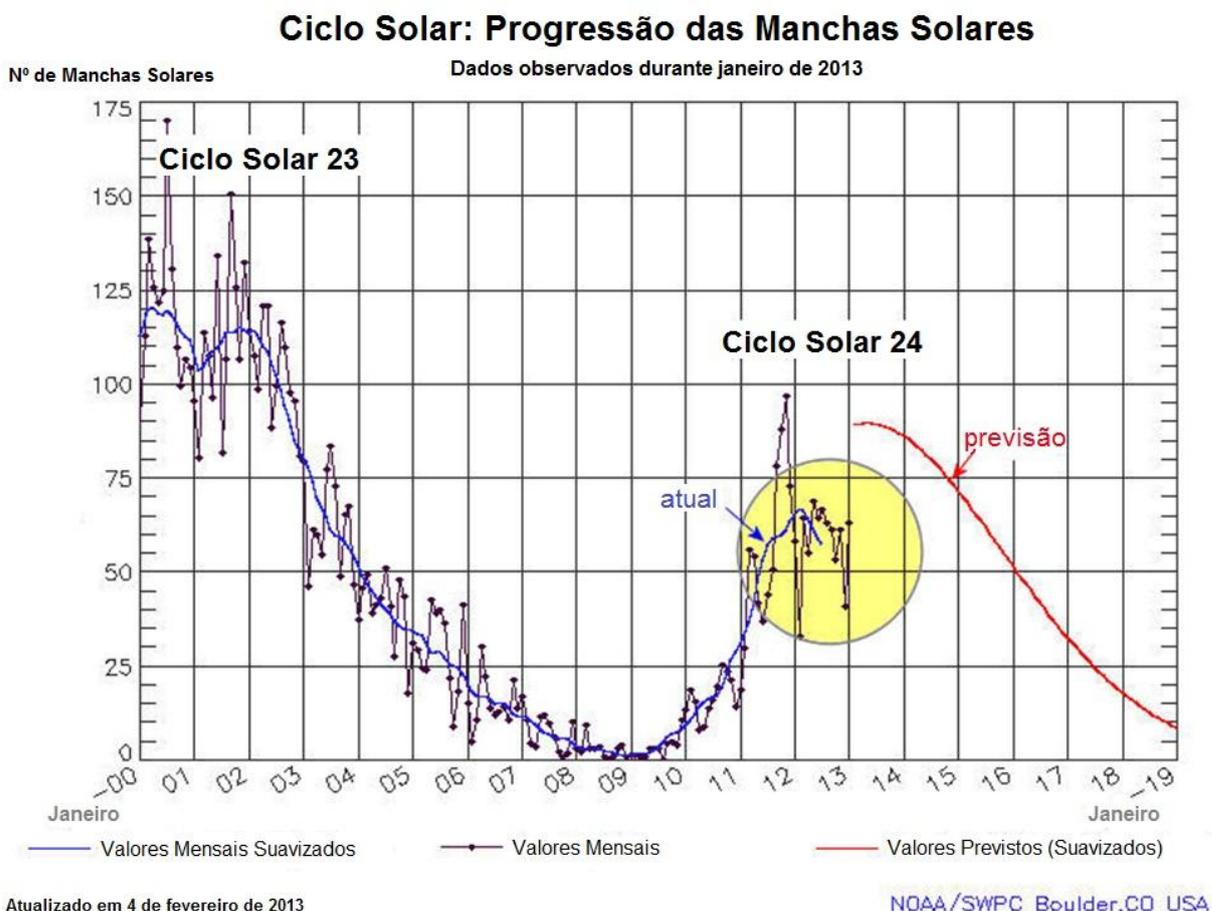
2013. Note: esta não é uma decisão unânime, mas a maioria absoluta do painel concordou (PHILLIPS, 2013)."

Aliás, Pesnell observa uma semelhança entre o ciclo solar 24, em andamento agora, e o Ciclo Solar 14, que teve um duplo-pico durante a primeira década do século 20. Se os dois ciclos são de fato gêmeos, "isso significaria um pico no final de 2013 e outra em 2015 (PHILLIPS, 2013)."

Ninguém sabe ao certo o que o sol vai fazer a seguir. É provável, porém, que no final de 2013 poderia ser muito mais animado do que o começo (PHILLIPS, 2013).

Abaixo, previsão gráfica referente a manchas solares do ciclo 24:

GRÁFICO 4: Previsão gráfica referente a manchas solares do ciclo 24. Fonte: PHILLIPS, 2013.



## 2.2 TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Nos tópicos anteriores foram descritas características das manchas solares, que dão origem a explosões solares, que por sua vez libera grande quantidade de energia emitindo partículas e matéria na ocorrência de vento solar e ejeção de massa coronal. Se essas partículas e matéria forem direcionadas a Terra, causarão as tempestades geomagnéticas.

Para entender as tempestades geomagnéticas são mostradas características do campo magnético da Terra, como também das correntes geomagnética induzidas, que por sua vez são geradas por tempestades geomagnéticas e poderão causar danos ao sistema elétrico.

### 2.2.1 CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

No núcleo da Terra existe um fluxo de fortes correntes elétricas que gera a maior parcela desse campo magnético terrestre total. Segundo HARTMANN, 2005: O campo geomagnético, em qualquer posição da superfície da Terra é a soma de três origens distintas: o campo interno, cuja produção ocorre no núcleo externo da Terra: o campo crustal, cujas fontes são os materiais magnetizados e induzidos encontrados na crosta; e o campo externo: produzido na magnetosfera.

A magnetosfera é uma região em que o campo magnético domina o movimento do plasma, constituído principalmente de prótons e elétrons. A forma das linhas do campo magnético é tal que estas são achatadas de frente ao Sol, pela ação do vento solar, sendo alongadas do lado oposto (HARTMANN, 2005).

Na magnetosfera existem camadas ionizadas formando a ionosfera. A ionosfera é a região onde se movimentam partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo magnético resulta em modificações nas condições do meio ionizado. A ionosfera é dividida em três regiões: a região D: situada entre 50-90km;

região E: 90-120km e; região F: 120-1500km. E na parte superior, a magnetosfera está limitada pela magnetopausa, depois da qual o campo geomagnético é nulo (HARTMANN, 2005).

O Campo Magnético da Terra controla o movimento de íons presentes no ambiente espacial em que o planeta se encontra, impedindo a incidência direta de partículas vindas com o Vento Solar (STEKEL, 2008).

Esse campo é gerado em sua grande maioria por correntes que fluem no interior do planeta, possuindo pequenas contribuições dos sistemas de correntes atmosféricas do conjunto magnetosfera-ionosfera (Costa, Simões, Cardoso, Alves, 2011).

