

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FABIANA DA CUNHA LAGOAS**

**FILTRO MORFOLÓGICO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS  
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.**

**ALEGRETE  
2014**

**FABIANA DA CUNHA LAGOAS**

**FILTRO MORFOLÓGICO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS  
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheira Eletricista, do Curso de Engenharia Elétrica do Campus Alegrete da Fundação Universidade Federal do Pampa, área de Sistema elétrico de Potência.

Orientador: Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos.

**ALEGRETE  
2014**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

L118f Lagoas, Fabiana da Cunha  
FILTRO MORFOLÓGICO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES  
GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA. / Fabiana da Cunha Lagoas.  
63 p.  
  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2014.  
"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".  
  
1. Correntes Geomagnéticamente Induzidas. I. Título.

FABIANA DA CUNHA LAGOAS

**FILTRO MORFOLÓGICO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES  
GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito  
parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 18, agosto de  
2014.

Banca examinadora:



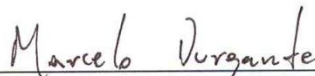
Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos

Orientador  
UNIPAMPA



Prof. Dr. Felipe Denardin

UNIPAMPA



Prof. Bel. Marcelo Durgante

UNIPAMPA

*Dedico este trabalho, com muito amor aos meus pais, aos meus irmãos e a minha avó, que são o suporte da minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me abençoar com esta oportunidade.

Aos meus pais, Nelson e Vera, por me ensinarem, através de bons exemplos, como ser uma pessoa de bom coração, de caráter e guerreira, por sempre me apoiarem tanto sentimentalmente e psicologicamente como financeiramente em todos os momentos. E também, por entenderem minha ausência em vários momentos de nossas vidas. A minha avó, Maria de Lourdes, que sempre me ensinou a ser uma pessoa digna e honesta.

Aos meus irmãos Francisco e minha irmã Fernanda, por deixarem cada momento em família mais feliz. Meu amigo e irmão Marco Antônio por sempre ser um bom exemplo.

Aos meus colegas e amigos do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência- GESEP, em especial: Jackson Gabe, Willian Deliberalli, Criciele Castro e Marcel Stalter pelo suporte e companheirismo nas horas de desespero acadêmico. Aos meus colegas de graduação Haiglan Plotzki e Nathalie Lunardi por sempre estarem dispostos a me ajudar, muito obrigada.

Às minhas amigas Cristina Carvalho Nunes, Caroline Waschburger, Carla Campagnolo, Susy Ataide e Fernanda Cazabonet pela amizade verdadeira, compreensão, apoio e alegria de viver.

Ao professor, Me. Eduardo Machado dos Santos, pela dedicação, orientação, amizade e por acreditar e desenvolver um potencial que nem mesmo eu sonhara em ter.

Aos professores da Engenharia Elétrica que trabalham com dedicação à docência.

À toda a equipe do Campus Alegrete, por compreender a jornada de estudos dentro da Universidade e auxiliar nos mais diversos aspectos.

Agradeço a todos que acreditaram, torceram e sonharam este sonho junto comigo.

*“A diferença entre os homens não está na ferramenta que utilizam, mas no propósito do que constroem quando as usam.”*

***Thaso Cordova da Cunha, meu Vô***

## RESUMO

Correntes geomagneticamente induzidas (GICs) são ocasionadas por partículas ionizadas, provenientes de explosões solares, que interagem com o campo magnético terrestre, produzindo correntes espelho na superfície do planeta, que fluem através de caminhos paralelos, como ferrovias, sistemas de comunicação, tubulações metálicas e linhas de transmissão. Normalmente, essas correntes se apresentam como componentes quase contínuas de baixa frequência (inferiores a 1 Hz). Quando essas correntes interagem com os sistemas elétricos de potência, podem provocar sobrecarga nos equipamentos e linhas de transmissão, causando o desligamento de grandes trechos do sistema elétrico e, conseqüentemente, interrupções no fornecimento de energia. No Brasil, as concessionárias são severamente multadas pelos órgãos reguladores quando há ocorrência de um desligamento não programado que não seja causado por uma falta permanente. Os dispositivos de proteção, os quais são os responsáveis por manter a continuidade do serviço, eliminando curtos-circuitos transitórios e permanentes, além de atuarem para condições anormais de carregamento, são desprovidos de funções capazes de detectar as GICs, as quais comprometem a vida útil de alguns equipamentos. Este trabalho propõe um filtro morfológico para aplicação em relés digitais, capaz de identificar a ocorrência de correntes geomagneticamente induzidas em linhas de transmissão e nos demais equipamentos do sistema elétrico, que sejam monitorados por esses dispositivos. Tal metodologia, foi implementada em Matlab<sup>®</sup> e testada a partir do processamento de sinais de corrente, gerados computacionalmente pela simulação de um sistema teste no software EMTP-ATP<sup>®</sup>. Os resultados obtidos comprovam a eficácia do filtro na detecção das GICs em tempo real para todos os casos analisados. Por fim, a metodologia proposta pode auxiliar as empresas do setor elétrico na possível identificação de GICs como causas de desligamentos não programados passíveis de multa pelos órgãos regulamentadores. Assim, através do filtro proposto, espera-se melhorar o desempenho de relés para que não atuem indevidamente pela presença de GICs, além de auxiliar as concessionárias de energia na identificação de causas para eventuais desligamentos não programados.



**Palavras-chave: Correntes geomagneticamente induzidas, detecção, sistemas elétricos de potência, filtro morfológico, proteção.**

## ABSTRACT

Geomagnetically induced currents (GICs) are caused by ionized particles from solar flares, which interact with Earth's magnetic field, producing mirror currents in the surface of the planet, which flow through parallel paths, such as railways, communications systems, metal pipes and transmission lines. Typically, these currents are presented as almost continuous low frequency components (below 1 Hz). When these currents interact with the power system it can cause overloading of equipment and transmission lines, causing the shutdown of large parts of the electrical system and therefore disruptions in the power supply. In Brazil, the electric companies are severely fined by regulators when there is an occurrence of an unplanned outage that is not caused by a permanent fault. Protection devices, which are responsible for maintaining the continuity of service, by eliminating transient and permanent short circuits, and act to abnormal loading conditions, are devoid of functions capable the detecting GICs, which impair the useful life some equipment. This paper proposes a morphological filter for application in digital relays, able to identify the occurrence of geomagnetically induced currents in power transmission lines and other equipment in the electrical system, which are monitored by these devices. Such methodology has been implemented and tested in Matlab, processing signals computationally generated by the simulation of a test system in the EMTP-ATP® software. The results obtained confirm the effectiveness of the filter in the detection of GICs in real time for all the analyzed cases. Finally, the proposed methodology can assist electric companies as a possible identification tool of GICs as a cause of unplanned shutdowns subject to fines by regulatory agencies. Thus, through the proposed filter, it is expected to improve the performance of relays to not act improperly by the presence of GICs, as well to assist the electric companies to identify possible causes for unplanned outages.

**Keywords: Geomagnetically Induced Currents, Detection, Electric Power System, Morphological Filter, Protection.**

## **LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS**

GIC – Corrente Geomagneticamente induzidas

SEP – Sistema elétrico de potência

AGAS – Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de potencial.

DST – Disturbance Storm Time

KP – Planetarische Kennziffer.

SE – Elementos estruturais.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Justificativa. ....	16
1.2 Objetivos do Trabalho. ....	17
1.2.1 Objetivo geral. ....	17
1.2.2 Objetivos específicos. ....	17
1.3 Estrutura do Trabalho.....	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Explosões solares. ....	18
2.1.1 Auroras.....	20
2.2 Geomagnetismo.....	22
2.2.1 História do magnetismo.....	22
2.2.2 Campo magnético terrestre .....	23
2.2.3 Campo interno.....	24
2.2.4 Cinturões de Van Allen. ....	27
2.3 Proteções do Sistema elétrico de potência.....	30
2.3.1 Panorama geral da proteção de um sistema. ....	32
2.4 Corrente geomagneticamente induzidas. ....	34
2.4.1 Índices geomagnéticos.....	36
2.4.2 Corrente geomagneticamente induzidas e suas conseqüências no sistema elétrico de potência. ....	36
2.4.3 Correntes geomagneticamente induzidas no Brasil.....	40
2.5 Morfologia matemática. ....	43
2.5.1 Operadores morfológicos básicos. ....	43
<b>3 FILTRO MORFOLOGICO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS.....</b>	<b>44</b>
3.1 Filtro Desenvolvido.....	44
<b>4 RESULTADOS E discussões. ....</b>	<b>47</b>
4.1 Considerações Gerais.....	47
4.2 Sistema teste .....	47

4.3 Considerações Iniciais. ....	48
4.4 Banco de dados. ....	49
4.5 Análises dos resultados obtidos. ....	49
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>59</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	60
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades solares são fenômenos magnéticos de grandes proporções que podem causar imensas descargas de partículas ionizadas. Essas partículas, quando ejetadas em direção à Terra, normalmente, com velocidades em torno de 450 km/s, levam poucas horas para chegar ao planeta, causando as chamadas tempestades solares. O campo magnético da Terra funciona como uma barreira para essas partículas, evitando que as mesmas atinjam a superfície do planeta. Entretanto, as cargas das partículas ionizadas em movimento formam correntes elétricas em altas altitudes (além da atmosfera), que provocam alterações no campo magnético, além de induzir correntes na superfície terrestre e em caminhos paralelos como cabos telefônicos, dutos metálicos, vias férreas e linhas de transmissão (PINTO *et. al*, 2003).

Essas correntes apresentam-se como componentes quase contínuas de frequência inferior a 1Hz e afetam significativamente o funcionamento de sistemas de comunicação, de satélites e de sistemas elétricos de potência. Além disso, são conhecidas como correntes geomagneticamente induzidas ou GICs (do inglês *Geomagnetic Induced Currents*). O fenômeno das GICs é amplamente estudado no hemisfério Norte (Moore, 2003 e Molinski *et. al*, 2000), onde, comprovadamente, já provocou grandes blackouts (KAPENMAN *et. al*, 1997).

A magnetosfera, que é a região correspondente ao campo magnético terrestre, como referido anteriormente, funciona como uma barreira para partículas ionizadas vindas do espaço sideral, sejam estas provenientes do sol ou não (RUSSELI *et. al*, 1997). No entanto, ela não é completa e nem uniforme, sofrendo variações que acompanham o dia e a noite, além de ter maior intensidade nas proximidades dos

pólos magnéticos da Terra. O campo magnético se enfraquece nas regiões próximas ao Equador (baixas latitudes), formando os chamados “*Cinturões de Van-Allen*”.

No hemisfério Sul, engenheiros eletricitas costumam trabalhar com a idéia de que o planeta é mais vulnerável à atividade solar em regiões de alta latitude, onde o campo magnético terrestre tem maior intensidade. Segundo essa visão, somente tempestades solares de grandes proporções atingiriam as latitudes mais baixas, enquanto que as fracas e moderadas, as quais são mais freqüentes, atingiriam as latitudes mais altas. Entretanto, existe uma anomalia geomagnética sobre a América do Sul, a qual distorce a magnetosfera de modo que o Brasil encontra-se parcialmente vulnerável ao fenômeno das GICs.

Na região compreendida pela Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (South Atlantic Geomagnetic Anomaly, SAGA), conhecida no Brasil como AGAS, os cinturões de Van Allen aproximam-se da Terra, reduzindo a espessura da magnetosfera. Dessa forma, quase todo o território nacional encontra-se sujeito à ocorrência de correntes geomagneticamente induzidas. Essa deformidade no campo magnético da Terra.

Do ponto de vista dos sistemas elétricos de potência, sabe-se que as linhas de transmissão longas, no sentido da latitude (horizontais), sobre rochas ígneas, estão mais sujeitas a ocorrência de GICs. A literatura especializada apresenta modelos para os efeitos mais conhecidos provocados por essas correntes em sistemas de potência. No sistema elétrico, as GICs penetram pelo solo, isto é, pelos aterramentos. Essas correntes são aproximadas por pulsos de corrente quase contínua em sistemas semelhantes.

Sabe-se que as GICs provocam saturação do núcleo de transformadores de potência, o que provoca a distorção dos sinais de corrente e tensão nesse dispositivo. Isto pode levar a atuação dos relés de proteção, além de provocar o aquecimento do núcleo e dos enrolamentos do transformador, danificando seus isolamentos. Um transformador com isolamento prejudicado pode causar incêndios e explosões.

Além disso, um transformador com núcleo saturado consome reativos, causando quedas de tensão, o que, em casos extremos, pode levar o sistema a um colapso de tensão.

Também, vale ressaltar que transformadores de potencial e de corrente estão sujeitos aos mesmos efeitos que os transformadores de potência. Ainda, as GICs podem provocar sobrecarga em bancos de capacitores além de prejudicar os níveis de potências ativa e reativa produzidas por geradores síncronos, devido às distorções nos sinais que alimentam os reguladores de tensão, os quais controlam essas máquinas. Além disso, linhas de transmissão podem ter seu carregamento máximo violado, o que pode prejudicar os isolamentos da mesma e a qualidade da energia transmitida. Estes são apenas alguns exemplos do quanto as correntes geomagneticamente induzidas podem ser prejudiciais para os sistemas elétricos de potência.

### **1.1 Justificativa.**

Tendo em vista o crescente interesse dos fabricantes de relés digitais em lógicas de proteção cada vez mais confiáveis e precisas, frente às diversas situações as quais o sistema elétrico de potência está sujeito, torna-se imprescindível a contribuição com novas metodologias, cada vez mais robustas, que possam contribuir para uma melhora significativa no desempenho do sistema elétrico e no fornecimento contínuo de energia elétrica.

Além disso, a atuação indevida dos relés de proteção para situações que envolvam correntes geomagneticamente induzidas justificam a realização do presente trabalho, o qual visa propor uma nova técnica para detecção de um pulso dessas correntes. Também, considerando a severidade dos órgãos regulatórios do setor elétrico para com as concessionárias de energia, quando da ocorrência de desligamentos não programados e não justificados, faz-se necessária a implementação de uma ferramenta robusta para identificação das causas desses desligamentos.

Logo, este trabalho propõe uma metodologia eficaz e de fácil implementação e para estudos futuros a implementação desta em relés digitais micro processados, os quais ocupam uma parcela cada vez mais importante dentro dos sistemas de proteção, além da elaboração de um programa eficiente para auxiliar as concessionárias de energia na determinação das causas de desligamentos não programados e na elaboração de defesas contra as punições recebidas dos órgãos reguladores.



## **1.2 Objetivos do Trabalho.**

### **1.2.1 Objetivo geral.**

Este trabalho teve como objetivo iniciar um estudo nunca desenvolvido na Universidade Federal do Pampa e desenvolver uma metodologia capaz de detectar as correntes geomagneticamente induzidas.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

Desenvolvimento do filtro morfológico para detectar um pulso dessas correntes em linhas de transmissão, para utilização e implementação em relés digitais de proteção. Detectando de forma rápida e precisa a presença destas correntes no sistema elétrico de potência.

## **1.3 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em 5 capítulos, separados em introdução, fundamentação teórica, simulação, análise de resultados e conclusão.

No primeiro capítulo foram feitas a contextualização e justificativa sobre a escolha do tema, os objetivos gerais e específicos de todo o trabalho.

No segundo capítulo, é feita a fundamentação teórica, a qual foi subdividida em seções. A seção 1 aborda o estudo das explosões solares, a seção 2 aborda o geomagnetismo. Além disso, na seção 3, são mencionados tópicos sobre a proteção do sistema elétrico de potência. A seção 4 aborda de fato as correntes geomagneticamente induzidas e seus efeitos sobre os sistemas elétricos e, finalmente, na seção 5 apresentam conceitos da morfologia matemática, cujos operadores constituem a base dessa proposta.