Astronautas que estão em missões em regiões do espaço onde não existe essa proteção magnética natural, estão mais vulneráveis a serem atingidos por radiação advinda do espaço, como também seus equipamentos podem sofrer diversos danos. Situação mais intensificada com a ocorrência de explosões solares direcionadas as naves ou a estação espacial. Nestas ocasiões os astronautas devem procurar compartimentos mais protegidos como, por exemplo, suas cápsulas de reentrada.

### **2.2.2 TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS**

Tempestades geomagnéticas podem ser definidas como a resposta da magnetosfera terrestre a alterações nos parâmetros do vento solar, causadas por eventos tais como CMEs (SALOMONI, MATSUOKA, FLORÊNCIO, 2011)

Como foi mostrado anteriormente, fortes explosões solares causam CMEs.

Com a ocorrência de CMEs, os parâmetros do vento solar são drasticamente modificados: sua densidade pode passar de  $10^6$  para  $10^7$  partículas/m<sup>3</sup> e sua velocidade de 300-400 km/s para valores maiores que 1000

km/s. Se essa nuvem de plasma é ejetada na direção da Terra e a atinge, pode causar uma tempestade geomagnética (SALOMONI, MATSUOKA, FLORÊNCIO, 2011).

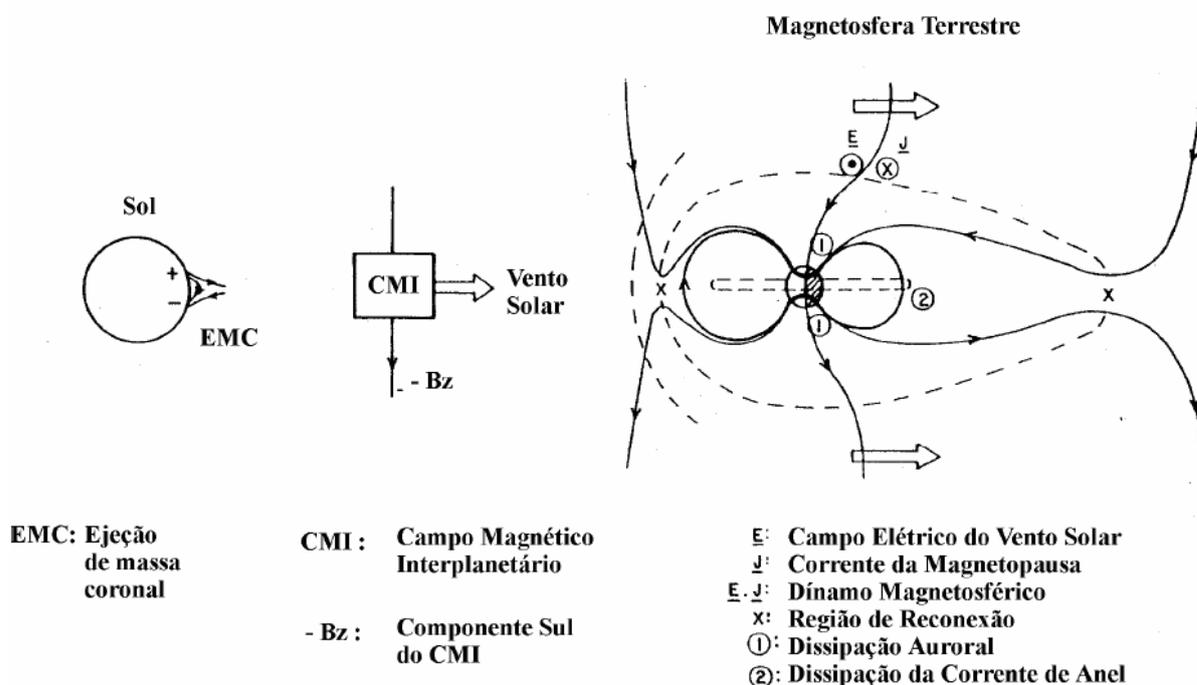
Durante uma tempestade são injetadas partículas provenientes do vento solar na magnetosfera interna. Essas partículas se movem ao redor da Terra, sendo que os prótons derivam para oeste e os elétrons para leste. Essas derivas são causadas por gradientes e curvaturas do campo geomagnético. As partículas injetadas enriquecem a chamada corrente de anel, um sistema de correntes de leste para oeste que circula a Terra em latitudes equatoriais, diminuindo o valor da componente  $B_H$  do campo magnético terrestre na superfície de praticamente todo o planeta. Além disso, as tempestades são caracterizadas pela aceleração e termalização de partículas da lâmina de plasma e da corrente de anel, provocando ainda os fenômenos conhecidos como auroras (Costa, Simões, Cardoso, Alves, 2011).

Simplificadamente, pode ser considerado que a penetração de partículas na magnetosfera ocorre quando a região sul do campo magnético interplanetário se encaixa com a região norte do campo magnético da Terra.

O campo magnético interplanetário é simplesmente um prolongamento do campo magnético do Sol, tendo formato espiral, pelo fato do Sol ter diferentes rotações em latitudes distintas.

Para que ocorra a entrada de partículas na magnetosfera é preciso que ocorra o acoplamento Sol-meio interplanetário-magnetosfera descrito na Figura 2.

FIGURA 2: Esquema do acoplamento Sol-meio interplanetário-magnetosfera. Fonte: SAUERESSIG, 2006.



### 2.2.3 CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS (GIC's)

As correntes que fluem na ionosfera induzem campos elétricos, assim podem induzir correntes elétricas em elementos metálicos de grandes extensões, tais como estradas de ferro, linhas da transmissão de alta potência, encanamentos metálicos, etc. Durante uma tempestade geomagnética de grande magnitude, a ionização, portanto a indução, e por consequência, a corrente elétrica gerada frequentemente excede a centenas de amperes além das correntes nominais. Isto pode ter efeitos imprevisíveis, podendo inclusive ser catastrófico no sistema em que fluem (PEREIRA E LEITHOLD).

Este é um tema bem conhecido e pesquisado por países do hemisfério norte, como Canadá e Estados Unidos. Pelo fato dessa região está em altas latitudes, possuem menos proteção magnética natural contra tempestades geomagnéticas. Nessa região já foi comprovado que as GIC's já causaram

“blackouts” de grandes proporções. Por isso esses países investem pesado no monitoramento das causas e na prevenção dos efeitos desses eventos.

O tamanho de uma GIC, em geral, é determinado pelas propriedades elétricas e pela topologia da rede na qual se induz. As variações magnetosféricas-ionosféricas maiores, podem ter por resultado variações externas maiores do campo magnético, estas, ocorrem durante tempestades geomagnéticas de grandes proporções. Os períodos de ocorrência nas variações podem durar de segundos até horas, assim que o processo da indução envolve o manto e a litosfera superiores. As variações maiores do campo magnético têm sido observadas em latitudes magnéticas mais elevadas (PEREIRA E LEITHOLD).

Segundo MOLINSKI, FEERO & DAMSKY, 2000, a probabilidade de ocorrência de tempestades geomagnéticas pode ser alta em uma região de alta latitude, entretanto ter baixa incidência de GICs, determinada pela baixa resistividade da terra naquela região. Essa resistividade pode ser determinada por fatores como a proximidade do mar.

#### **2.2.4 ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL**

Descoberta na década de 1950, esta região apresenta atualmente a área de menor intensidade do Campo Geomagnético ao longo da superfície terrestre. A atual localização do menor valor do Campo Magnético está hoje situada no sudeste brasileiro, cerca de 700 km da costa do Atlântico (STEKEL, ECHER, SCHUCH, 2008).

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (*South Atlantic Magnetic Anomaly, SAMA*), é uma região onde a parte mais interna do cinturão de *Van Allen*, tem a máxima aproximação com a superfície da Terra. O resultado é que para uma dada altitude, a intensidade de radiação é mais alta nesta região do que em qualquer outra (PEREIRA E LEITHOLD).

A SAMA é produzida por um "mergulho" no campo magnético terrestre na região, presume-se que é causada pelo fato do centro do campo estar deslocado em relação ao centro geográfico por 450 km aproximadamente (PEREIRA E LEITHOLD).

A região da SAMA caracteriza-se por apresentar baixas intensidades no campo magnético total, coincidindo com a uma região de intensa radiação no espaço próximo a Terra, sendo, portanto, uma espécie de "janela" à entrada de partículas cósmicas (HARTMANN, 2005).

Atualmente, a SAMA possui uma forma alongada estendendo-se da América do Sul até a África, sendo que o centro em função da mínima intensidade do campo localiza-se no interior do Paraguai (HARTMANN, 2005).

Os satélites que têm órbitas passando por essa região são programados a desviar a rota, pois nessa região estariam sujeitos à grande vulnerabilidade de absorção de radiação advinda do espaço, que se intensificam quando ocorrem explosões solares.

Por ser uma alteração local do campo magnético terrestre, nesta região a magnetosfera não segue os padrões de proteção contra partículas carregadas vindas do espaço. Essas partículas, por encontrarem barreiras de campo magnético menos intenso, têm maior facilidade de penetrar na magnetosfera.

Pelos padrões de proteção do campo magnético da Terra, quem está mais próximo aos pólos, está mais vulnerável à penetração eletromagnética de origem espacial solar ou não-solar. Essa vulnerabilidade vai diminuindo de acordo com a aproximação da linha do equador. Em relação ao Brasil, situado em latitude tropical, deveria está mais protegido contra esses eventos magnéticos caso não existe a SAMA que desordena essa proteção natural.

## 2.3 EFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Como foi exposto até aqui, explosões solares direcionadas a Terra possivelmente causarão tempestades geomagnéticas, gerando correntes geomagneticamente induzidas, que poderão causar efeitos negativos no sistema elétrico.

Nessa parte do trabalho, são destacadas as características desses efeitos, baseando-se também por registros passados de falhas em sistemas elétricos. Também são mostradas possíveis soluções para evitar ou amenizar maiores danos futuros.

### 2.3.1 EFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Os efeitos mostrados a seguir serão consequência das GIC's, que podem acontecer sem a ligação com explosões solares. No entanto, pelo que foi mostrado no decorrer deste estudo, explosões solares direcionadas a Terra, podem causar, na maioria dos casos, GIC's de pequenas ou grandes proporção, gerando diversos tipos de distúrbios.

Segundo HARTMANN, 2005 e SZCZUPAK, PINTO, MACEDO, DRUMMOND, 2004, as GIC's podem causar diversos tipos de distúrbios nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A seguir são listadas alguns exemplos:

- Excitação DC (corrente contínua) em transformadores de potência, provocando saturação dos núcleos e consequentemente aquecimentos indesejáveis e injeção de harmônicas no sistema;
- Saturação de transformadores causando quedas de tensão;

- Variações anormais das potências ativas e reativas geradas pela distorção do sinal de tensão (presença de componentes harmônicas) nos reguladores automáticos e tensão;
- Introdução de harmônicos em linhas de transmissão alterando o nível máximo regulado para a tensão pela ocorrência de picos, tanto positivos quanto negativos, podendo levar à violação de limites pré-estabelecidos (isolamento, qualidade de energia) e à eventual atuação da proteção ou dano direto a equipamentos (ruptura de isolamentos, envelhecimento precoce de máquinas, etc.);
- Saturação de transformadores o que produz a injeção de harmônicos no sistema, sobrecarregando bancos de capacitores e levando-os ao desligamento;
- Saturação de transformadores produzindo o aumento consumo de reativos causando quedas de tensão, podendo mesmo causar um colapso no sistema ;
- Falhas na atuação de controles podem induzir ao falso diagnóstico de “falhas mecânicas” – por exemplo, falhas em bombas dos geradores, atuação indevida (ou não atuação) de disjuntores, seccionadores, etc.

No caso do sistema brasileiro, que é interligado, dependendo do local onde um destes problemas, ocorra do horário e das condições em que se encontra o sistema (sobrecarregado, por exemplo) este pode ser catastrófico provocando um efeito do tipo dominó quando diversas regiões do país são afetadas (desligadas).

A tabela 2 apresenta a classificação das tempestades geomagnéticas e suas possíveis implicações.

TABELA 2: Classificação de Tempestades Geomagnéticas. Fonte: DENARDINI, COSTA, LAGO, 2013.

INDICE	TIPO	DESCRIÇÃO DE POSSÍVEIS EFEITOS
G 5	Extremo	<p>Sistemas Elétricos: : problemas gerais de controle de voltagem e problemas com sistemas de proteção, alguma malha do sistema pode experimentar colapso completo ou blackouts. Transformadores podem ser danificados.</p> <p>Operação de satélites: pode experimentar extensiva sobrecarga estática na superfície, problemas com orientação, problemas com o uplink/downlink e rastreamento dos satélites.</p> <p>Outros sistemas: correntes nos duto metálicos podem atingir centenas de ampéres, propagação em rádio HF (high frequency) pode ficar impossível em muitas áreas por um ou dois dias, navegação por satélite pode ficar degradadas por dias, navegação por baixa frequência pode ficar impossível por horas.</p>
G 4	Severo	<p>Sistemas Elétricos: problemas gerais de controle de voltagem e problemas com sistemas de proteção que podem ser acionados erroneamente.</p> <p>Operações de Satélites: pode experimentar sobrecarga estática na superfície e problemas de rastreamento, correções podem ser necessárias para problemas de orientação.</p> <p>Outros sistemas: correntes induzida nos dutos afetam medidas preventivas, produzem problemas esporádicos na propagação HF, navegação por satélite degrada por horas, navegação por baixa-frequência é perturbada.</p>
G 3	Forte	<p>Sistema elétrico: correções de voltagens podem ser necessárias, alarmes falsos iniciando algum equipamento de proteção.</p> <p>Operação de satélite: sobrecarga estática de superfície nos componetes podem ocorrer, pode ocorrer aumento do arrast sobre os de baixa órbita, e correções podem ser necessárias para os problemas de orientação.</p> <p>Outros sistemas: podem ocorrer problemas intermitentes na navegação do satélite e navegação em baixa-frequência, comunicação em rádio HF pode ficar intermitente.</p>
G 2	Moderado	<p>Sistema elétrico: sistemas em alta latitude pode experimentar alarmes do nível de voltagem, tempestades de longa duração causam danos aos transformadores.</p> <p>Operação de satélites: podem ser requeridas ações corretivas da orientação pelos controles de solo; possíveis mudanças no arrasto podem afetar a previsão das órbitas.</p> <p>Outros sistemas: propagação em rádio HF pode enfraquecer em altas latitudes.</p>
G 1	Fraco	<p>Sistema elétrico: flutuações fracas na voltagem podem acontecer.</p> <p>Operação de satélite: possível impacto pequeno nas operações.</p> <p>Outros sistemas: animais migratórios são afetados neste nível e em níveis mais altos.</p>