No terceiro capítulo, descreve-se o filtro morfológico proposto para a detecção das correntes geomagneticamente induzidas.

No quarto capítulo são descritos os sistemas teste e os parâmetros de simulação, além da apresentação dos resultados obtidos pela metodologia proposta.

No quinto e último capítulo, foram feitas conclusões, citando os resultados mais significativos e também as ideias para trabalhos futuros relacionados ao mesmo tema.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados temas como ocorrência das explosões solares e do geomagnetismo, com enfoque em uma abordagem mais direcionada à área de proteção do sistema elétrico de potência. Também, são conceituadas as correntes geomagneticamente induzidas e os operadores da morfologia matemática.

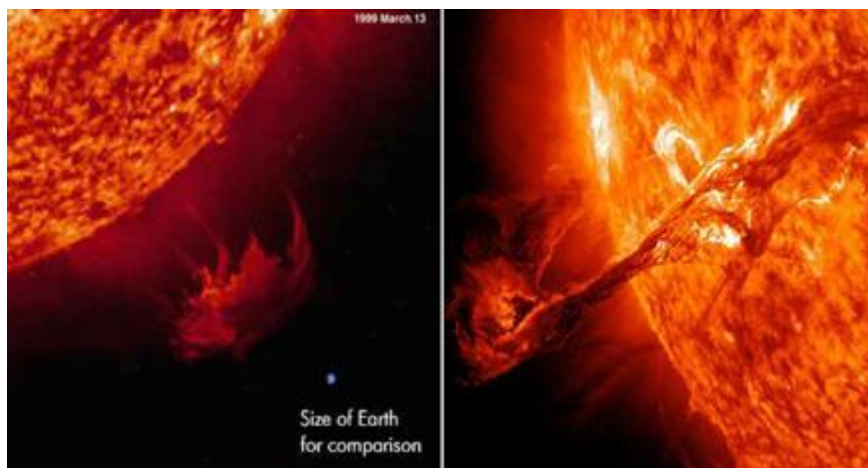
### 2.1 Explosões solares.

As tempestades magnéticas, decorrentes das explosões solares, são conhecidas por interferir em sistemas de energia elétrica, provocando desde pequenas perturbações até grandes interrupções. Em um caso extremo, por exemplo, em 1989 uma perturbação geomagnética derrubou toda a rede elétrica Hydro-Québec, deixando seis milhões de clientes na província canadense sem energia elétrica por nove horas. Esse evento afetou também as usinas no Nordeste dos Estados Unidos.

As manchas solares, ou tempestades solares, são basicamente linhas do campo magnético, conhecidas como *loopings* do sol (figura 1). Sua aparência muitas vezes está associada com a descarga de grandes quantidades de matéria, chamadas de ejeções de massa coronal, que consiste principalmente de hidrogênio e hélio ionizado. As explosões, com cerca de um milhão de graus Celsius na superfície do Sol, formam uma nuvem que é chamada de vento solar, ou seja, íons e partículas subatômicas se movendo em direção à Terra. Esses ventos solares movem-se a, aproximadamente, 450 km/s. A interação dessas partículas com a magnetosfera da Terra, formam as auroras vistas periodicamente nas regiões polares, além de provocar as chamadas Correntes Geomagneticamente induzidas.

O ciclo solar completo consiste em dois meio-períodos de 11 anos cada, demarcados por reversões de polaridade do sol. Durante um semi-ciclo, as manchas solares estão em alinhamento com o campo magnético da terra, no outro, elas são antiparalelas. Picos de tempestades ocorrem no meio dos semi-ciclos e são mais graves durante os períodos ímpares de 11 anos, possivelmente porque o alinhamento das manchas solares se opõem ao campo da Terra (MOORE, 2003).

**Figura 1- Explosões solares.**



**Fonte: Moore (2003).**

Como visto em 1989, perturbações geomagnéticas podem ser desastrosas, bem como belíssimas, como, por exemplo, quando da ocorrência das auroras. Além disso, as correntes de alta altitude, ocorridas na magnetosfera, induzem correntes nos aterramento, bem como nos caminhos paralelos à superfície terrestre, como linhas telefônicas, linhas de tubulação, estradas de ferro e linhas de transmissão. Por sua vez, estas perturbações geomagnéticas afetam sistemas de rádio comunicação, operações de satélites e redes de energia elétrica.

Então, quão bem preparados são esses sistemas para lidar com este tipo de perturbação após o início dos estudos a cerca da ocorrência desses fenômenos? O quadro é complexo e misto. Certamente, uma infra-estrutura muito mais elaborada, com base no espaço para a emissão de um aviso de tempestades solares, existe hoje e alguns progressos foram feitos no desenvolvimento para avaliar a sua intensidade. Mesmo com o tempo de aviso sendo curto, próximo a meia-hora, muito pode ser feito.

Os sistemas de energia, conseqüentemente, são mais vulneráveis às perturbações solares. A vulnerabilidade à atividade solar está ligada as latitudes geográficas, tornando os países que se encontram próximos aos pólos e abaixo de anomalias da magnetosfera mais susceptíveis à ocorrência de GICs. (RUSSELLI, 1997)

### **2.1.1 Auroras**

As auroras são acontecimentos naturais que fascinam o ser humano desde a pré-história. Entretanto, foi somente em 1770 que o Capitão James Cook, um navegador inglês, denominou que a aurora boreal, ou seja, aquela que acontece no Hemisfério Norte, tem a sua contraparte no Hemisfério Sul, chamada de aurora austral. Após estudos mais aprofundados, foi observado que as auroras não estavam localizadas exatamente nos pólos geográficos, ocorrendo mais freqüentemente próximas a latitudes de 70°.

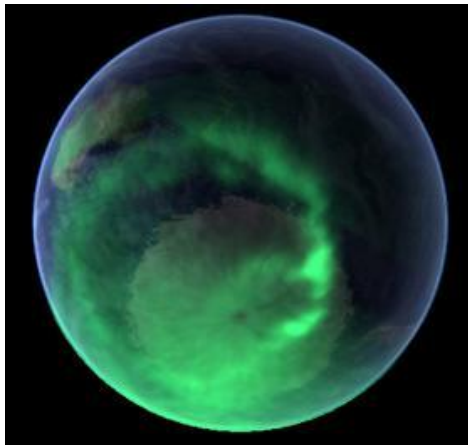
As auroras são causadas pela precipitação das partículas carregadas, elétrons e prótons, que seguem as linhas do campo magnético da magnetosfera até a atmosfera. Há uma interação entre essas partículas energizadas provenientes do Sol com os átomos neutros presentes em nossa atmosfera. Tais partículas energizadas, podem excitar as partículas neutras através de colisões, nas quais a energia é absorvida pelos átomos neutros. Esses átomos energizados não conseguem se manter estáveis nesses estados mais excitados por muito tempo. Átomos e moléculas energizadas emitem fótons (luz) quando retornam aos seus estados energéticos iniciais, formando as luzes das auroras.

No Ano Internacional Geofísico (1957-58), cientistas de diferentes nacionalidades do mundo juntaram seus esforços para registrar as auroras de vários locais, ao mesmo tempo. Mais de 100 câmeras foram ajustadas para visualizar as auroras. Da análise destes dados, nasceram dois importantes conceitos da física das auroras: “aurora oval” e “aurora de sub-tempestade”.

No transcorrer desta época, os cientistas definiram que as auroras são geradas pela existência do campo magnético da Terra e que as formas das auroras são centradas nos pólos geomagnéticos e não nos pólos geográficos. Então, a forma mais usual de caracterizar as auroras é pelo sistema de coordenadas

geomagnéticas: as auroras estão localizadas em latitudes magnéticas de cerca de  $75^\circ$  no lado do dia e em cerca de  $70^\circ$  no lado da noite da Terra. A forma oval das auroras tem um raio típico de 1500-2000 km, comparável a distância entre as cidades do Rio de Janeiro e Salvador (aproximadamente 1650 km). A sua extensão latitudinal varia entre 200 e 1000 km. As auroras tendem a ser mais luminosas em mais altas latitudes e próximo à meia-noite na hora local.

**Figura 2 – Aurora austral.**



**Fonte: Nasa (2013)**

O Sol expete constantemente partículas em todas as direções no espaço. As partículas que rumam para o nosso planeta interagem com o campo magnético terrestre, sendo tiradas de sua trajetória original pelo efeito da Força de Lorentz .

O campo serve como um escudo, defletindo essas partículas carregadas provenientes do Sol. A maioria dessas partículas é refletida de volta ao espaço, porém, algumas delas ficam “presas” em nosso campo magnético, gerando as auroras. Ao ficarem presas, elas tem uma tendência a seguir uma trajetória espiralada ao longo das linhas de campo, em direção aos polos magnéticos.

Monitorando a atividade do ciclo solar 24 horas e medindo a velocidade das partículas do vento solar, é possível prever a intensidade e localização de uma aurora. Esta é uma ferramenta muito útil para interessados em auroras e turistas que estão na região.

## 2.2 Geomagnetismo

### 2.2.1 História do magnetismo

Os estudos pelo magnetismo iniciaram-se com a observação das propriedades de atração magnética do mineral *lodestone*, uma forma de ocorrência da magnetita. Não é possível determinar em qual época que tais observações foram feitas, pois não há um registro preciso. Sabe-se que os filósofos gregos já haviam escrito sobre a magnetita no ano 800 a.C., e os chineses já conheciam suas propriedades por volta do ano 300 a.C.. Aproximadamente no século V a.C., os chineses já sabiam que a agulha da bússola não apontava exatamente para o norte geográfico. À esta diferença entre o meridiano magnético e o meridiano geográfico chamamos declinação.

Os estudos começaram com a carta escrita pelo soldado Pierre Pélerin de Maricourt, pseudônimo de Petrus Peregrinus, intitulada como Epistola de Magnete e foi considerado o primeiro estudo registrado de física experimental. Nela são descritas leis simples sobre atração magnética, obtidas a partir do experimento realizado com uma esfera esculpida em magnetita. Com a esfera flutuando na água sobre uma tábua e fixando finas lâminas de ferro na superfície da esfera, Petrus traçou as linhas de direção que o ferro assumia, observando que elas circundavam a esfera e convergiam para dois pontos antipodais aos quais chamou de pólos magnéticos, em analogia aos pólos geográficos.

Posteriormente, no século XIV os navios da marinha britânica já estavam equipados com instrumentos de navegação usados em conjunto com a astronomia. Com a evolução da navegação, tornou-se evidente que a declinação variava com a posição no globo. Entre os séculos XV e XIV, período das grandes navegações, estabeleceram-se valores de declinação para o mundo todo. No fim do século XVI, Mercator reconheceu que a declinação era o principal fator de erro nos mapas contemporâneos.

Em 1544, analisou-se que uma agulha magnetizada assumia uma direção não-paralela em relação à vertical, este ângulo de desvio é chamado de inclinação. Este estudo foi feito por um religioso alemão chamado Georg Hartmann.

Devido ao crescente interesse pelo magnetismo e geomagnetismo, De Magnete foi publicado em 1600, por William Gilbert, um importante trabalho, considerado o primeiro tratado científico mais próximo dos modelos atuais. O referido documento se trata da reunião de todo o conhecimento científico que havia até a época, incluindo resultados de pesquisas do próprio Gilbert. Assim como Petrus Peregrinus, Gilbert utilizou pequenas agulhas magnéticas dispostas na superfície de uma esfera de magnetita para estudar o campo magnético da esfera. Desta forma, reconheceu os pólos, onde as agulhas ficavam perpendiculares à superfície da esfera, e o equador, onde estas permaneciam tangentes.

A implementação de um programa de colaboração científica internacional foi um importante passo nas pesquisas do geomagnetismo, organizado por Carl Friedrich Gauss, promovendo a padronização de instrumentos e métodos de medida e observação, além de reunir os dados de todos os observatórios geomagnéticos. (GEOMAGNETISMO, 2012)

## **2.2.2 Campo magnético terrestre**

A Terra comporta-se como um grande ímã, o qual produz suas linhas de campo. A estas linhas de campo dá-se o nome de campo magnético terrestres, conseqüentemente, lembrando um dipolo magnético, com estes polos magnéticos próximos aos polos geográficos. Este comportamento foi descoberto em 1600 por William Gilbert.

A teoria do dínamo é a mais aceita para explicar a origem do campo que, de forma genérica, estende-se infinitamente, afirmando assim que o campo magnético vai se tornando mais fraco com o aumento da distância da sua fonte. Para melhor ilustrar o funcionamento do campo utiliza-se a figura 3, a qual mostra o campo magnético da Terra circulando e atravessando toda superfície de maneira razoavelmente uniforme, lembrando assim um dipolo.

Os geofísicos não aceitam esta convenção do ímã, onde as linhas de força saem do sul geográfico para o norte geográfico. Na realidade, não há um ímã no núcleo terrestre e sim um fluído.

**Figura 3 - Representação do campo magnético dipolar.**



Fonte: Física (2013)

### **2.2.3 Campo interno**

Ao estudar o núcleo externo constatou-se que existe um fluido eletricamente condutor composto principalmente de ferro (Fe) e níquel (Ni) com uma alta condutividade elétrica ( $\sigma = 5 \times 10^5$  S/m). Este fluido está em constante movimento, induzindo correntes elétricas.

Essa corrente elétrica interfere no campo magnético original. Portanto, a ideia básica do dínamo é que o campo magnético inicial é alterado por interações com o movimento do fluido condutor, de tal forma que o campo magnético original é modificado. Se não houvesse o movimento do fluido, o campo magnético da Terra se dissolveria lentamente ao longo do tempo e não haveria indução. Qualquer movimentação do fluido condutor em relação ao campo magnético pré-existente induzirá correntes elétricas no condutor podendo em alguns casos regenerar constantemente o campo magnético na região (BAUER, 2012).

#### **2.2.3.1 Campo externo ou magnetosfera**

Pode-se afirmar que o campo magnético terrestre tem origem no núcleo externo da Terra onde interações geológicas do magma, composto de Ferro e Níquel, causam dois movimentos predominantes. O primeiro, vertical, é provocado



pelo gradiente de temperatura existente na camada do núcleo externo, fazendo a massa líquida subir e se resfriar, ocorrendo assim um adensamento e, por consequência a massa desce, gerando assim um movimento cíclico; o segundo, é um movimento horizontal, que se origina da rotação da Terra (força de Coriolis), apresentando movimentos cíclicos (SABOIA,2011).

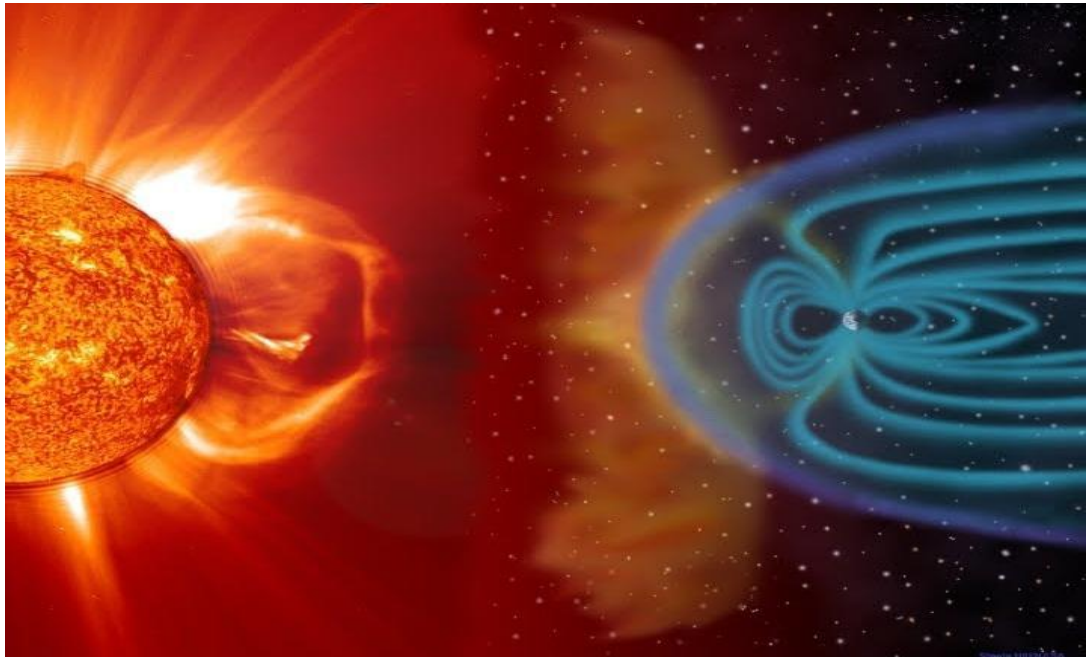
O sistema fluido compõe um conjunto de correntes térmicas no meio níquel-ferro (correntes de convecção térmicas) com uma tendência maior de giro no sentido de rotação da Terra, integrando uma corrente efetiva que dá origem ao campo magnético terrestre e sua magnetosfera.

A magnetosfera terrestre estende-se em cerca de 500 km de altitude e possui uma forma assimétrica: comprimida no lado do Sol (lado do dia) devido à pressão exercida pelo vento solar, e alongada no lado oposto (lado da noite) que não sofre esta pressão (figura 4).

O vento solar, apresentado na sessão explosões solares, além de partículas ionizadas, também traz consigo campos magnéticos que interagem com o campo magnético da Terra e que podem chegar até Netuno e Plutão. Partículas carregadas e campos magnéticos acabam influenciando e interagindo uns aos outros. As partículas carregadas possuem energia na faixa de poucos milhares de elétron-volts e campos magnéticos na ordem de dezenas de nano teslas que ocupam o espaço entre as atmosferas superiores do Sol e da Terra. As interações dos campos magnéticos originados do Sol e da Terra estruturam o geoespaço por centenas de raios da Terra, direcionando e contendo partículas carregadas, também de origens solar e terrestre.

A continuidade e severidade do vento solar expandem a atmosfera externa do Sol. Este campo de origem solar é chamado de campo magnético interplanetário (em inglês: *Interplanetary Magnetic Field- IMF*), sendo inconstante próxima a Terra e possuindo uma intensidade de cerca de 5 nT. Com a rotação do Sol, o campo magnético é gerado e toma uma forma espiral.

**Figura 4 - Linhas de campo e sua deforma, após uma explosão solar.**



**Fonte: Física (2014)**

### **2.2.3.2 Ionosfera**

Quando se aproxima um pouco mais da Terra, existe uma região chamada de ionosfera, onde o “íon” é um átomo ou grupo de átomos que se carrega pela perda ou ganho de um ou mais elétrons de carga negativa. A “esfera” está relacionada à forma esférica da terra. A ionosfera reflete, retarda, dispersa e absorve ondas de rádio, dependendo da frequência desta onda. Esse tipo de comunicação é possível pela utilização da ionosfera e reflexão dessas ondas em frequências abaixo de, aproximadamente, entre 3 e 30 MHz (100 a 10 m de comprimento de onda).

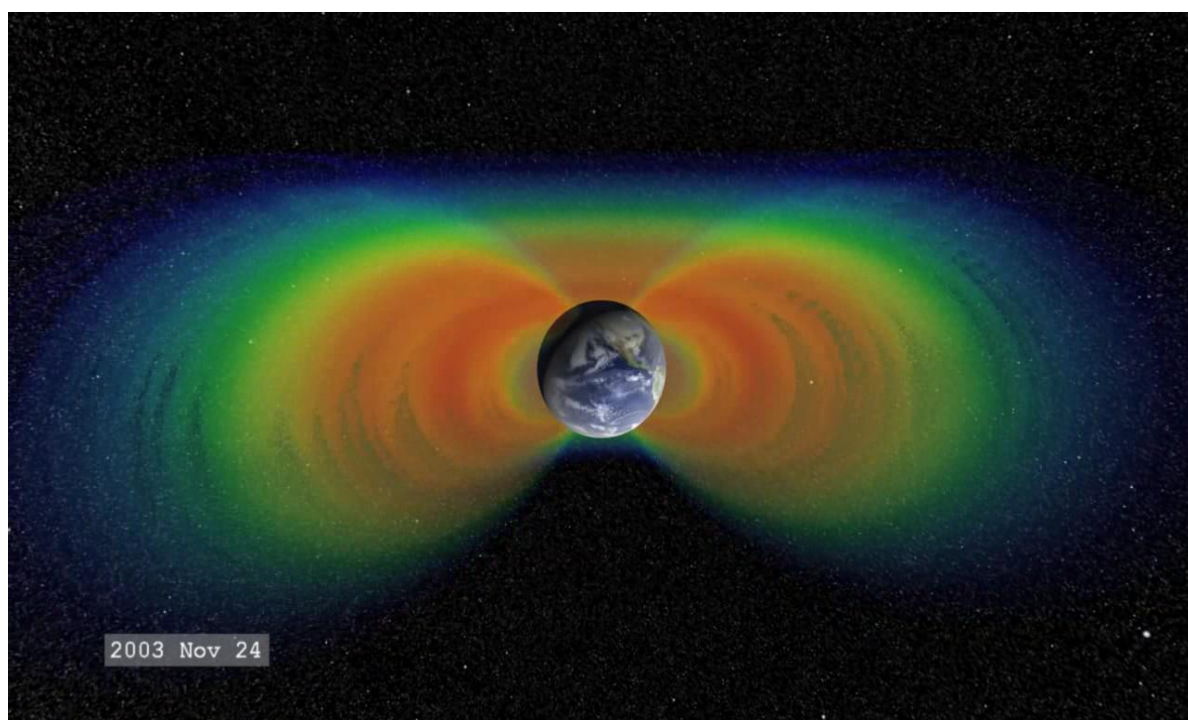
A ionosfera depende da variação entre produção e remoção da ionização da camada da atmosfera superior. A atmosfera terrestre se torna menos densa e muda a sua composição com a altitude. Com isso a radiação solar encontra poucos átomos para ionizar. Já próximo a superfície, a atmosfera é tão densa que há pouca radiação solar sobrando que não foi absorvida nas altas latitudes. Nesta camada, encontramos os cinturões de Van Allen. (BAUER, 2012.)

#### 2.2.4 Cinturões de Van Allen.

A primeira missão da sonda americana “Explorer 1” foi lançada com o objetivo de executar um experimento de raios cósmicos que foi elaborado por um cientista americano, James Van Allen e seus estudantes de graduação.

Dados do “Explorer 1” e “Explorer 3” (lançado em março de 1958) foram analisados e estudados, o que resultou em uma grande descoberta: a existência de uma região com formato de rosca com partículas carregadas que foram aprisionadas pelo campo magnético terrestre. Esta região foi batizada com o nome de “Cinturão de Van Allen”, em homenagem ao seu descobridor.

**Figura 5 - Cinturão de Van Allen.**



**Fonte: Física (2014)**

Nos cinturões de Van Allen existem dois anéis (Figura 5): observações mostram que o anel interno contém uma quantidade estável de prótons e elétrons. Já o anel externo é composto principalmente de elétrons e varia consideravelmente. A região interna está a cerca de 3 km acima da superfície da Terra e com uma espessura de 5 km. Já a região externa está entre 15 e 20 km acima da superfície terrestre e possui uma espessura que varia entre 6 e 10 km.

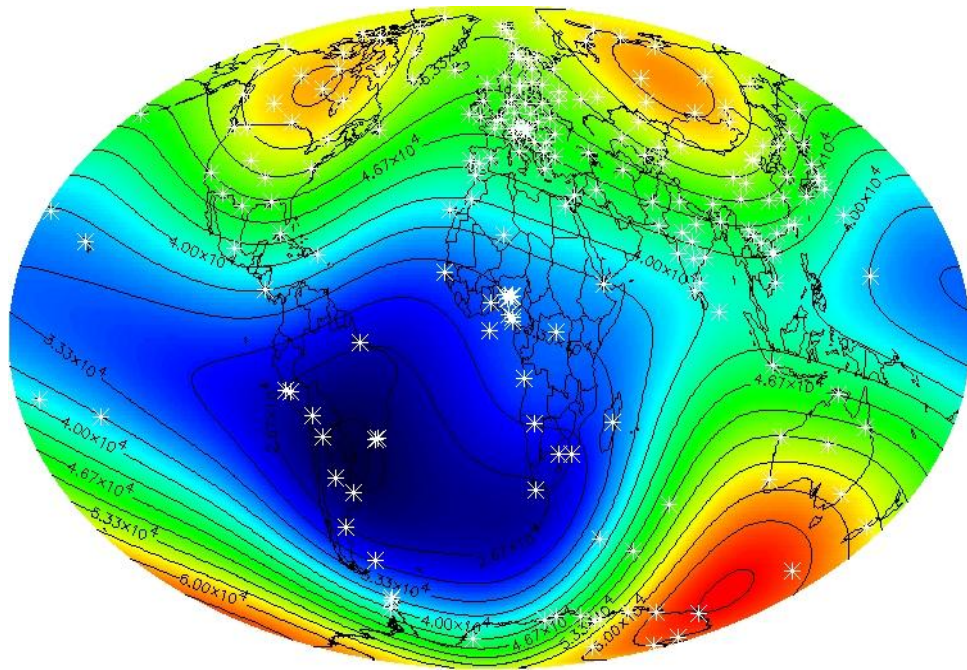
Alguns dos elétrons do anel externo podem ser acelerados. Esses elétrons podem provocar danos aos satélites artificiais, já que provocam descargas elétricas internas na eletrônica desses satélites. Essas descargas podem perturbar ou danificar permanentemente qualquer satélite que atravesse pelos cinturões, podendo afetar a transmissão de sinais de TV e telefone, sinal de GPS e navegação por rádio. Esse ambiente espacial de intensa radiação é também perigoso para os astronautas.

Durante uma tempestade magnética, a quantidade de elétrons pode aumentar cerca de mil vezes. A atividade solar intensa pode também empurrar o cinturão externo aproximando-o da Terra, fazendo com que satélites de baixas altitudes sejam submetidos a um ambiente espacial muito severo. Uma melhor compreensão sobre os processos de geração desses elétrons é de grande importância prática e acadêmica.

#### **2.2.4.1 Anomalia do Atlântico Sul**

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul, designada pelas siglas AMAS ou SAA (do inglês: South Atlantic Anomaly) se localiza na parte mais interna do cinturão de Van Allen, e é a parte mais próxima da superfície terrestre. Isto resulta no fato de que, para uma dada altitude, a intensidade de radiação é mais alta nesta região do que em qualquer outra. Pode-se observar que na figura 6 existem diferentes tonalidades de azul, estas indicam uma menor "blindagem" propiciada pelo campo magnético da Terra (CARDOSO, 1982). As análises e estudos das variações de ruído em diversas frequências realizadas no município de Paula Freitas- Paraná, no Campus de Pesquisas Geofísicas Major Edsel de Freitas Coutinho, comprovam que o nível de ruído tem uma variação significativa na região da anomalia, e acredita-se que isto é de consequência do campo magnético menor que o esperado para a região. Trabalhos de pesquisas estão monitorando este nível de ruído e comparando-o com dados provenientes dos satélites GOES, que mede as partículas cósmicas que chegam do Sol.

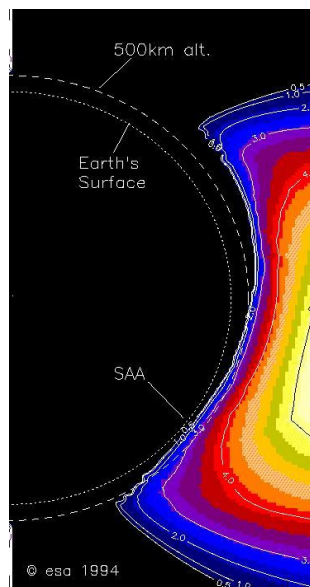
**Figura 6 - Zonas da Anomalia do Atlântico Sul.**



**Fonte: Nasa (2014).**

Na figura 7 podemos visualizar a deficiência do campo magnético sobre a América Latina, mais precisamente sobre o Brasil.

**Figura 7 - Corte da Anomalia sobre o Brasil.**



**Fonte: Nasa (2014).**

A AMAS é produzida por um afundamento no campo magnético terrestre na região onde está localizada. Presume-se que é causada pelo fato do centro do campo estar deslocado em relação ao centro geográfico por 450 km



aproximadamente (COUTINHO,1974). Como mencionado anteriormente, o campo magnético terrestre tem origem no núcleo externo da Terra.

A AMAS afeta satélites e facilita a ocorrência de correntes geomagneticamente induzidas. As espaçonaves e satélites que passam periodicamente pela região, de acordo com (CARDOSO, 1982), “ficam expostos durante vários minutos às fortes radiações que ali existem.”. A *International Space Station*, orbitando com inclinação de 51.6°, necessita de revestimento especial para suportar as fortes radiações oriundas do Sol, o *Space Telescope Hubble* tem limitadas as observações durante sua passagem sobre o Sul do Brasil. A AMAS sofre um deslocamento para oeste, sua velocidade é 0.3° por ano. A taxa de deslocamento é muito próxima da rotação diferencial entre o núcleo da Terra e sua superfície, estimada entre 0.3° e 0.5° por ano.

### **2.3 Proteções do Sistema elétrico de potência**

Na manipulação do sistema elétrico de potencia (SEP) acontecem, com certa frequência, falhas nos seus componentes que resultam em interrupções no fornecimento de energia aos consumidores conectados a esses sistemas, como consequência, tem-se a redução da qualidade do serviço prestado.

De acordo com Mamede Filho e Mamede (2011) a falha mais comum em qualquer SEP é o curto-circuito, que origina correntes elevadas, as quais circulam em todos os elementos energizados. O resultado dessas correntes provocam severos distúrbios de tensão ao longo de todo o sistema elétrico, ocasionando, muitas vezes, danos irreparáveis ao sistema e as instalações das unidades consumidoras. Além deste, existem outros fenômenos, não menos severos, que podem ocorrer nos sistemas elétricos, tais como: a sobrecarga, sub e sobretensão, sendo estas originadas por descargas atmosféricas, interferências geomagnéticas e manobras.

A principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo o trecho do sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos.

Dentre as funções de um sistema de proteção, as principais são:

- Salvar a integridade física de operadores, usuários do sistema e animais;
- Evitar ou minimizar danos materiais;
- Retirar de serviço um equipamento ou parte do sistema que se apresente defeituoso;
- Melhorar a continuidade do serviço;
- Diminuir despesas com manutenção corretiva;
- Melhorar os índices DEC (duração de interrupção equivalente por consumidor) e FEC (frequência de interrupção equivalente por consumidor).