### 2.3.2 OUTROS EFEITOS

Além de intensificar as GIC's, as explosões solares também provocam o aumento do fluxo solar de raio-X e ultravioleta, que causam danos a saúde humana e a equipamentos. Dependendo da intensidade, os astronautas em órbita devem se orientados a procurarem compartimentos seguros contra radiação ou mesmo irem se alojar nas cápsulas de retorno.

As correntes de alta altitude induzem correntes espelho na Terra, bem como nos caminhos paralelos fornecidos por tais sistemas artificiais como linhas telefônicas, linhas de tubulação, ferrovias e linhas de transmissão (MOLINSKI, FEERO & DAMSKY, 2000).

### 2.3.3 OCORRÊNCIAS REGISTRADAS

O evento mais grave registrado na história foi o Evento Carrington de 1859, medido a 850nT. De 28 agosto a 4 setembro de 1859, auroras, muitas vezes chamado de as luzes do norte ou do sul, atravessaram vários continentes e foram observados em todo o mundo. De acordo com especialistas, as auroras eram na verdade duas tempestades geomagnéticas intensas. Em todo o mundo, as redes telegráficas experimentaram interrupções e falhas, como resultado das correntes geradas pelas tempestades geomagnéticas. Os custos econômicos associados a uma tempestade geomagnética catastrófica semelhante ao do Evento Carrington poderia chegar à vários bilhões de dólares (DHS, 2011). Segundo o o Portal IG/Ciência, nesse evento, os fios soltaram faíscas que deram choques nos operadores de telégrafo. O Sol arremessou bilhões de toneladas de elétrons e prótons sibilantes para a Terra e, quando essas partículas bateram no campo magnético do planeta, criaram auroras espetaculares nas cores vermelho, verde e roxo no céu noturno – além de correntes poderosas de eletricidade que saltaram do chão para os fios, sobrecarregando os circuitos. Sabe-se que, se uma tempestade dessas acontecesse no século XXI, muito mais do que fios e papel estaria em risco.

Alguns satélites de telecomunicação muito acima da Terra seriam desligados. O sistema GPS ficaria inoperante. E o surto de eletricidade vindo do chão ameaçaria as redes elétricas, quem sabe deixando um continente ou dois nas trevas.

Segundo MOLINSKI, FEERO & DAMSKY, 2000, em março de 1989, durante um pico solar, que ocorre a cada ciclo de 11 anos, uma alteração geomagnética produziu uma falha em toda a rede elétrica Hydro-Québec, deixando seis milhões de clientes na província canadense sem eletricidade por 9 horas, e também danificando usinas no Nordeste dos Estados Unidos.

O Canadá foi atingido novamente poucos meses depois, quando outra tormenta solar foi identificada como responsável pelo desligamento de computadores na Bolsa de Valores de Toronto, impedindo as transações (IG).

Desde o final de outubro e início de novembro de 2003, grandes tempestades geomagnéticas, que atingiu um pico de uma gravidade de -410 nT, afetou a infraestrutura de sistema de energia, a indústria da aviação e comunicações por satélite na Europa e América do Norte. Durante o evento de Halloween de 2003, o setor de aviação internacional experimentou problemas de comunicação em altas latitudes. A *Federal Aviation Administration* (FAA) não pode fornecer orientação de navegação GPS por cerca de 30 horas (DHS, 2011).

Na tabela 3 serão expostas em ordem cronológica várias perturbações magnéticas que afetaram sistemas elétricos na Terra e que podem ter ligação com explosões solares.

TABELA 3: Perturbações magnéticas que afetaram sistemas elétricos na Terra. Fonte: [http://aurora.fmi.fi/gic\\_service/images/EffectsList.pdf](http://aurora.fmi.fi/gic_service/images/EffectsList.pdf)

<b>1847</b>	<b>Março</b>	<b>19</b>	Deformações espontâneas observadas nas agulhas da eléctrico telegraphin Inglaterra.
	<b>setembro</b>	<b>24-25</b>	Percebeu-se que os maiores desvios ocorreram quando auroras eram visíveis.
	<b>Outubro</b>	<b>23-25</b>	(Barlow, 1849; ver também Varley, 1873).
<b>1848</b>	<b>Outubro</b>	<b>27-29</b>	Ocasão de distúrbios pesados sobre o telégrafo (Burbank, 1905). Matteucci comentou a coincidência da aurora com interrupções nas comunicações telegráficas, produzido por correntes telúricas (Angot, 1897, p 138).
	<b>novembro</b>	<b>17</b>	Aparência da aurora coincidiu com efeitos sobre o

			telégrafo elétrico entre Florença e Pisa (Prescott, 1866, p 317).
1951	setembro		Prescott relatórios (1866), "uma aurora notável, que tomou posse completa de todo o linhas telegráficas na Nova Inglaterra, e impediu qualquer negócio de ser transacionado durante a sua manutenção".
1852	Fevereiro	19	Exibição auroral brilhante observado. Associado a isto foram queimadas por meio de correntes que o papel químico usado com o Bain química telégrafo no nordeste dos EUA (Prescott, 1866, p 318).
1959	agosto -setembro	28 2	Mr OS Wood, superintendente das linhas telegráficas canadenses, diz: "... tão completamente foram as linhas sob a influência da aurora boreal, que foi encontrado totalmente impossível a comunicação entre as estações de telégrafo, e a linha foi fechada por a noite". Problemas também relatado por operadores de telégrafo em Nova York, Washington, Philadelphia, Vermont e Massachusetts (Prescott, 1860, 1866 e também ver Clement, 1860) e Gotemburgo, Suécia (Rubenson, 1882). Em todas as estações telegráficas em França serviço foi impedido durante toda a 02 de setembro (Blavier de 1859, ver também Angot, 1897).
1869	Maio	30	Das dezesseis linhas, que terminaram no escritório telegráfica na Basileia, seis eram quase inútil durante as duas horas que durou o fenômeno (Angot, 1897, p 141).
1870	Abril & outubro	5 24	Coincidências entre aurora boreal e correntes telúricas em serviço telegráfico observado por Angot (1897), p 142.
1872	Fevereiro	4	As correntes telúricas alcançaram um desenvolvimento extraordinário durante a aurora que era um dos mais extensa conhecida. Os distúrbios da comunicação telegráfica foram não menos extensa. Na Alemanha, todas as linhas foram afetadas, e a comunicação foi por um muito tempo impossível entre Colônia e Londres. Correntes telúricas foram também observados na Inglaterra, França, Áustria, Suíça, Itália e Turquia. A transmissão de mensagens também foi impedido de cabos submarinos, especialmente na linha de Lisboa para Gibraltar, na linha de Suez a Aden, e de Aden a Bombaim, e no cabo transatlântico de Brest a Duxbury (Angot de 1897, ver também Arrhenius, 1903).
1872 - 1873			Efeitos atuais da Terra em cabos Atlântico (Graves, 1873), erroneamente atribuída a terremotos.
1882	novembro	17	Correntes telúricas observados na Inglaterra eram,