Em geral a filosofia de proteção consiste em dividir o sistema elétrico em setores supervisionados por relés, disjuntores, Transformadores de corrente (TC's) e Transformadores de potencial (TP's), de modo a minimizar o número de componentes desligados por uma condição de falta. O estudo de implementação da proteção de um sistema leva em consideração os seguintes aspectos:

- *Econômico*: hoje, por exemplo, novos sistemas de proteção são implementados, utilizando relés microprocessados, porém, devidos a fatores econômicos, os equipamentos eletromecânicos e estáticos que estão em funcionamento são mantidos;
- *Propagação do defeito*: a proteção deve evitar que o defeito possa atingir outros equipamentos da rede, causando danos a estes ou interferindo na operação normal do sistema;
- *Tempo de inoperância*: a proteção deve minimizar o tempo da indisponibilidade do fornecimento de energia.

De modo geral, a atuação de um sistema de proteção se dá em três níveis que são conhecidos como principal, de retaguarda (socorro) e auxiliar:

**Proteção principal**: Em caso de falta dentro da zona protegida, esta deverá atuar primeiro.

**Proteção de retaguarda:** é aquela que só deverá atuar quando ocorrer falha da proteção principal.

**Proteção auxiliar:** é constituída por funções auxiliares das proteções principal e de retaguarda, cujos os objetivos são a sinalização, alarme, temporização, entre outros.

Os relés de proteção são os principais equipamentos de proteção dos sistemas elétricos, sendo responsáveis pela retirada rápida do elemento (equipamento, barra ou seção de linha) quando este está em curto-circuito ou em condição anormal de funcionamento, além do suportado, impedindo que o problema se propague para outros elementos do sistema. Os relés devem também informar a devida localização da falta com o objetivo da rápida manutenção do elemento causador, permitindo, portanto, o rápido religamento. É importante também que haja o registro de informações do relé, como grandezas analógicas e digitais, possibilitando a análise da falta e da atuação da proteção usada.

### **2.3.1 Panorama geral da proteção de um sistema.**

No instante que ocorre um defeito (falha ou falta) a continuidade da distribuição de energia depende muito da correta atuação dos dispositivos de proteção existentes. No decorrer do tempo e da necessidade de robustez do SEP, houve uma demanda maior pela fabricação de relés e de esquemas de proteção destinados às partes e equipamentos das instalações elétricas, quase esgotando novas ou melhores possibilidades. Entre as proteções mais usuais, encontramos nos sistemas de potência, destacam-se:

#### **2.3.1.1 Proteção de geradores**

Os dispositivos de proteção usuais podem ser diferenciados de duas formas:

- Medidas preventivas e dispositivos de proteção contra os defeitos exteriores ao gerador: relés térmicos (49); relés de sobrecorrente (50/51); relés de sobretensão (59); relés sensíveis a corrente de seqüência negativa, para proteção contra funcionamento sob carga assimétrica, ou desequilibrada (46); relés de potência inversa, para impedir o funcionamento do gerador como motor (32), etc.



- Proteção contra os defeitos internos dos mesmos: proteção diferencial (87), contra os curtos-circuitos entre elementos de enrolamentos de fases diferentes; proteção contra os defeitos à massa do estator; proteção contra os defeitos à massa do rotor; proteção contra os curtos-circuitos entre espiras da mesma fase; proteção contra a abertura acidental ou não dos circuitos de excitação.

Os dispositivos citados atuam juntamente com outros dispositivos não constituídos por meio de relés, tais como os pára-raios, indicadores de circulação de óleo, termostatos, etc.

Além disso, há ainda que se considerar outros dispositivos que, não sendo relés, estão intimamente ligados a proteção do gerador como os dispositivos de rápida desexcitação, que evitam uma destruição maior dos enrolamentos devido à própria tensão e a proteção contra incêndio, que atua na extinção do fogo iniciado devido aos arcos voltaicos dos defeitos internos.

#### **2.3.1.2 Proteção de transformadores**

Para os transformadores de grande porte, faz-se uso das seguintes proteções: Proteção diferencial, proteção de gás, proteção térmica, proteção contra baixo nível de óleo, entre outras. Para transformadores de pequeno e médio porte, utilizados em sistemas de distribuição, a proteção é feita basicamente através de elos fusíveis.

#### **2.3.1.3 Proteção de barramento**

É feita a partir da proteção diferencial para defeitos nas barras, independentemente do arranjo de barras escolhido.

#### **2.3.1.4 Proteção de linha**

Feita principalmente a partir de relés de distância (21), os quais monitoram a impedância das linhas, através do processamento dos sinais de tensão e corrente. Quando o valor de impedância torna-se menor do que um valor de ajuste, o relé de distância opera. Também, pode ser feita através de relés de sobrecorrente (50/51), monitorados por relés direcionais (67) para a proteção de sistemas em anel. Para

estes relés, a atuação ocorre quando a corrente assume magnitudes superiores aos valores de ajuste.

## **2.4 Corrente geomagneticamente induzidas.**

Corrente geomagneticamente induzidas de acordo com (PINTO, 2003) são “as cargas das partículas ionizadas em movimento formando correntes elétricas de alta altitude, que se fazem acompanhar de severas alterações do campo magnético”. No entanto podemos colocar com outras palavras de acordo com R. Pirjola pode dizer que:

“Quando o campo magnético da Terra captura partículas ionizadas transportadas pelo vento solar, correntes geomagneticamente induzidas (GIC) podem fluir através do sistema de energia, entrando e saindo dos muitos pontos de aterramento em uma rede de transmissão. GICs são produzidos quando os choques resultantes de tempestades repentinas e graves estão próximos da superfície da Terra criando flutuações no campo magnético. Estas flutuações induzem campos elétricos na Terra que criam diferenças de potencial de tensão entre os pontos de aterramento - o que faz com que GICs possam fluir através de transformadores, linhas de sistemas de potência e aterramento pontos.” (PIRJOLA, 2000.)

Durante as tempestades geomagnéticas não só a magnitude de campo magnético terrestre é relativamente grande em comparação com dias normais, mas também a sua taxa de variação. As tempestades causam variações do campo magnético de 1000 a 2000 nT e assim formando as auroras em latitudes próximas dos pólos. No entanto são muito menores, em torno de 200 a 300 nT, em latitudes equatoriais e médias. Estas GIC's são substancialmente maiores quando a taxa de variação do campo magnético for mais intensa, pois a superfície da terra tem uma alta resistividade elétrica.

Em casos de extremos as GICs causam problemas em redes de transmissão de energia, oleodutos e gasodutos, além de prejudicar sistemas de telecomunicações e até em equipamentos ferroviários. De acordo com (FELLOW, 2012) “os transformadores podem ser saturados devido a GIC, resultando em efeitos nocivos e, possivelmente, até mesmo ao colapso de todo o sistema”. Ainda, MUSTAFA (2013) afirma que:

“Estas correntes alteram os sistemas de operação dos transformadores, produzindo ruídos mecânicos, aquecimento e aumento das distorções harmônicas. Conseqüentemente, com o aparecimento destas harmônicas há uma falha no funcionamento do sistema de proteção de banco de capacitores.” (MUSTAFA; 2013)

No caso de linhas de transmissão de energia, o campo elétrico induzido produz correntes que fluem através dos sistemas de aterramento de transformadores em subestações elétricas, separadas por centenas de quilômetros. Estas correntes que fluem através dos transformadores e linhas de transmissão podem causar diferentes tipos de danos, além de afetar muitos sistemas tecnológicos em grandes áreas simultaneamente e, portanto, trazer graves problemas sociais e prejuízos econômicos. No fluxograma abaixo podemos verificar os passos para o surgimento destas correntes o sistema elétrico de potência. (figura 8).

Portanto, os transformadores e demais componentes do sistema elétrico podem ser danificados, o que, eventualmente, provoca uma interrupção no fornecimento de energia, causando um blecaute. Para avaliar esse fenômeno, são usadas medições do campo magnético, os quais são obtidos através de magnetômetros instalados em diferentes pontos da terra. Assim, estas perturbações geomagnéticas podem ser quantificadas e caracterizadas por valores médios, e classificados de acordo com as suas intensidades. As GICs têm sido estudadas, principalmente, em regiões de latitude alta do hemisfério norte, onde estudos comprovando a ocorrência de GICs em linhas de transmissão e em transformadores são recorrentes, tanto para acontecimentos em regiões de latitudes baixas, médias e altas.

**Figura 8 - Fluxograma das correntes geomagneticamente induzidas.**



**Fonte: Autoria própria**

### 2.4.1 Índices geomagnéticos.

Para avaliar o grau de correlação entre os números de eventos e a atividades geomagnéticas, são utilizados dados de proteção e dois índices geomagnéticos:

- Dst (Disturbance Storm Time): mede a intensidade da tempestade solar por hora , a partir dos dados médios de estações próximas a linha do equador.
- Kp (Planetarische Kennziffer ): que indica o grau de perturbação do campo geomagnético global, esse índice é obtidas por meio de observações feitas em 13 observatórios distribuídas em torno da terra , e tendo valores de 0 a 9. (PIRJOLA, 2000).

Tabela 1 - Classificação dos distúrbios de tempestade.

Dst Index	
<b>Tempestade fraca</b>	$-50 \leq Dst \leq -30 \text{ nT}$
<b>Tempestade moderada</b>	$-100 \leq Dst \leq -50 \text{ nT}$
<b>Tempestade severa</b>	$-150 \leq Dst \leq -100 \text{ nT}$
<b>Tempestade severa I</b>	$-300 \leq Ds t \leq -150 \text{ nT}$
<b>Tempestade severa II</b>	$Dst \leq -300 \text{ nT}$

Tabela 2 - Classificação do índice planetário.

Kp Index	
<b>Extremo</b>	$8 \leq Kp \leq 9$
<b>Severa</b>	$7 \leq Kp \leq 8$
<b>Forte</b>	$6 \leq Kp \leq 7$
<b>Moderada</b>	$5 \leq Kp \leq 6$
<b>Fraca</b>	$Kp \leq 5$

### 2.4.2 Corrente geomagneticamente induzidas e suas conseqüências no sistema elétrico de potência.

O princípio físico do fluxo de GIC num sistema elétrico de potência pode ser facilmente compreendido baseando-se na lei de indução de Faraday: um campo magnético variante induz correntes nos condutores. Para expressá-lo de forma mais precisa, a lei de Faraday implica a existência de um campo elétrico durante uma

variação temporal do campo geomagnético. Este campo elétrico, em seguida, direciona todas correntes para o sistema.

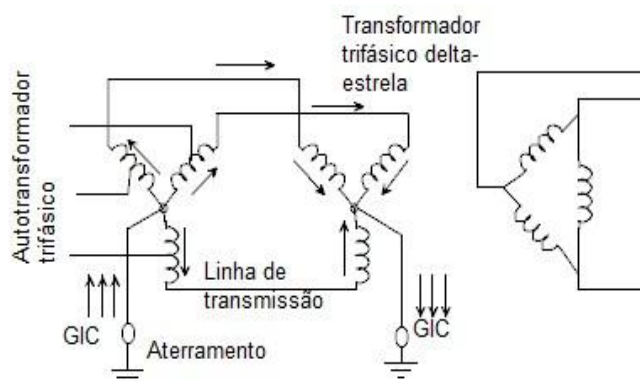
Observando a figura 8, nota-se que as correntes geomagneticamente induzidas (GIC) são causadas pela atividade solar. Conseqüentemente, um fluxo de entrada e saída na rede elétrica flui através de vários pontos do solo.

A força motriz é a tensão induzida nas próprias linhas de transmissão, tanto pela corrente ionosférica e pela corrente à terra. Embora a GIC fique flutuando, ela pode ser classificada como uma corrente quase contínua de valores que podem variar de 100 a 200 Ampères, já caracterizam-se por pulsos com frequências menores ou iguais a 1 Hz, que perduram por períodos que variam de acordo com a intensidade da atividade solar.

Em relação ao período de duração, as GICs, na maioria dos casos, duram de 1 a 5 segundos, havendo registros da ocorrência de GICs com duração de 30 segundos e até com meia hora de atividade.

Na configuração apresentada na figura 9, a corrente geomagneticamente induzida (GIC) flui da terra para o aterramento de um autotransformador trifásico, onde se divide uniformemente em cada fase do transformador. Em seguida, ela passa para as linhas de transmissão e os fluxos para outros transformadores, devolvendo-lhes a terra. Nota-se que um autotransformador - aquele em que os enrolamentos são compartilhados - facilitam a passagem de GIC's, enquanto um transformador delta-estrela não.

**Figura 9 - Exemplo de como funciona o sistema elétrico de potência interligado, com presença de GIC's.**



**Fonte: autoria própria.**

Com a existência destas variações de fluxo de GICs no sistemas elétrico, as proteções podem ser enganadas, ou seja, os relés podem atuar indevidamente sob a influência da sobrecarga imposta pela corrente geomagneticamente induzida.

As principais proteções a serem acionadas são os relés direcionais, de sobrecorrente e os relés de distância. Por exemplo, a linha de transmissão Santa Maria- Alegrete de 138 kV utiliza um sistema de teleproteção do tipo bloco, ou seja, proteções primárias e secundárias com relé direcional de sobrecorrente de neutro (67N) e relés de distância (21), que funcionam perfeitamente para os principais tipos de faltas (MUSTAFA, 2013). No entanto, um significativo problema nessa linha é o número relativamente elevado das interrupções forçadas, provavelmente causadas pela ação de GICs, interpretadas pelos dispositivos de proteção como sendo faltas fase-terra, provocando a atuação do esquema de proteção primário e do dispositivo de religamento automático. Assim, várias ações foram realizadas pela concessionária responsável, mas nenhuma obteve resultados significativos, determinando que a melhor ação é a prevenção contra a ocorrência das GICs. Os principais equipamentos prejudicados pela ação das GICs no sistema são:

#### **2.4.2.1 Transformadores de potência.**

Os transformadores de potência possuem um circuito magnético, o qual pode ser interrompido por uma GIC “quase” contínua. O campo produzido pelo pulso eletromagnético desloca o ponto de operação do circuito magnético. Assim, o transformador pode entrar em saturação. Isto produz harmônicas e elevação da temperatura, além de consumir potência reativa. Balancear uma rede em tais situações requer uma capacidade adicional significativa de potência reativa (ERINMEZ, 2002).

#### **2.4.2.2 Transformadores de corrente e de potencial.**

Pode ocorrer a chamada saturação em meio-ciclo, em que a corrente nos enrolamentos pode exceder a carga nominal dos transformadores, causando o mesmo efeito que o fluxo magnético, ocasionando aquecimentos excessivos e consequentes danos. A vida útil dos transformadores nas zonas onde há ocorrência de GIC's é menor do que o normal. A figura 10 apresenta um transformador de corrente danificado pela a ação das GICs.

**Figura 10 - Transformador com o núcleo danificado.**



**Fonte: Geological Survey's laboratory of Canada em Ottawa).**

#### **2.4.2.3 Banco de capacitares.**

Sofrem sobrecarga por serem susceptíveis à baixas impedâncias, ou seja, permitem a passagem de componentes harmônicas.

#### **2.4.2.4 Geradores.**

Os sinais distorcidos pela ação das GICs podem levar a variações das potências ativas e reativas, desbalanciamento de correntes e distorções harmônicas. O maior problema ocorre quando isto leva ao sobreaquecimento, principalmente, quando o aumento das correntes harmônicas pode exercer uma vibração nas turbinas. (PINTO, 2003)

#### **2.4.2.5 Linhas de transmissão.**

Um dos principais sistemas atingidos pelas GICs. Com a inserção de harmônicas pode haver variação da componente fundamental da tensão e isto leva a variação dos limites que a linha suporta. Isso pode provocar a atuação das proteções ou danificar os equipamentos conectados a linha de transmissão. (PIRJOLA, 2000)

#### **2.4.2.6 Linhas de transmissão por dutos subterrâneos.**

O perigo das GIC's nas linhas subterrâneas reside no potencial elétrico induzido entre a tubulação e o solo, aumentando a taxa da corrosão durante tempestades geomagnéticas. O risco das GIC's, neste caso, não é de falha catastrófica e sim a redução da vida útil do material ou de partes dele. (PIRJOLA, 2000)

#### **2.4.2.7 Sistemas interligados.**

Com a saturação de um transformador, ocorre o consumo elevado de reativos e o surgimento de harmônicas. Isso podem levar a sobrecarga dos bancos de capacitores, forçando assim o desligamento de sistemas interligados. Essa situação é gravíssima para o sistema elétrico, pois pode causar um colapso de tensão. (PINTO, 2003)

#### **2.4.3 Correntes geomagneticamente induzidas no Brasil.**

O Brasil e grande parte da América do Sul estão localizados na região da chamada Anomalia do Atlântico Sul ou SAA (do inglês: South Atlantic Anomaly). Assim, todos Estados do Sul do Brasil pertencem a esta área de anomalia, incluindo o estado do Rio Grande do Sul, onde há suspeitas que a atuação de algumas proteções podem estar relacionadas com GICs.

No Brasil, a monitoração dos dados climáticos e geomagnéticos é desenvolvida com base na análise de uma grande quantidade de dados definida pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Por sua vez, o clima no Estado do Rio Grande do Sul é considerado subtropical, com um comportamento bem definido com baixas temperaturas (12°C, em média) no invernos e verões quentes (32°C, em média), com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (CAMPBELL, 2002).

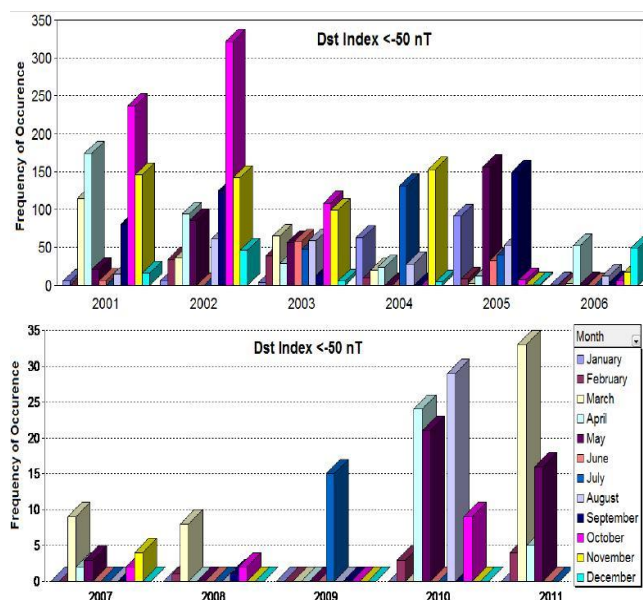
Segundo (MUSTAFA, 2013), foi observada a existência de duas razões para o acionamento destas proteções indevido das proteções nessa região: primeiro, foi considerado a falta de manutenção destes equipamentos por parte da concessionária, e, em segundo lugar, foram considerados possíveis eventos de natureza geomagnética.



Além disso, já foram constatadas GICs em São José (Furnas), Adrianópolis (Furnas), Magé (CERJ), Rio de Janeiro (capital), na nUsina nuclear de Angra dos Reis, a subestação de Ivaiporã, em Cabreúva (São Paulo) e grandes perturbações em grande parte das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, sendo estas mais detalhadas em PINTO (2003).

MUSTAFA (2013) demonstra como é feito o levantamento destes dados. Para os dados referentes a linha de transmissão Santa Maria – Alegrete, estas coletas foram feitas durante dez anos pelos engenheiros da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), do Rio Grande do Sul, e analisados pela Universidade de Blumenau – Santa Catarina. Nos primeiros cinco anos (2001-2005) a linha de transmissão Santa Maria – Alegrete de 138 kV demonstrou que o índice Dst foi significativo (figura 11), o que caracterizou uma intensa atividade geomagnética, em comparação com o número de eventos, ao contrário do que ocorreu nos últimos três anos (2009-2011), mostrando uma baixa atividade geomagnética

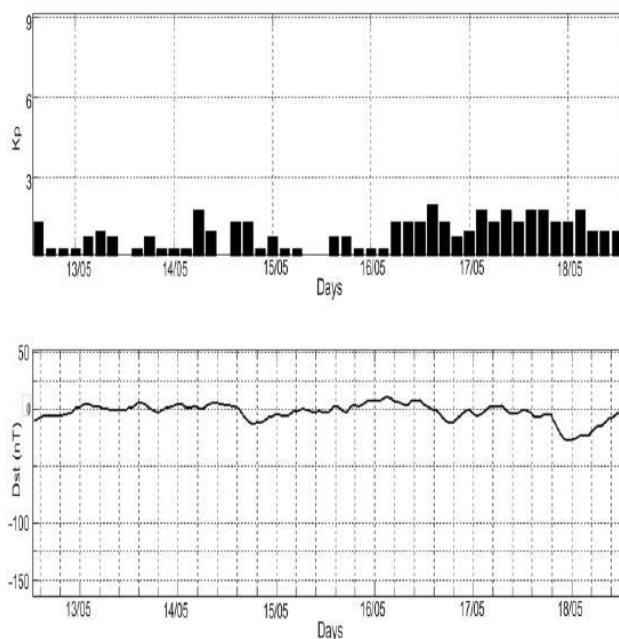
**Figura 11 - Frequência de ocorrência do fator Dst durante 2001-2011.**



**Fonte: Mustafa (2013).**

No outro índice geomagnético, Kp, para o período crítico em que houve muitas interrupções, classificou-se de acordo com o nível de distúrbio magnéticos causada pela atividade solar e do período em que houve maior acionamento da proteção. Isso pode ser visto na figura 12.

**Figura 12 - Comportamento dos índices geomagnético (Kp e Dst)**



**Fonte: Mustafa; 2013**

Na figura 12 mostra o comportamento dos índices geomagnéticos (Kp e DST) entre os dias 13 e 18 de maio de 2010, em que houve um grande número de eventos transitórios de acordo com o relatório técnico da CEEE. (FUCHS, 2011.).

Observou-se que nos gráficos que o índice máximo de Kp fica abaixo de 5. Isso quer dizer que as condições da ionosfera são mais tranquilas, enquanto que, acima deste valor, tempestades geomagnéticas podem ocorrer. Valores acima de 6 para esse índice são considerados críticos. Por outro lado, para o índice Dst, observou-se que os seus valores são muito abaixo de -50 nT, ocorrendo um valor em torno de -30 nT durante o dia 18 maio de 2010, confirmando a atividade geomagnética baixa para o período analisado (GIRGIS, 2012).

As análises realizadas, indicaram que durante o período observado para a linha de transmissão de Santa Maria - Alegrete 138 kV, localizada na região da SAA, existe uma relação com os índices que caracterizam o fenômeno. Apesar dos dados registrados, ainda não há a confirmação unânime da ocorrência de GIC, uma vez que apenas um pequeno período de alta atividade solar estava disponível. Entretanto, somente agora estes fatos estão sendo considerados pela ONS.

Com o aprofundamento deste assunto, pode-se desenvolver uma técnica apropriada para detectar a ocorrência deste tipo de fenômeno em sistemas de

potência, com base nos dados oscilográficos de tensão e corrente. Para tal, é necessário conhecer técnicas de processamento de sinais adequadas para este fim.

## **2.5 Morfologia matemática.**

A morfologia matemática é uma técnica amplamente difundida para o processamento de imagens. Wu (2008) propôs a aplicação desta metodologia ao processamento de sinais em sistemas elétricos de potência. Para cada tipo de aplicação, os operadores morfológicos foram modificados, com base nos comportamentos dos sinais em questão. Isso determinou a forma dos elementos estruturantes (SEs), os quais são aplicados nas comparações utilizadas pelos operadores morfológicos. A seção seguinte explica os operadores morfológicos utilizados na metodologia proposta no capítulo 3.

### **2.5.1 Operadores morfológicos básicos.**

Para o desenvolvimento da proposta foram utilizados dois operadores morfológicos básicos denominados dilatação e erosão, dados, respectivamente, pelas equações 1 e 2.

$$W \oplus SE = \max (W(n) + SE(n)) \text{ para } n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$W \ominus SE = \min (W(n) - SE(n)) \text{ para } n=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Nas equações 1 e 2,  $W$  representa o conjunto de  $N$  dados a ser comparado com o elemento estruturante (SE) de mesma dimensão. O operador dilatação extrai o valor máximo dentre as somas entre cada termo do conjunto  $W$  com o valor de mesma posição no conjunto SE. Por outro lado, o operador erosão retorna o valor mínimo dentre as subtrações entre cada termo do conjunto  $W$  e seu correspondente de mesma posição no elemento estruturante.

O algoritmo proposto utiliza a soma entre os valores de dilatação e erosão para cada janela  $W$  contendo um ciclo de amostras (por exemplo, uma janela de 16 amostras para uma amostragem de 16 amostras por ciclo). Mais informações a respeito da metodologia proposta são apresentadas no Capítulo seguinte.

### **3 FILTRO MORFOLOGICO PARA DETECÇÃO DE CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS**

O filtro proposto é inspirado na técnica proposta por Wu et. al (2008) para remoção da componente unidirecional exponencialmente decrescente (componente DC) das correntes de curto-circuito. Tal técnica utiliza os operadores Morfologia Matemática de erosão, dilatação, abertura e fechamento, amplamente utilizados em processamento de imagens e sinais. Tais operadores foram modificados para o processamento dos sinais de corrente da rede. Além disso, os autores utilizaram uma SE nula para a referida aplicação.

Uma vez que as GICs, por se tratarem de pulsos de corrente quase contínua, apresentam-se como offsets nas formas de onda dos sinais de corrente, é possível extrair a componente que provoca esta distorção com o auxílio da Morfologia Matemática. Neste Capítulo, é descrita a metodologia proposta para detecção de GICs, a qual utiliza operadores mais simples, sendo de fácil implementação e de grande precisão na detecção de GICs, conforme apontam os resultados mostrados no Capítulo seguinte.

#### **3.1 Filtro Desenvolvido.**

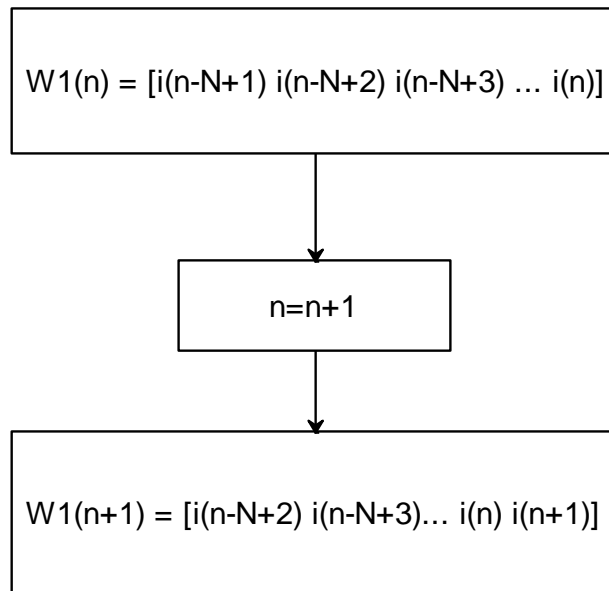
O filtro morfológico para detecção das correntes geomagneticamente induzidas utiliza operadores da morfologia matemática (WU, 2009), os quais auxiliam na detecção das anomalias causadas pelas GICs nas formas de onda dos sinais de corrente da rede.

O filtro processa uma janela contendo N amostras, onde N representa o número de amostras por ciclo, conforme a Equação (3).

$$W_1(n) = [x_0 \ x_1 \ x_2, \ x_3 \ \dots \ x_N] \quad (3)$$

Em (3),  $n$  representa a amostra atual. Essa janela é móvel e a cada nova amostra, o primeiro termo da janela ( $x_0$ ) é descartado e os demais são deslocados para a esquerda. Dessa forma, a amostra atual é alocada na última posição ( $x_N$ ). A atualização da janela de dados pode ser vista na Figura 13.

**Figura 13- Fluxograma da atualização de dados.**



**Fonte: autoria própria.**

Em cada janela, são aplicados os operadores morfológicos básicos de erosão e dilatação, modificados para este fim. Uma vez que a SE adotada para detecção de GICs é nula ( $SE = 0$ ), as Equações (1) e (2), expostas na Seção 2.5.1, tornam-se as expressões descritas nas Equações (4) e (5).

$$W(n) \oplus SE = \max(W(n)) \quad (4)$$

$$W(n) \ominus SE = \min(W(n)) \quad (5)$$

Com os resultados obtidos a partir das Equações (4) e (5), é feita a soma aritmética destes valores, o que resulta em  $Y(n)$ , dado conforme a Equação (6):

$$Y(n) = W(n) \oplus SE + W(n) \ominus SE \quad (6)$$

O valor de  $Y(n)$  representa a componente contínua que provoca o offset na forma de onda de corrente. Para evitar possíveis oscilações numéricas decorrentes da amostragem, os valores de  $Y(n)$  são alocados em uma janela móvel  $W_2(n)$ ,

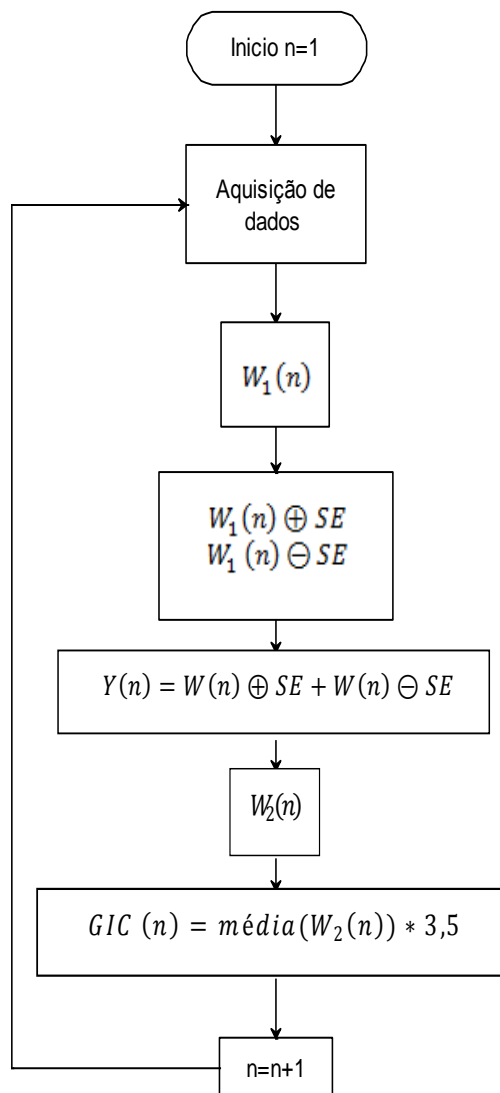
atualizada de forma similar ao ocorrido com  $W_1(n)$ . Para total remoção das oscilações, a janela  $W_2(n)$  tem comprimento igual a  $2N$ .

O valor da GIC é obtido a partir da Equação (7), onde o fator de proporção equivalente a 3,5 foi empiricamente obtido a partir da análise de várias condições de GICs num sistema teste (Capítulo 4), para diferentes taxas de amostragem (16, 32, 64 e 96).

$$GIC(n) = média(W(n)) * 3,5 \quad (7)$$

Esta metodologia foi implementada no Matlab® e apresenta excelente desempenho e precisão na detecção de GICs, conforme os resultados obtidos. A Figura 14 apresenta o fluxograma da metodologia proposta.