			de acordo com Preece [Superintendente do Telegraph] cinco vezes mais forte que o atual geralmente empregadas em telegrafia. Comunicação foi interrompido, enquanto durou a perturbação (Angot, 1897, p 143).
<b>1891</b>			Força eletromotriz de 768 volts foi registrada nas linhas da Western Union entre Nova York e Buffalo, os circuitos diferentes 450-480 milhas de comprimento. em várias ocasiões, a força da corrente de terra atingiu cerca de 300 mA, em comparação com o normal correntes que não excedia 35 mA (Finn, 1903) de trabalho.
<b>1892</b>	<b>Julho</b>	<b>16</b>	Interrupção grave de serviço fio nos EUA (Sanders, 1961). Burbank (1905) dá pormenores das tensões observadas em várias linhas, incluindo os 210 volts, cerca de 9 V / Km, em linha a partir de Nova York, para Elizabeth, N.J.
<b>1894</b>	<b>Março</b>	<b>30-31</b>	Operadores de telégrafo tinha sido fornecido com telefones e ouviu uma variedade de sons produzido por correntes de terra nas linhas (Preece, 1894).
<b>1903</b>	<b>Outubro</b>	<b>31</b>	Praticamente todo o sistema de telégrafos do mundo estava chateado, e as informações da Inglaterra, França, Estados Unidos e outros países mostra que, para vários comunicação horas foi quase totalmente interrompida (Lockyer, 1903, ver também Finn, 1903).
<b>1921</b>	<b>Maio</b>		Karsberg et al (1959) relatam que as correntes induzidas causaram incêndios em equipamentos de telégrafo em Suécia. Data exata não é dado, mas Chapman e Bartels (1940) mostram que a grande tempestade magnética ocorreu em 13-15 de maio, 1921.
<b>1938</b>	<b>Abril</b>	<b>16</b>	Várias centenas de volts em fios na Noruega (Chapman e Bartels, 1940). Problemas no sistema de telégrafo na Noruega, mesmo que ocorreu em 1940 (Harang, 1941).
<b>1940</b>	<b>Março</b>	<b>24</b>	Primeiros efeitos relatados em sistemas de energia, com quedas de tensão, grandes oscilações na reativa energia, e tropeçar de bancos de transformadores, relatou a partir de empresas de energia em os EUA e Canadá (Davidson, 1940). Efeitos também observada no Telephone and Telegraph sistemas nos EUA (Germaine de 1940; Stetson, 1947) e Noruega (Harang, 1941; repetido em Ramleth, 1982).
<b>1946</b>	<b>Março</b>	<b>28</b>	Transformadores tropeçou em Port Arthur e Rio Crow, Ontário (Acres, 1975).
	<b>setembro</b>	<b>22</b>	Transformadores tropeçou em Port Arthur e Rio Crow, Ontário (Acres, 1975).