**Figura 14 - Fluxograma do algoritmo desenvolvido.**



**Fonte: autoria própria.**

## 4 RESULTADOS E DISCUÇÕES.

### 4.1 Considerações Gerais.

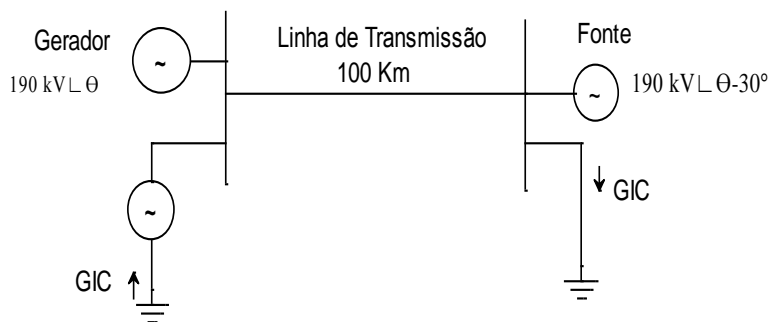
Neste capítulo, são apresentados os testes realizados envolvendo o filtro morfológico descrito no capítulo 3. O método desenvolvido foi testado por meio de simulação computacional, utilizando uma inserção de uma corrente contínua em uma linha de transmissão, à plena carga em condições normais de operação.

Durante o desenvolvimento deste estudo, verificou-se que a metodologia proposta os valores de corrente inseridos na rede com boa precisão.

### 4.2 Sistema teste

Foram feitos dois sistemas teste, compostos por uma linha de transmissão, uma fonte e uma carga. Cada sistema teste foi simulado de forma a se obter diferentes comportamentos das GICs. Tais sistemas foram simulados no EMTP-ATP, seguindo o sistema ilustrado na Figura 15.

**Figura 15 - Modelo para simulação de GIC.**



Fonte: autoria própria.

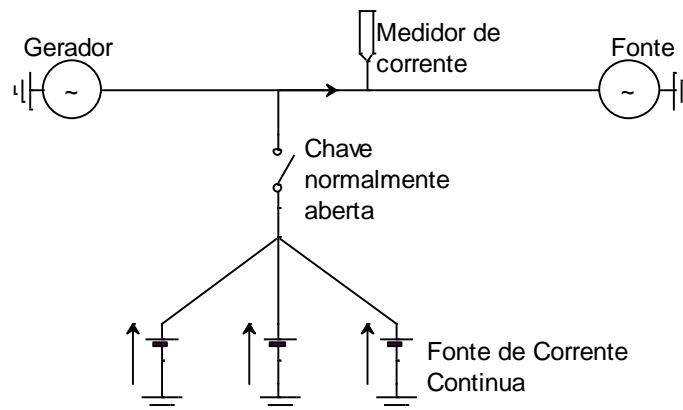
### 4.3 Considerações Iniciais.

O sistema teste elaborado opera com a frequência de 60 Hz. O gerador e a fonte são equivalentes, sendo a impedância de seqüência zero ( $Z_{S0}$ ) e de seqüência positiva ( $Z_{S1}$ ), respectivamente:  $3.681 + j24.515 \Omega$  e  $0.819 + j7.757 \Omega$ . O valor efetivo tensão na fonte e do gerador é de 190 kV, porém na fonte temos uma defasagem, em relação ao ângulo de fase, de  $30^\circ$ . O comprimento total da linha de transmissão é de 100 km e tem impedância de seqüência zero  $Z_{L0}=0.1841+j1.2258 \Omega/\text{Km}$  e seqüência positiva de  $Z_{L1}=0.041+j0.3878 \Omega/\text{km}$  (SANTOS, 2013)

#### Caso 1:

Para a primeira simulação, três fontes de corrente contínua foram conectadas a barra de geração, sendo uma para cada fase do sistema, seguindo os modelos propostos nas bibliografias estudadas. Cada fonte insere um pulso de corrente contínua nas linhas de transmissão. O tempo de atuação da GIC no sistema é controlado a partir de uma chave. Os sinais de corrente foram obtidos a partir do sistema ilustrado na figura 16.

Figura 16 - Primeiro sistema teste elaborado no software EMTP-ATP.



Fonte: Autoria própria.

#### Caso 2:

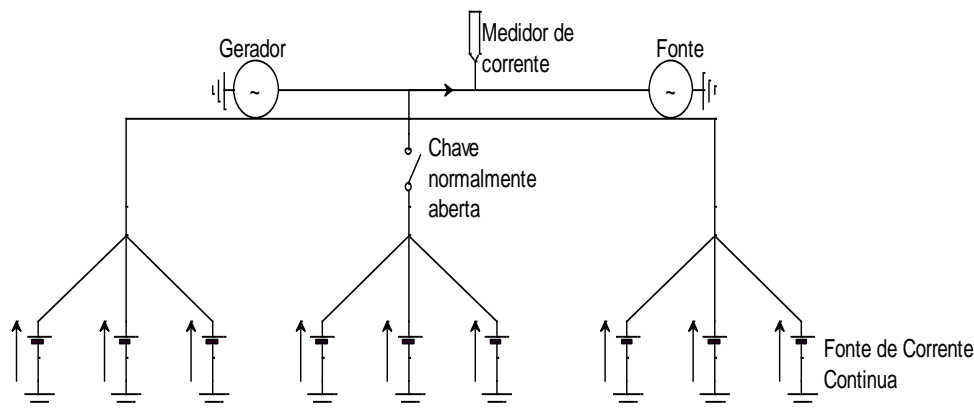
Para a elaboração do segundo caso, foi utilizado o modelo do artigo de Girgis (2012), no qual ocorre a inserção de GIC's com intensidades e durações diferentes.

Foi utilizado o mesmo circuito do caso 1 (figura 16), porém com três fontes CC, uma para cada fase, inserindo 100 ampères durante 10 segundos e outras 6 (3



para cada fase) com intensidade de 400 ampères e durações de 2 segundos cada (figura 17).

**Figura 17 -Segundo sistema teste elaborado no software EMTP- ATP.**



Fonte: autoria própria.

#### 4.4 Banco de dados.

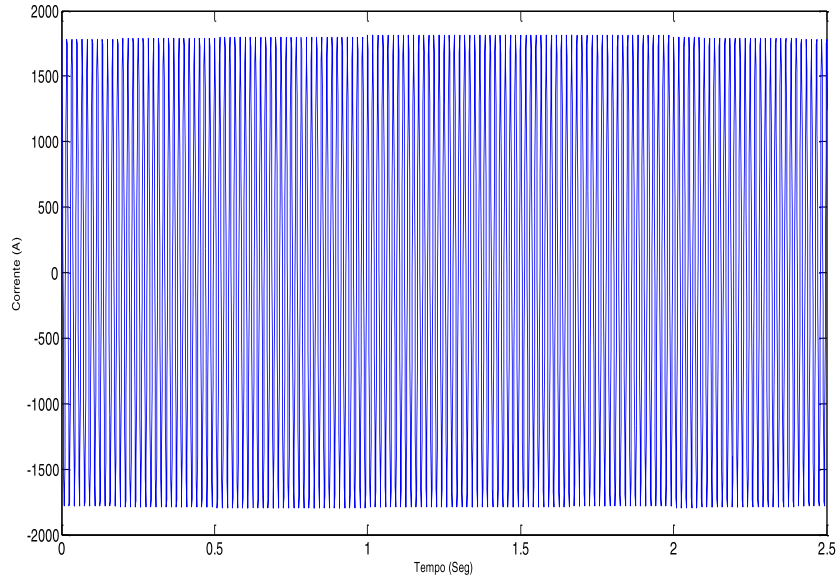
Para elaborar um banco de dados foi necessária a variação dos valores de corrente e tempo de duração dos pulsos CC. Os valores de corrente foram variados em 10, 100, 150, 190, 198 e 200 Ampères. A variação da durabilidade desta corrente ficou estabelecida entre 1 a 3 segundos. O banco de dados teve por objetivo a organização destas informações, de modo a armazená-las sistematicamente para que fosse rápida e de fácil a utilização no algoritmo do filtro proposto para detecção de GICs. Os valores de GIC utilizados foram escolhidos de acordo com as bibliografias atuais.

#### 4.5 Análises dos resultados obtidos.

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia desenvolvida no capítulo anterior. Os resultados a seguir, da figura 18 a 31 correspondem ao caso 1. A figura 32 corresponde ao caso 2. Estes resultados foram escolhidos por serem mais significativos para o estudo e permitem demonstrar a eficiência da metodologia desenvolvida neste trabalho.

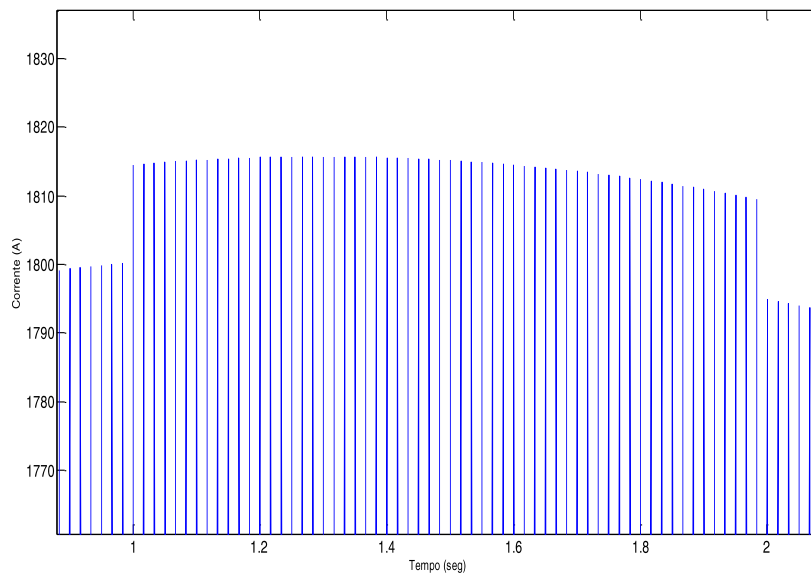
As figuras 18 e 20 correspondem ao caso 1. A figura 18 mostra o sinal de corrente gerado em EMTP-ATP, para 16 amostras por ciclo e com a influência de uma GIC de 100 A, com duração de 1 segundo.

**Figura 18 - Inserção de uma corrente de de 100 Ampères, duração de 1 segundos com 16 amostras por ciclo.**

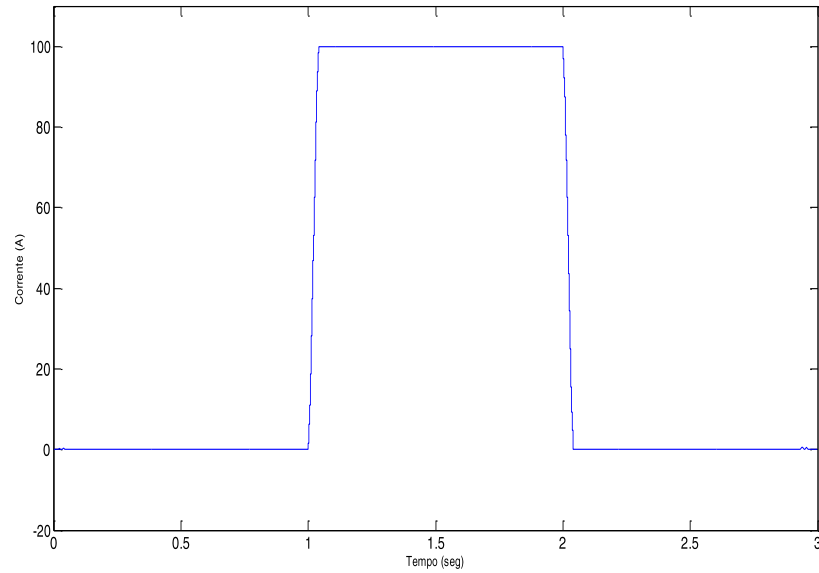


A figura 19 mostra um detalhe do offset causado pela GIC no sinal de corrente da figura 18. A deformidade do sinal se dá devido às condições iniciais do sistema, no instante em que o pulso é inserido, e o número de amostras por ciclo. Já a figura 20, mostra o valor na saída do filtro morfológico para detecção das GICs. Nota-se que o valor do sinal é bem aproximado ao valor do pulso de corrente inserido na simulação.

**Figura 19 - Detalhe da GIC de 100 Ampères duração de 1 segundos com 16 amostras por ciclo.**

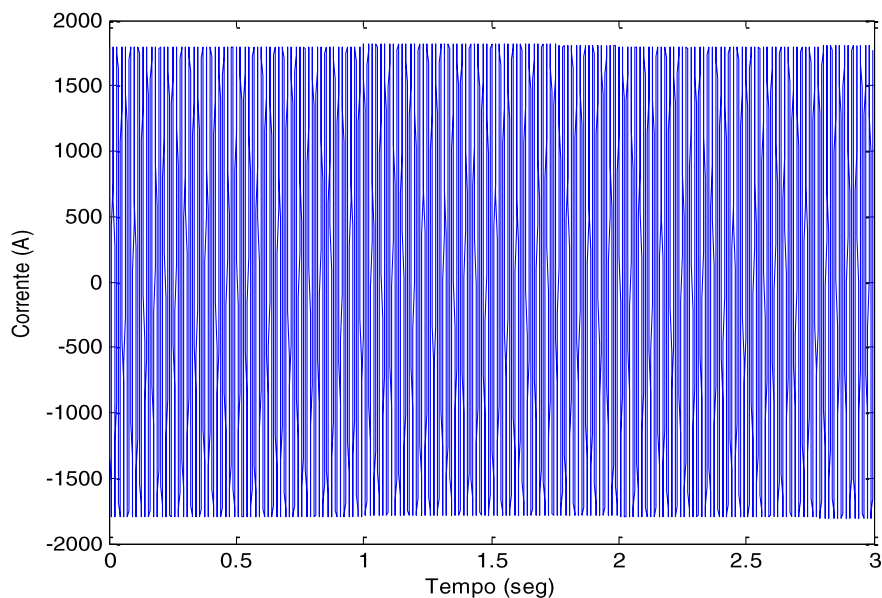


**Figura 20- Detecção do pulso de uma corrente de 100 ampères, duração de 1 segundo e decomposto em 16 amostras por ciclo.**

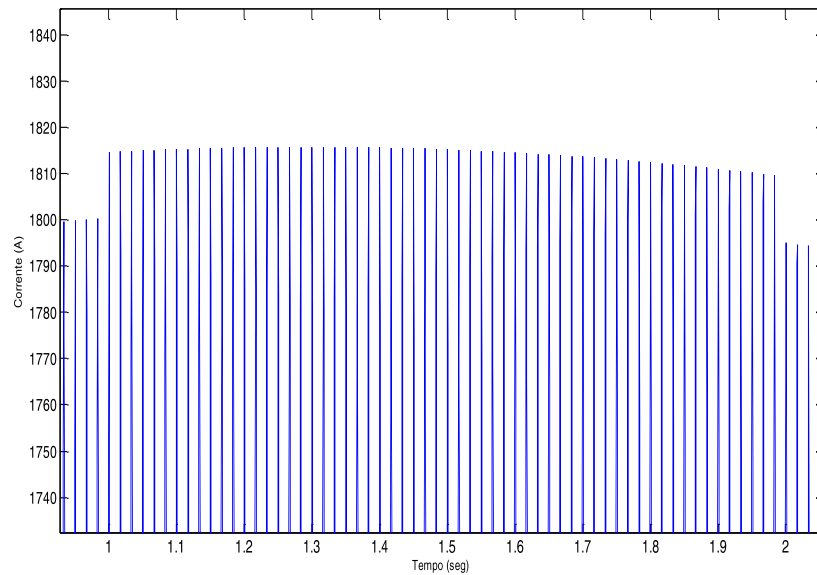


As figuras 21 a 23 correspondem ao caso 1, mostrando, respectivamente, o sinal de corrente, o detalhe do offset causado pelo pulso de corrente contínua e a detecção da GIC pelo filtro proposto, para a inserção de uma GIC de 100 Ampères, com duração de 1 segundo e uma amostragem de 32 amostras por ciclo. Novamente, o filtro proposto detectou a corrente geomagneticamente induzida com grande precisão.