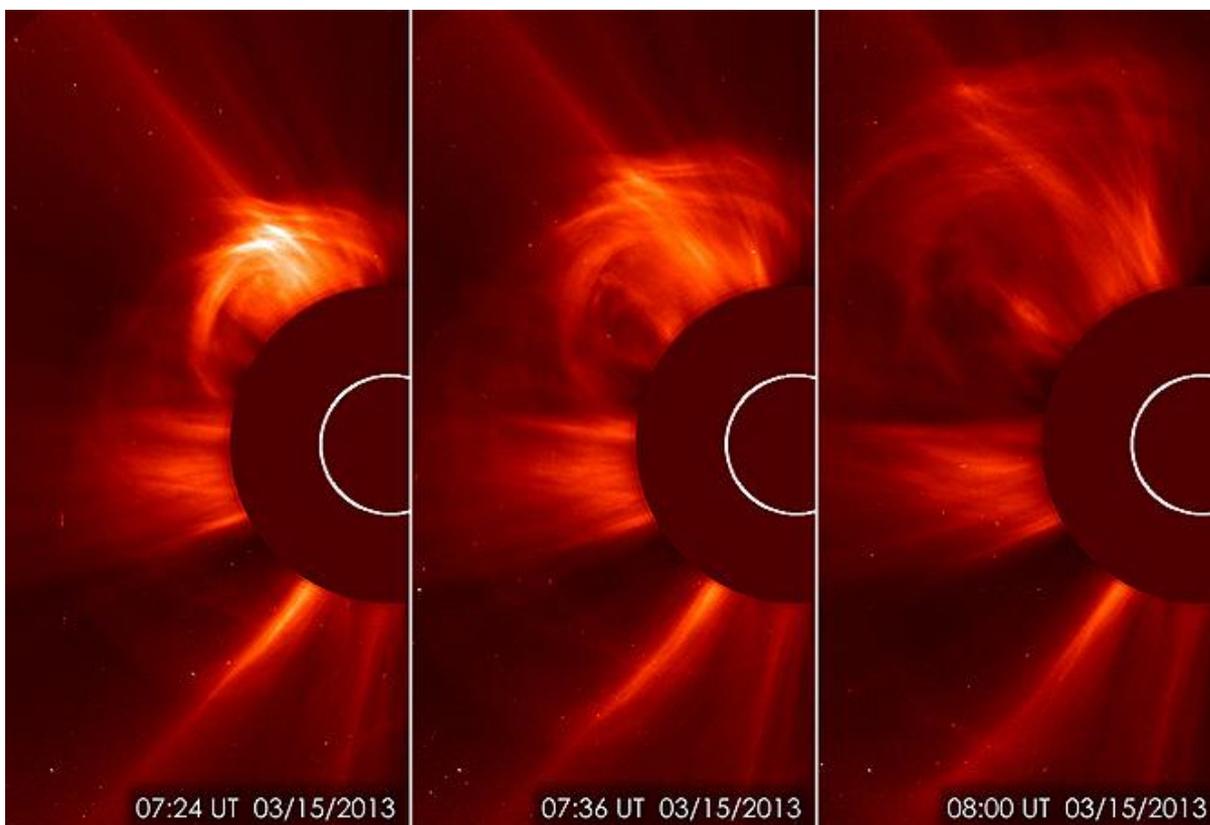
<b>1957</b>	<b>Janeiro</b>	<b>21</b>	Perturbações no energia alimentando circuitos em cabos submarinos transatlânticos (Machado, 1968).
	<b>setembro</b>	<b>22</b>	Efeitos no sistema de alimentação: viagem de disjuntor 230kV, devido à saturação do transformador núcleos e 3 excessivas correntes harmônicas em relés da Terra (Slothower e Albertson, 1967).
<b>1958</b>	<b>Fevereiro</b>	<b>10</b>	Área de Toronto sofreu um apagão (Lanzerotti e Gregori, 1986). Poder anormal flui em Minnesota (Slothower e Albertson, 1967). TAT-1 cabo transatlântico sofreu uma interrupção de serviço (Winckler et al, 1959).
<b>1960</b>	<b>novembro</b>	<b>13</b>	Perturbações nos circuitos de alimentação de energia em cabos transatlânticos (Machado, 1968). Disparo do 30 A linha de disjuntores na Suécia (Tillberg e Andersson, 1977; Elovaara et al, 1992).
<b>1972</b>	<b>Agosto</b>	<b>4</b>	Interrupção do sistema de cabos de L-4 em os EUA continental (Anderson et ai, 1974). Problemas também experimentou em sistemas de potência (Albertson e Thorson, 1974).
<b>1980</b>	<b>Outubro</b>		Viagem de 500 kV a partir de Manitoba de Minnesota (Aspnes et al, 1981).
<b>1981</b>	<b>Abril</b>		Viagem de 500 kV (de novo) a partir de Manitoba para Minnesota. (Aspnes et al, 1981).
<b>1982</b>	<b>Julho</b>	<b>13-14</b>	Quatro transformadores e 15 linhas tropeçou na Suécia (Elovaara et al, 1992). Sinais de tráfego ferroviário foram transformadas em vermelho pela tensão induzida (Wallerius, 1982).
<b>1989</b>	<b>Março</b>	<b>13-14</b>	Blackout de Québec por 9 horas, e os efeitos sobre outros sistemas de energia em todo o Norte América, incluindo queima de transformadores de potência (Allen et al, 1989; Cucchi e Ponder, 1991). Cinco linhas de 130 kV foram tropeçou na Suécia (Elovaara et al, 1992).
	<b>setembro</b>	<b>19</b>	Danos Transformer em Serviço Público de Energia Elétrica e sistema de gás (Bozoki et al, 1996).
	<b>Outubro</b>	<b>20</b>	SC disparado por neutro desequilíbrio de proteção (Bozoki et al, 1996).
	<b>novembro</b>	<b>17-18</b>	SC disparado por neutro desequilíbrio de proteção (Bozoki et al, 1996).
<b>1990</b>	<b>Março</b>	<b>30</b>	SC disparado por neutro desequilíbrio de proteção (Bozoki et al, 1996).
<b>1991</b>	<b>Março</b>	<b>24</b>	Nove linhas de 220 kV e um transformador foram tropeçou na Suécia (Elovaara et al, 1992). Baixa tensão, seqüência-zero capacitor neutros e transformador de alarmes e harmônicas disparo do banco de capacitores e SVC nos EUA (Bozoki et al, 1996).
	<b>Abril</b>	<b>28</b>	SC retirado de serviço em Allegheny Power System em EUA (Bozoki et al, 1996).

	<b>Maio</b>	<b>16</b>	Capacitor alarme harmônico neutro em Allegheny sistema de alimentação (Bozoki et al, 1996).
	<b>Maio</b>	<b>28</b>	Pára-filtro falhou em Québec - New England DC link (Dickmander et al, 1994).
	<b>Junho</b>	<b>4-5</b>	BC Hydro 138 kV tropeçou em sobrecorrente de terra (Bozoki et al, 1996).
	<b>Junho</b>	<b>10</b>	transformador retirado de serviço e em diversas viagens SC EUA (Bozoki et al, 1996).
	<b>novembro</b>	<b>8</b>	Efeitos menores sobre os sistemas de energia dos EUA (Bozoki et al, 1996).
	<b>Outubro</b>	<b>28</b>	O Québec - linha DC New England tropeçou fora de serviço (Blais e Metsa, 1993). Em os EUA, os bancos de capacitores e transformadores tropeçou fora, quedas de tensão ocorreu e a Novo México HVDC terminais desarmado (Allen e Wilkinson, 1993, Bozoki et al, 1996).
<b>1992</b>	<b>setembro</b>	<b>10</b>	115 kV SC tropeçou em Central Hudson Gas & Electric nos EUA (Bozoki et al, 1996).
	<b>novembro</b>	<b>11</b>	115 kV SC tropeçou em Central Hudson Gas & Electric nos EUA (Bozoki et al, 1996).

Em 15 de março de 2013, em 02:54 EDT, o Sol irrompeu uma ejeção de massa coronal em direção Terra. Modelos de investigação experimental da Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA), com base em observações do Observatório Solar (*Solar Terrestrial Relations Observatory*, STEREO) e Agência Espacial Europeia (ESA) / NASA Observatório Solar e Heliosférico (SOHO), mostram que o CME deixou o Sol a uma velocidade de cerca de 900 Km/s, o que é uma velocidade bastante rápida para CMEs. Historicamente, as CMEs a esta velocidade causaram efeitos de leve a moderados na Terra ([http://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/News031513-cme.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News031513-cme.html)).

Abaixo, imagens registradas pela NASA da CME do dia 15/03/2013:

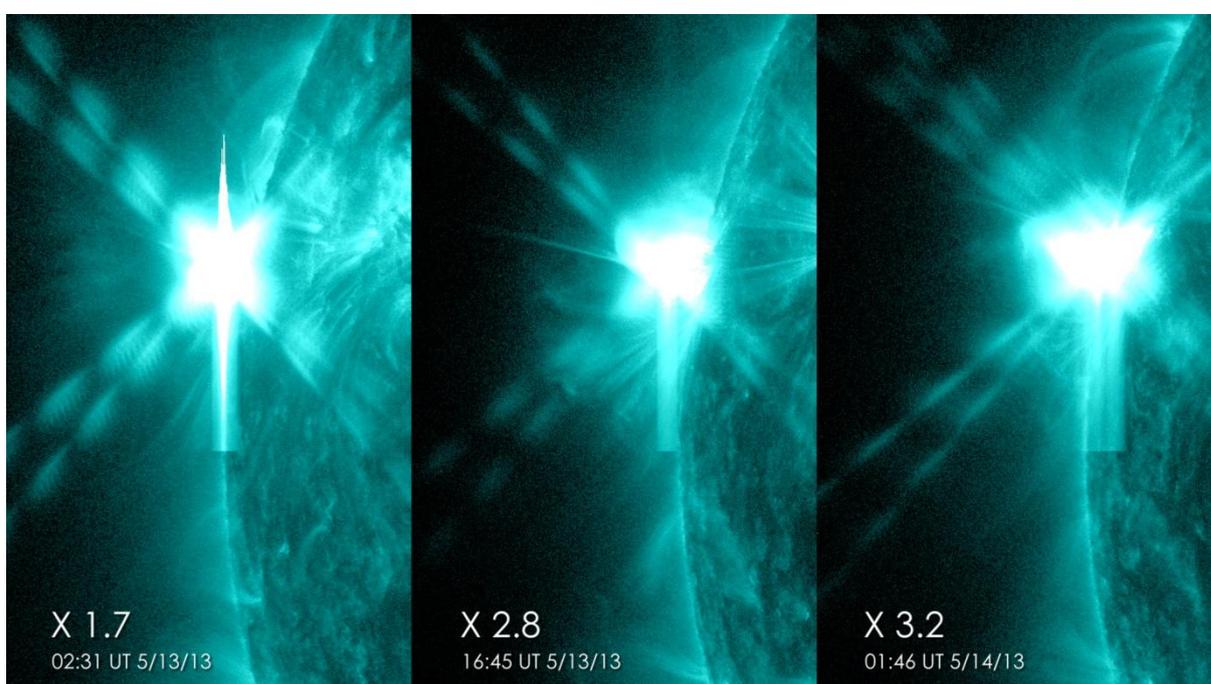
FIGURA 3: Sequência de imagens de uma ejeção de massa coronal registrada pela NASA em 15 de março de 2013. Fonte: NASA.



O Sol sofreu uma terceira explosão significativa em menos de 24 horas, chegando às 09:11 EDT em 13 de maio de 2013. Este surto é classificado como um do tipo X3.2. Este é o mais forte surto de classe X de 2013 até agora, superando em força os dois de classe X que ocorreram no início do período de 24 horas (NASA). A explosão também foi associada com uma ejeção de massa coronal. O CME começou às 9:30 pm EDT e não era dirigido a Terra. Sua velocidade estimada era de 1.400 Km/s, o que é particularmente rápido para uma CME. A nuvem de material solar vai passar pela nave espacial Spitzer e pode dar um duro golpe em seus equipamentos. Seus operadores foram notificados e estes podem colocar a sonda em modo de segurança para proteger os seus instrumentos ([http://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/News051213-flare.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News051213-flare.html)).

Abaixo, imagens do Observatório de Dinâmica Solar (SDO) da NASA mostrando as três explosões de classe X que o Sol emitiu em menos de 24 horas em 13 de maio de 2013. As imagens mostram a luz com comprimento de onda de 131 angstroms, o que é particularmente bom para mostrar explosões solares e é normalmente colorizado (http://www.nasa.gov/mission\_pages/sunearth/news/News051213-flare.html):

FIGURA 4: Imagens de três explosões solares registradas pela NASA em 13 de maio de 2013. Fonte: NASA.



Nesta segunda-feira (13/5/2013), entre 13h00 e 13h20, o Centro de Clima Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) registrou um *blackout* de rádio devido à forte emissão de raios-X do Sol que ocorreu no mesmo período. Este *blackout* pode interferir em comunicações de rádio de alta frequência (HF) e em posicionamento e navegação por GPS (INPE).

### 2.3.4 POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Uma série de condensadores poderiam ser utilizados para bloquear o fluxo de GIC nas linhas de transmissão, ou capacitores de bloqueio de neutro em transformador neutros, mas eles raramente são usados para este propósito, porque eles são dispositivos complexos. E para proteger um típico sistema de energia completo, centenas destes equipamentos seriam necessários (MOLINSKI, FEERO & DAMSKY, 2000).

Atualmente é inviável uma maneira de barrar as GIC's, que causam tantos danos ao sistema elétrico e a vários outros sistemas na Terra. Por isso, a melhor solução seria um sistema que monitorasse a probabilidade de incidência desses fenômenos, para alertar aos usuários e responsáveis pelos sistemas alvos que tomem alguma providencia que evite ou minimize danos aos equipamentos no momento dos acontecimentos.

Por esse motivo, existe uma grande preocupação em monitorar manchas solares, pois o acumulo de tais manchas revelam a grande probabilidade de ocorrerem explosões solares, que, se direcionadas a Terra, poderão causar os diversos danos citados.

As partículas advindas das explosões solares direcionadas a Terra podem levar horas para atingi-la. Portanto, mesmo que haja pouco tempo para a chegada dessas partículas na Terra após uma explosão solar, muito ainda pode ser feito na tentativa de proteger sistemas nesse pequeno intervalo de tempo.

O projeto Observatório Solar Heliosférico (SOHO) é um esforço de cooperação entre a Agência Espacial Europeia (ESA) e a NASA. SOHO foi projetado para estudar a estrutura interna do Sol, sua extensa atmosfera exterior e a origem do vento solar, o fluxo de gás altamente ionizado que sopra continuamente para fora através do Sistema Solar (NASA).

SOHO foi lançado em 2 de dezembro de 1995. A sonda SOHO foi construída na Europa, e os instrumentos foram fornecidos por cientistas europeus e norte-americanos. NASA foi responsável pelo lançamento e é agora responsável

pelas operações da missão. Grandes antenas de rádio ao redor formam Rede de Espaço Profundo da Nasa e são usadas para controlar a nave espacial além da órbita da Terra. O controle da missão está localizada no *Goddard Space Flight Center*, em Maryland (NASA).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica de conteúdos que classificam explosões solares como causadoras de distúrbios no sistema elétricos.

Os textos utilizados contêm detalhadamente as características do agente causador das explosões solares e de eventos associados que geram efeitos na Terra, destacando os eventos que causam grandes transtornos no sistema elétrico.

São mostradas imagens reais e ilustrativas que ajudam no entendimento de determinados fenômenos, também são mostrados tabelas e gráficos estatísticos que ajudam a compreender detalhes no tópico de acordo com o período.

Esses dados foram obtidos em estudos acadêmicos, como também foram utilizados informações de instituições nacionais e internacionais que se preocupam em monitorar a causa dessas explosões na tentativa de amenizar os efeitos que poderão surgir.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através deste estudo é possível verificar que os sistemas elétricos da superfície da Terra como também outros sistemas, estão cada vez mais vulneráveis aos efeitos decorrentes de explosões solares e outros eventos associados, sendo mais intensificado pelo crescente desenvolvimento tecnológico e a dependência de eletricidade.

Essas explosões já causaram danos muito significativos em tempos passados e poderão ainda causar catástrofes no sistema elétrico da superfície da Terra.