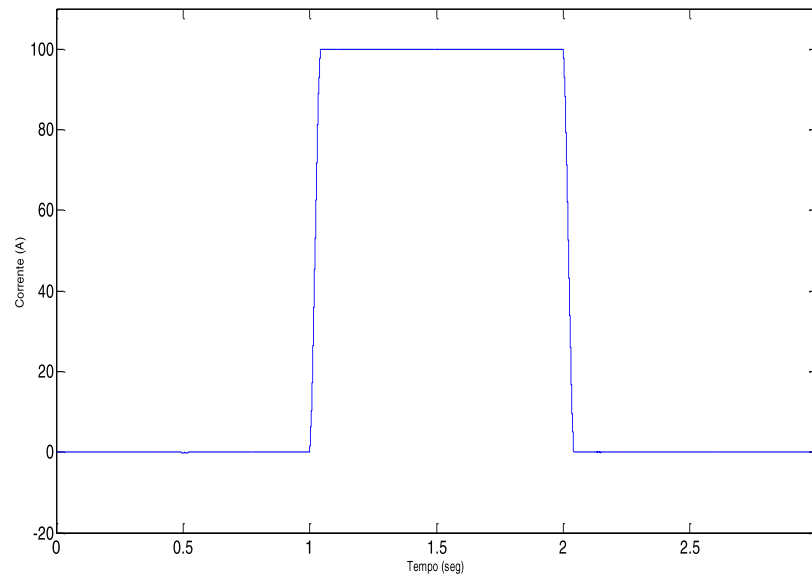
**Figura 21 - Inserção de uma corrente de 100 Ampères, duração de 1 segundo com 32 amostras por ciclo.**



**Figura 22 - Detalhe da GIC de 100 Ampères duração de 1 segundos com 32 amostras por ciclo.**

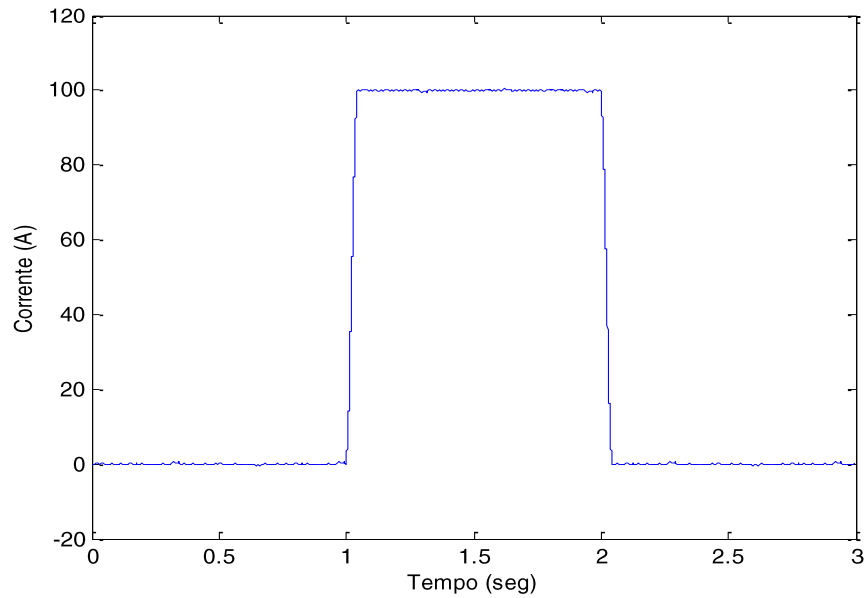


**Figura 23 - Detecção do pulso de uma corrente de 100 Ampères, duração de 1 segundo e decomposto em 32 amostras por ciclo.**



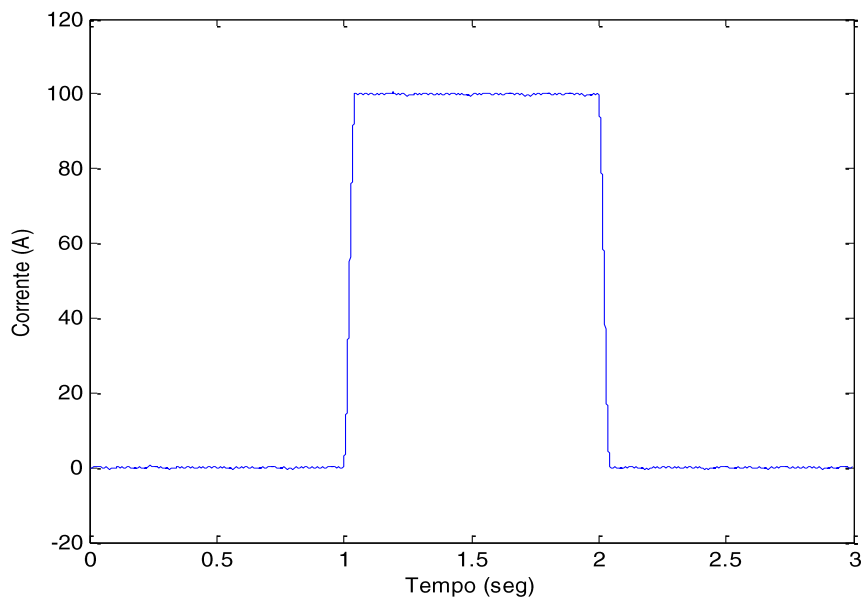
Analisando o mesmo caso, porém com uma amostragem de 64 amostras por ciclo, o desempenho do filtro morfológico para a detecção das correntes geomagneticamente induzidas aparece na figura 24. Nessa figura, é possível verificar a precisão da metodologia, a qual detecta adequadamente o pulso de corrente inserido no sistema.

**Figura 24 - Detecção do pulso de uma corrente de 100 Ampères, duração de 1 segundo e decomposto em 64 amostras por ciclo.**



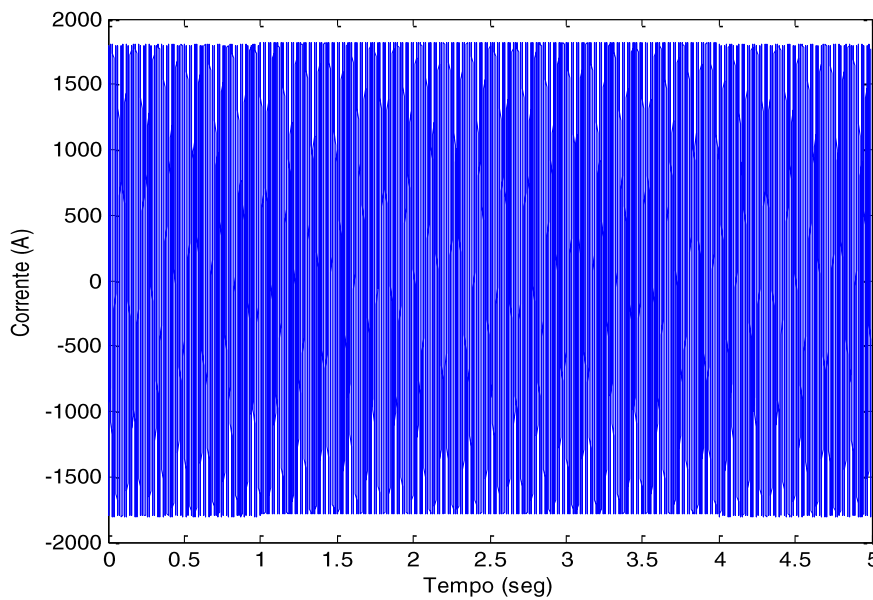
Com base nesses resultados, pode-se afirmar que, quanto maior a quantidade de amostrar por ciclo, melhor fica a aproximação da GIC. Isso pode ser comprovado através da figura 25, a qual mostra o desempenho da metodologia proposta para um sinal de corrente nas mesmas condições do caso anterior, com uma amostragem de 96 amostras por ciclo.

**Figura 25 - Detecção do pulso de uma corrente de 100 Ampères, duração de 1 segundo, com 96 amostras por ciclo.**

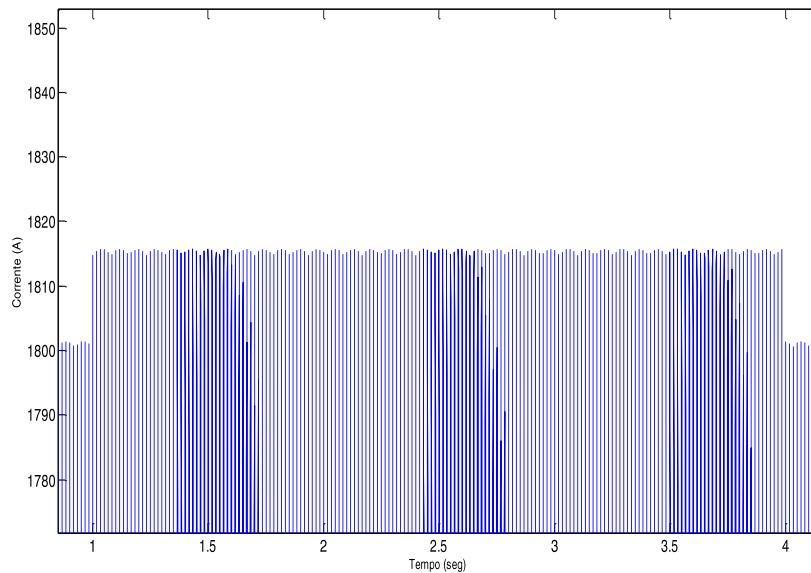


Buscando avaliar o desempenho da metodologia proposta para GICs de maior duração, foram feitas simulações inserindo pulsos contínuos de 100 Ampères na linha de transmissão, com duração de 3 segundos. Dada a maior precisão obtida pela maior amostragem, doravante serão demonstrados somente os resultados obtidos com sinais amostrados a 96 amostras por ciclo. A figura 26 mostra o sinal resultante da simulação do caso de GIC de 100 A com duração de 3 segundos. Além disso, o detalhamento do offset causado por essa corrente é mostrado na figura 27.

**Figura 26 - Inserção de uma corrente de 100 Ampères, duração de 3 segundos com 96 amostras por ciclo.**

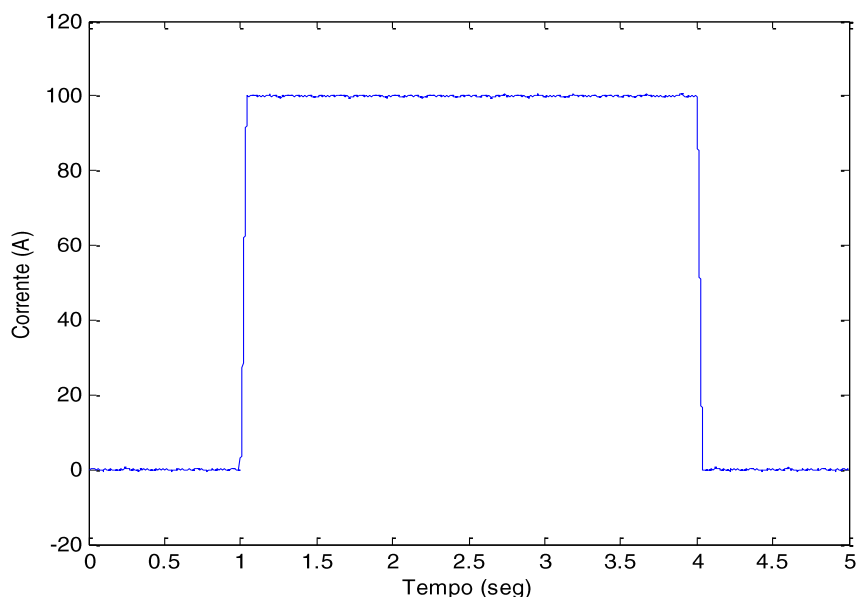


**Figura 27 - Detalhe da GIC de 100 Ampères duração de 3 segundos com 96 amostras por ciclo.**



A Figura 28 apresenta a resposta do filtro proposto, onde se pode verificar que a metodologia mais uma vez apresentou excelente desempenho, aproximando a resposta do valor da GIC durante o intervalo em que ela ocorre.

**Figura 28 - Detecção do pulso de uma corrente de 100 Ampères, duração de 3 segundos e decomposto em 96 amostras por ciclo.**

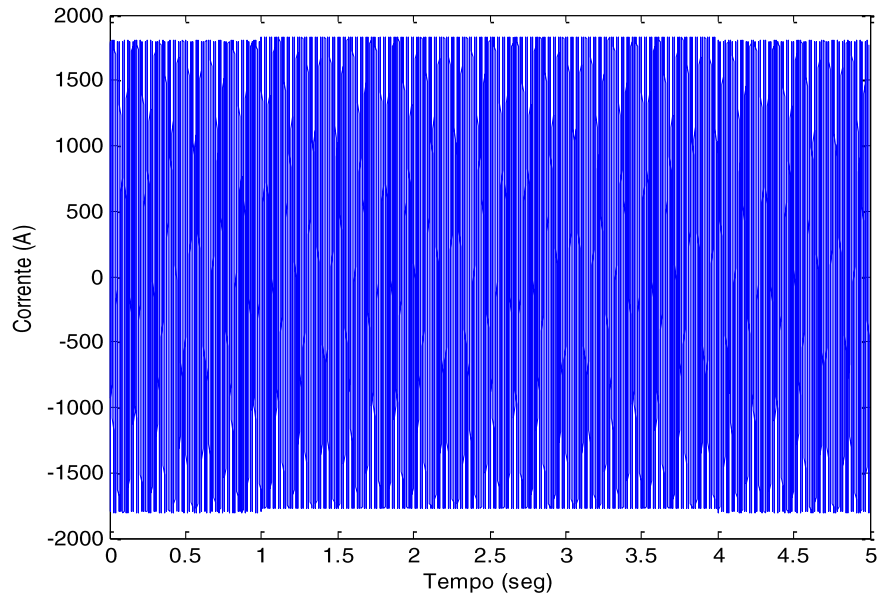


Os sinais apresentados a seguir apresentam valores maiores de GICs, sendo esta de 200 A e com duração de 3 segundos. Este valor de corrente foi estudado em Pinto (2003), no qual é retratada a ocorrência de GIC no sistema elétrico de potência brasileiro. O artigo discute a ocorrência de Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs) na América do Sul e suas conseqüências. Alguns casos foram alvo de estudos por possuírem uma grande quantidade de incidência de eventos aparentemente inexplicáveis, gerando blecautes imprevisíveis e muitas severas. Com a utilização do filtro proposto, a ocorrência de uma possível GIC seria facilmente detectada, permitindo a realização da ação mais adequada por parte da proteção e dos operadores do sistema. Além disso, as concessionárias poderiam justificar os possíveis desligamentos não programados, sem sofrerem punições por parte dos órgãos regulamentadores.