É importante ressaltar que soluções adotadas em outros locais do planeta podem não se aplicar diretamente ao Brasil, pelo fato da existência da SAMA, bem como pelo modelo de distribuição de energia produzido.

Diante dessa questão, esforços estão sendo realizados na tentativa de amenizar os danos causados por explosões solares. Sistemas de monitoramento e alerta estão espalhados pela Terra e pelo espaço, já que ainda não existem sistemas de segurança viáveis que bloqueiem as correntes induzidas geradas durante esses eventos.

Espera-se que o monitoramento preventivo de Explosões Solares avance em velocidade igual ou superior ao avanço tecnológico.

Já que, dificilmente, a sociedade se tornará independente se energia elétrica, deve-se prezar por uma geração, transmissão e consumo de eletricidade com segurança.

## REFERÊNCIAS

SAUERESSIG, C. W. S. (UFSM, Bolsista PIBIC/ INPE - CNPq/MCT). Análise das Origens Solares e Interplanetárias de Tempestades Geomagnéticas Intensas, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m16%4080/2006/08.09.18.49/doc/Cristian%20S.%20da%20Silva.pdf>>. Acesso em: 13/05/2013

STEKEL, T. R. C. ; ECHER, E. ; SCHUCH, N. J. . ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE EXPLOSÕES SOLARES E DE SEUS EFEITOS NA TERRA. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE, 2008, São Paulo. Anais do Seminário de Iniciação Científica do INPE, 2008. Disponível em: <<http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18%4080/2008/12.09.11.56/doc/Microsoft%20Word%20-%20Relat%3rio%20Final%20PIBIC2008%20-%20Tardelli%20Ronan%20.pdf>>. Acesso em: 21/05/2013.

Notícias INPE, Diário do Litoral, 19/01/2013, página online. Disponível em: <[www.inpe.br/noticias/namidia/img/clip21012013\\_09.pdf](http://www.inpe.br/noticias/namidia/img/clip21012013_09.pdf)>. Acesso em 14/05/2013.

MATSUOKA, M. T. ; CAMARGO, P. O. ; BATISTA, I. S. IMPACTO DE EXPLOSÕES SOLARES NO COMPORTAMENTO DA IONOSFERA E NO POSICIONAMENTO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA: Estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 12, no 2, p.315-334, jul-dez, 2006. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewArticle/7234>>. Acesso em: 13/05/2013.

DENARDINI, C. M. ; COSTA, J. E. R. ; LAGO, A. D. ; As tempestades magnéticas do dia 15 de março de 2013 e a provável ocorrência de uma super tempestade magnética, 2013. Disponível em: <[http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/Denardini\\_et\\_al.\\_\(2013\)\\_As%20tempestades\\_magneticas%20do%20dia%2015\\_de\\_marco\\_de\\_2013\\_e\\_a\\_provavel\\_ocorrencia\\_de\\_uma\\_super-tempestade\\_magnetica.pdf](http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/Denardini_et_al._(2013)_As%20tempestades_magneticas%20do%20dia%2015_de_marco_de_2013_e_a_provavel_ocorrencia_de_uma_super-tempestade_magnetica.pdf)>. Acesso em: 13/05/2013.

E. COSTA Jr. ; F.J.R. SIMÕES Jr. ; F.R. CARDOSO e M.V. ALVES. O vento solar e a atividade geomagnética. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4, 4301. Publicado em 21/11/2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/334301.pdf>>. Acesso em: 13/05/2013.

C. S. SALOMONI, M. T. MATSUOKA, S. FLORÊNCIO S. EFEITOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NO POSICIONAMENTO RELATIVO COM GPS NA REGIÃO BRASILEIRA: ESTUDO DE CASO PARA 29 DE OUTUBRO DE 2003. Revista Brasileira de Cartografia, Nº 63/5, p. 575-587, 2011. Disponível em: <[www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/download/408/397](http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/download/408/397)>. Acesso em: 13/05/2013.

HARTMANN, Gelvam Andre. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: Causas e Efeitos. 2005. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14132/tde-24072006-230811/>>. Acesso em: 2013-05-21.

O. J. PEREIRA; A. A. LEITHOLD; Correntes Geomagneticamente Induzidas. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/deposito/geomagnetismo>>. Acesso em 18/05/2013.

O. J. PEREIRA; A. A. LEITHOLD; Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/anomaliamagneticaatlanticosul2/>>. Acesso em: 21/05/2013.

SZCZUPAK, J. ; PINTO, L. M. V. G. ; L.H.MACEDO ; DRUMMOND, M. H. . Um Novo Olhar Sobre a Segurança do Sistema Elétrico. In: IEEE Transmission and Distribution in Latin America, 2004, S.Paulo. Anais do 2004 IEEE TDLA. S. Paulo: IEEE, 2004. Disponível em: <<http://www.mantenimentomundial.com/sites/mm/notas/olhar.pdf>>. Acesso em: 21/05/2013

MOLINSKI, T. S.; FEERO, W. E.; DAMSKY, B. L.; “Shielding Grids from Solar Storms”, IEEE Spectrum, November 2000, [pp 55-60]. Disponível em: <<http://thayer.dartmouth.edu/spacescience/wl/res/ae/biblio/molinski00.pdf>>. Acesso em: 21/05/13.

SOHO Mission. Disponível em: <[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/soho/](http://www.nasa.gov/mission_pages/soho/)>. Acesso em: 21/05/2013.

Representação, com base no dia 21 de maio de 2013, do fluxo de raio-X registrados pelo sistema GOES. Disponível em: <[http://www.swpc.noaa.gov/rt\\_plots/xray\\_5m.html](http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/xray_5m.html)>. Acesso em: 21/05/2013.

Solar Storm Near Earth Caused by Fast CME. Disponível em: <[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/News031513-cme.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News031513-cme.html)>. Acesso em 22/05/2013.

Three X-class Flares in 24 Hours. Disponível em:  
<[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/News051213-flare.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/News051213-flare.html)>.  
Acesso em: 22/05/2013.

PHILLIPS, T. Solar Cycle Update: Twin Peaks?, 2013. Disponível em:  
<[http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/01mar\\_twinpeaks/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/01mar_twinpeaks/)>.  
Acesso em: 20/05/2013.

Fenômeno solar causa blackout de rádio. Disponível em:  
<[http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=3283](http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=3283)>. Acesso em:  
29/05/2013.

Cientistas avaliam consequências das tempestades solares. Disponível em:  
<<http://ultimosegundo.ig.com.br/ciencia/2013-03-30/cientistas-avaliam-consequencias-das-tempestades-solares.html>>. Acesso em: 29/05/2013.

Geomagnetic Storms: Na Evaluation of Risks and Risk Assessments, 2011. DHS Office of Risk Management and Analysis. Disponível em:  
<<http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/rma-geomagnetic-storms.pdf>>. Acesso em:  
05/06/2013.