Nesse contexto, as figuras 29 a 31 correspondem ao caso 1, mostrando, respectivamente, o sinal de corrente, o detalhe do offset causado pelo pulso de corrente contínua e a detecção da GIC pelo filtro proposto, para a inserção de uma

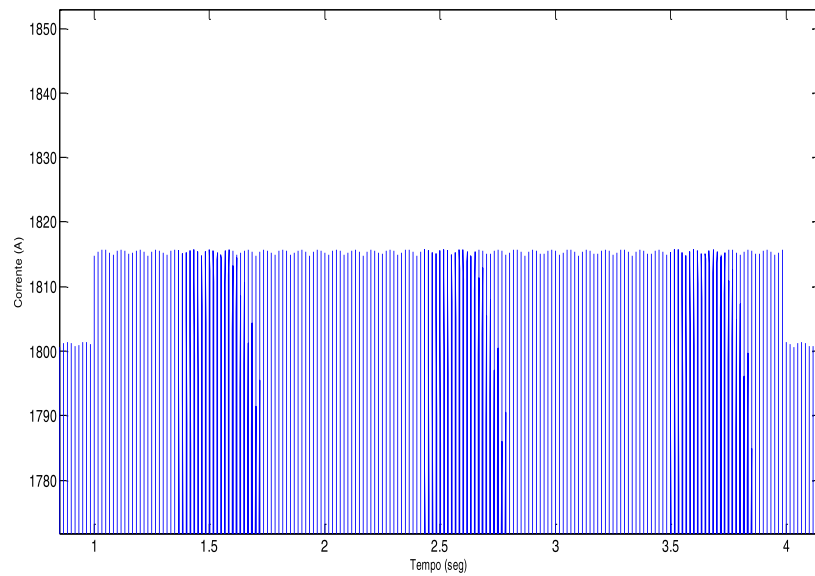
GIC de 200 Ampères, com duração de 3 segundos, para uma amostragem de 96 amostras por ciclo.

**Figura 29 - Inserção de uma corrente de 200 Ampères, duração de 3 segundos com 96 amostras por ciclo.**



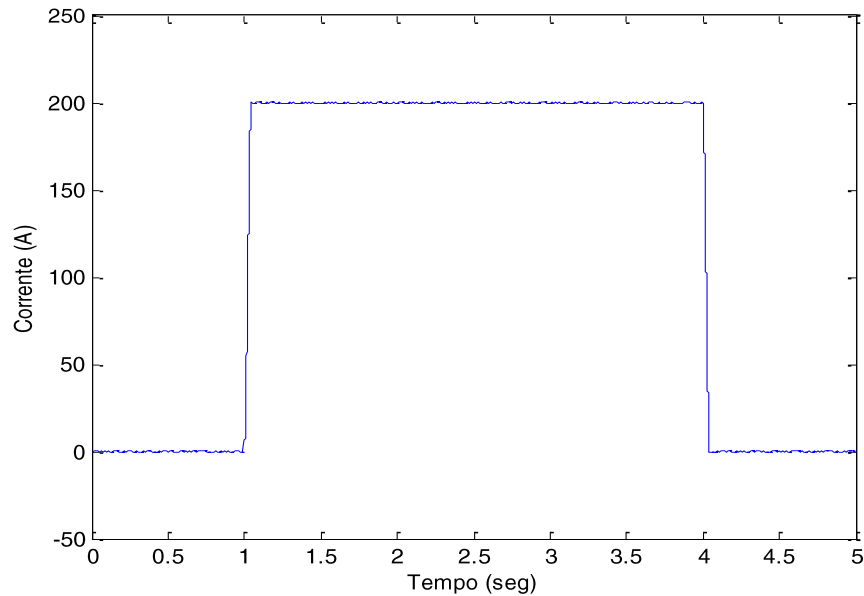
Tendo em vista a resposta do filtro proposto, mostrada na figura 35, nota-se que, novamente, a presença da corrente geomagneticamente induzida foi detectada com grande precisão.

**Figura 30 - Detalhe da GIC de 200 Ampères duração de 3 segundos com 96 amostras por ciclo.**





**Figura 31 – Detecção do pulso de uma corrente de 200 ampères, duração de 3 segundos e decomposto em 96 amostras por ciclo.**



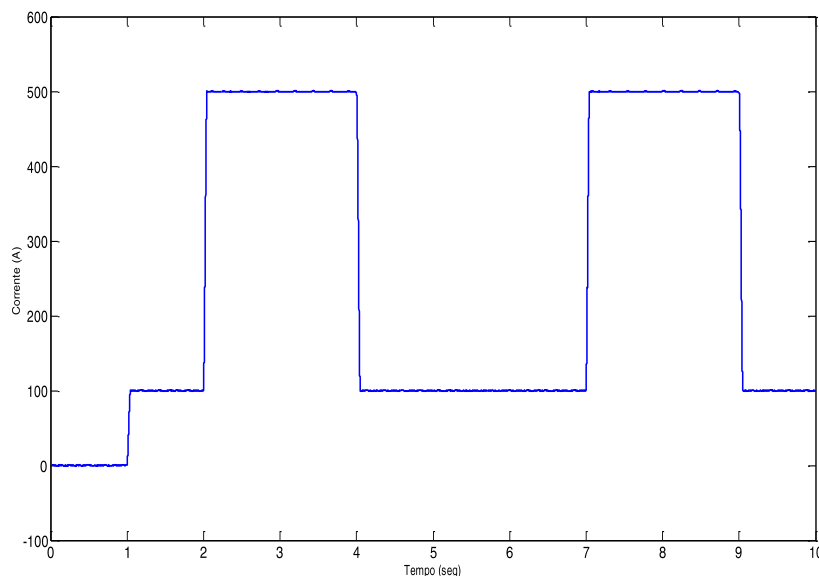
Com base nos resultados obtidos para esta situação, verifica-se que, independentemente da magnitude e da duração da GIC, a metodologia é capaz de detectar adequadamente e com boa precisão a ocorrência dessas correntes em sistemas elétricos de potência.

Vale ressaltar que altos níveis de GICs, caracterizados por durações acima de um segundo e magnitudes acima de 90 Ampères, são os principais causadores de saturação de núcleos de transformadores. Algumas GICs de baixa intensidade e curta duração, em que se encaixa a grande maioria dos casos aqui no Brasil, não causariam danos de superaquecimento ou saturação em curtos intervalos de tempo, mas prejudicam a vida útil destes equipamentos. Além disso, em condições de carregamento elevado, essas GICs podem causar atuações indevidas dos dispositivos de proteção, promovendo desligamentos não programados passíveis de multa. Com a atuação da metodologia proposta esses problemas poderiam ser evitados

Sendo assim, os foram feitas simulações para o sistema teste do caso 2 (figura 17), para verificar o desempenho da metodologia frente à ocorrência de uma GIC com variações de intensidade e duração dos pulsos, conforme abordado no trabalho Girgis (2012). Essa análise é importante por modelar melhor o comportamento dessas correntes no SEP. Através da figura 32, verifica-se que, mesmo para um sinal

contendo GICs com variação de magnitude e de duração, atuou de forma precisa na detecção dessas correntes, aproximando adequadamente os valores das mesmas.

**Figura 32 – Detecção dos pulsos de corrente referente ao caso 2.**



Para o caso mostrado na figura 36, foi feita uma inserção de corrente 100 Ampères durante 1 segundo, seguida da inserção de 400 Ampères com duração de 2 segundos, nos instantes 2 e 7 segundos. Além disso, vale ressaltar que os intervalos de duração de cada pulso foram detectados precisamente pelo método proposto, bem como este apresentou boa aproximação do valor da GIC, nos diferentes instantes de tempo.

Embora o caso 2 seja de rara ocorrência no Brasil, este foi analisado para poder comprovar a eficiência do filtro frente a estas situações, uma vez que, em Girgis (2012), os resultados apresentados foram baseados em dados coletados pela NASA e também obtidos através de um sistema de proteção ajustado para as áreas de alta ocorrência de GIC's, no Canadá. No entanto, este sistema é muito caro e robusto para a realidade do sistema elétrico de potência brasileiro. Dessa forma, comprova-se a eficácia e aplicabilidade da metodologia para detecção das correntes geomagneticamente induzidas desenvolvida neste trabalho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta um estudo sobre as correntes geomagneticamente induzidas (GICs), as quais podem provocar problemas de atuação indevida dos esquemas de proteção, provocando desligamentos não programados passíveis de punição por parte dos órgãos fiscalizadores. Além disso, essas correntes podem provocar a redução da vida útil dos componentes do SEP.

Tendo em vista os estudos preliminares realizados, a cerca dos fundamentos básicos e conceitos avançados sobre geomagnetismo e processamento de sinais, bem como o conhecimento das causas dessas correntes, pôde-se desenvolver uma metodologia capaz de detectá-las precisamente.

Tal metodologia utiliza operadores morfológicos e é de fácil implementação. Os resultados obtidos a partir do processamento de sinais, conseguidos através da simulação de dois sistemas teste, comprovaram a excelente capacidade de detecção das GICs por parte da técnica proposta. Para diferentes intensidades e durações das correntes geomagneticamente induzidas, bem como para diferentes taxas de amostragem dos sinais, a precisão apresentada pela metodologia, tanto para os instantes de ocorrência dessas correntes, quanto para a magnitude das mesmas, confirmam a robustez da metodologia.

Portanto, espera-se que a contribuição deste trabalho possa melhorar a confiabilidade da proteção durante a ocorrência das GICs, evitando desligamentos indevidos ocasionados pela atuação indevida desses dispositivos, além de poupar as concessionárias das severas punições impostas pelos órgãos regulamentadores.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- Verificar o desempenho da metodologia para oscilografias reais e comparação com os índices geomagnéticos;
- Criação de um modelo matemático e computacional mais robusto para simulação de GICs;
- Simular outros sistemas teste;
- Investigar o fator de proporção de 3,5 da Equação (7).

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; e DIAS, H.; **Física para Universitários: eletricidade e magnetismo**. Porto Alegre: AMGH, 2012

BOTELER, D. H., Pirjola, R. J. and Nevanlinna, H.; **The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface**; Adv. Space. Res., 22(1), 17-27, 1998.

BUCK, John A., HAYT, William H.; **Eletromagnetismo**; 6ª edição. Rio de Janeiro; Editora LTC, 2003.

CAMPBELL, O. A. [et al] **Wind Atlas: Rio Grande do Sul State" (in Portuguese), published by Department of Energy and Communications of Rio Grande do Sul State**, Porto Alegre, Brazil, 2002, p. 70.

CARDOSO, A. H., **Análise de Alguns Parâmetros Ionosféricos na Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul Mediante Ondas "VLF"**, Revista Brasileira de Física, Vol. 12, NP 2, (1982) )

CHAVES, Alaor; **Física Básica: eletromagnetismo**; Rio de Janeiro; Editora LTC, 2012.

COSTA, Eduard Montgomery Meira; **Eletromagnetismo – teoria, exercícios resolvidos experimentos Práticos**; Rio de Janeiro; Editora Ciência Moderna Ltda., 2009.

COUTINHO, E.F.; **Introdução às Partículas Presas e à Anomalia Geomagnética Brasileira**; Ciência e Cultura, pg. 329-339 (1974).

DOS SANTOS, CARDOSO E. M., G., Jr., P. E. Farias, and DE MORAIS A. P.; **CT Saturation Detection Based on the Distance Between Consecutive Points in the Plans Formed by the Secondary Current Samples and Their Difference-Functions**; IEEE Transactions on power delivery, vol. 28, no. 1, Janeiro 2013

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 1a . ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FÍSICA, Ufrj-departamento de. **Cinturões de Van Allen e suas curiosidades**. Disponível em: <<http://cosmonovas.blogspot.com.br/2011/08/descoberta-antimateria-ao-redor-da.html>>. Acesso em: 11 mar. 2014.

FÍSICA, Ufrj-departamento de. **Distorção do campo magnético terrestre no momento de uma explosão solar**. Disponível em: <<http://www.sitedecuriosidades.com/curiosidade/a-magnetosfera.html>>. Acesso em: 10 mar. 2014.',

FÍSICA, Usp-departamento de. **Campo magnético da terra**. Disponível em: <<http://www.mpsnet.net/portal/Polemicas/Pol084.htm>>. Acesso em: 10 maio 2013

FUCHS, Marcius G.; **Análise dos desarmes ocorridos na LT 138kV SMA1 X ALE-com vistas às ações de manutenção**; Technical report in portuguese, CEEE-GT. August, 2011

**Geomagnetismo**. 2012 USP (Ed.). Disponível em: <[www.iag.usp.br/~eder/ensinarcompesquisa/Geomagnetismo\\_f.pd](http://www.iag.usp.br/~eder/ensinarcompesquisa/Geomagnetismo_f.pd)>. Acesso em: 10 maio 2013.

GUMMOW, R. A.; **GIC effects on pipeline corrosion and corrosion-control systems**. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, pg. 1755-1764, 2002

KAPPENMAN, J. G., ZANETTI, J. H. e RADASKY, W., **Geomagnetic Storms Can Threaten Electric Power Grid**, *Earth in Space*, vol. 9, nº 7, Março 1997.

MOLINSKI, T. S., FEERO, W. E. e DAMSKY, B. L.; **Shielding Grids from Solar Storms**, *IEEE Spectrum*, Novembro 2000.

MOORE, S. K.; **Extreme Solar Storm Strikes Earth**, *IEEE Spectrum*, Dezembro 2003.

'NASA. **Anamolia do Atlantico Sul**. Disponível em: <[://www.ceticismoaberto.com/fortianismo/1053/a-anomalia-do-atlntico-sul](http://www.ceticismoaberto.com/fortianismo/1053/a-anomalia-do-atlntico-sul)>. Acesso em: 12 mar. 2014

NASA. **Aurora**. Disponível em: <Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration) em 11 de setembro de 2005.>. Acesso em: 27 mar. 2013

PEREIRA, Oneide José; LEITHOLD, Ângelo Antônio. **Geomagnetismo**. Instituto de aeronáutica e espaço – IAE, Campus de pesquisas geofísicas major Edsel de Freitas Coutinho. São Paulo, 2012.

PINTO, L.M.V.G., SZCZUPAK, J., DRUMMOND, M.A. e MACEDO, L.H.; **Um Novo Olhar sobre a Segurança de Sistemas Elétricos**, IEEE Latin America, Region 9 - Brazil Council,, 2003.

R. GIRGIS, *Fellow*; **Effects of GIC on Power Transformers and Power Systems**, IEEE Spec-trum, December 2012.

REITZ, John R., MILFORD, Frederick J., CHRISTY, Robert W.; **Fundamentos da teoria Eletromagnética**; 16<sup>a</sup> tiragem Editora Campus. 2010.

RUSSELLI, C. T. e LUHMANN, J. G., **Earth: Magnetic Field and Magnetosphere**, **Encyclopedia of Planetary Sciences**, Chapman and Hall, Nova Iorque, 1997.

SABOIA, A. M. ; Marques, G. C. ;; **Anomalia magnética do atlântico sul**; Universidade Brasília, Instituto de Geociências, 2011.

SZCZUPAK, J. e MACEDO, L. H., **Aplicação de Técnicas de Processamento de Sinais à Detecção de GICs**, RELATÓRIO engenho, 2004.

MUSTAFA , T. I. A. H.; CABRAL, S. H. L.; L. B. PUCHALE, M.G. FUCH, L.E.C. LIMA and F. T. FLORES; **A Study of Correlation between Protection Trips and Geomagnetically Induced Currents in a Power Transmission Line in Brazil**, IEEE Spectrum, December 2013.

WU, Dr. Q.h.; LU, Dr. Z.; T.Y., Ji. **Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology**: Power Systems. Liverpool: Springer-verlag London Limited, 2009.