

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FABIANA DA CUNHA LAGOAS

**Correntes Geomagneticamente Induzidas:
Detecção e Influência no Sistema Elétrico de
Potência**

Alegrete

2017

FABIANA DA CUNHA LAGOAS

**Correntes Geomagneticamente Induzidas: Detecção e
Influência no Sistema Elétrico de Potência**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete

2017

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) .

L118c Lagoas, Fabiana da Cunha

Correntes Geomagneticamente Induzidas: Detecção e
Influência no Sistema Elétrico de Potência / Fabiana da Cunha
Lagoas.

115 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2017.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Correntes Geomagneticamente Induzidas. 2. Influência. 3.
Detecção. 4. Proteção. 5. Filtro Mofológico. I. Título.

FABIANA DA CUNHA LAGOAS

CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS: DETECÇÃO E INFLUÊNCIA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

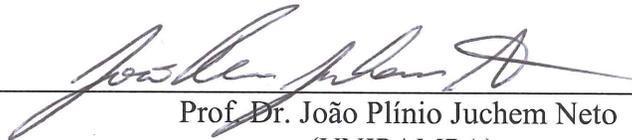
Área de concentração: Sistemas de Energia.

Dissertação defendida e aprovada em: dia 28 de Setembro de 2017.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. João Plínio Juchem Neto
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon
(UFSM)

Dedico este trabalho aos meus pais, minha avó, irmãos, meu companheiro, minhas filhas e toda a minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa 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 me apoiarem mais uma vez sentimentalmente e financeiramente. E 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.

Aos meus colegas e amigos do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência-GESEP, em especial: Fernanda Cazabonet pela amizade verdadeira, compreensão, alegria de viver e companheirismo. Aos meus colegas de graduação e pós graduação Haiglan Plotzki e Lucas Dorneles por sempre estarem dispostos a me ajudar, muito obrigada.

Ao meu amado companheiro Marcos Fernando Teogenes por me entender e aceitar a dedicação que depositei neste trabalho.

Ao professor, Dr. Eduardo Machado dos Santos, pela orientação, amizade e por acreditar e desenvolver um potencial que nem mesmo eu sonhara em ter. Mesmo que a palavra 'obrigado' signifique tanto, não expressará por inteiro o quanto seu gesto de ensino e dedicação foi importante para a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em 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.

”Não importa o quanto você bate, mas quanto aguenta apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.”(Rocky Balboa)

Resumo

Correntes geomagneticamente induzidas (GICs) são correntes espelhadas na superfície terrestre, que ocorrem em função do movimento de partículas ionizadas no campo magnético terrestre. Tais partículas eletricamente carregadas são provenientes da massa coronal expelida em erupções solares, as quais viajam a uma velocidade de, aproximadamente, 450 km/s. Ao entrarem em contato com a magnetosfera, proporcionam distorções no campo magnético, as quais são medidas por meio de três índices geomagnéticos: Kp e Ap, que representam o grau de perturbação do campo magnético, e Dst, o qual informa a intensidade da tempestade solar por hora. Quando as GICs penetram no sistema elétrico de potência (SEP) através dos aterramentos dos equipamentos, problemas podem ocorrer, tais como o aquecimento de componentes da rede, além de desligamentos de linhas de transmissão, decorrentes da atuação indevida de dispositivos de proteção. Destaca-se que, atualmente, as concessionárias brasileiras de energia são severamente multadas pelos órgãos reguladores quando há a ocorrência de um desligamento não programado que não seja causado por uma falta permanente. Além disso, ressalta-se que os dispositivos de proteção são desprovidos de funções capazes de detectar as GICs, as quais comprometem também a vida útil de alguns equipamentos. Nesse contexto, um estudo aprofundando deste fenômeno geomagnético é apresentado neste trabalho. Para tal, um histórico de desarmes da Linha de Transmissão (LT) de 138 kV ALE SE – SMA1, localizada entre as cidades de Alegrete e Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, foi analisado em função dos dados dos índices geomagnéticos para o período de 2010 a 2015. Além disso, uma análise do ciclo solar, evidenciou a possibilidade de ocorrência de GICs nesta LT, o que pode justificar muitos dos desligamentos indeterminados. Dessa forma, o presente trabalho apresenta uma técnica para detecção de GICs, a qual pode ser aplicada em relés digitais ou em ferramentas computacionais para determinação das causas de desligamentos indevidos sem justificativa aparente. Tal método consiste em um filtro morfológico para detecção dessas correntes, o qual foi implementado em Matlab® e testado a partir do processamento de sinais de corrente, gerados computacionalmente pela simulação de um sistema teste no software EMTP-ATP®. Os valores de GICs utilizados para testar o seu desempenho foram obtidos a partir do software OPENDSS®, o qual calcula o fluxo de corrente geomagneticamente induzida a partir de dados técnicos da LT, como o comprimento da linha e as respectivas latitudes e longitudes de seus terminais. Os resultados obtidos através das simulações em OPENDSS® mostraram a ocorrência de GICs na linha estudada. Por fim, o processamento dos sinais conseguidos através da simulação do sistema, por parte da metodologia para detecção de GICs, comprovaram a excelência da técnica proposta.

Palavras-chave: Correntes Geomagneticamente Induzidas. Detecção. Proteção. Filtro Morfológico.

Abstract

Geomagnetically induced currents (GICs) are mirrored currents on the Earth's surface, which occur as a function of the movement of ionized particles in the Earth's magnetic field. Such electrically charged particles are derived from the coronal mass expelled in solar flares, which travel at a speed of approximately 450 km / s. When they come into contact with the magnetosphere, they provide distortions in the magnetic field, which are measured by means of three geomagnetic indices: Kp and Ap, which represent the degree of perturbation of the magnetic field, and Dst, which informs the intensity of the solar storm per hour. When GICs penetrate the electrical power system (SEP) through the grounding of the equipment, problems can occur, such as the heating of network components, as well as disconnections of transmission lines, due to the improper performance of protection devices. It should be noted that, currently, Brazilian energy concessionaires are severely fined by regulatory agencies when there is an unplanned shutdown that is not caused by a permanent shortage. In addition, it is emphasized that the protection devices are devoid of functions capable of detecting the GICs, which also compromise the useful life of some equipment. In this context, an in-depth study of this geomagnetic phenomenon is presented in this paper. To do so, a history of disarranges of the 138 kV ALE SE - SMA1 transmission line, located between the cities of Alegrete and Santa Maria, in the state of Rio Grande do Sul, was analyzed according to geomagnetic index data for The period from 2010 to 2015. And together with a study of sunspots, the possibility of occurrence of GICs in this LT was evidenced, which may justify many of the indeterminate disconnections. Thus, the present work presents a technique to detect GICs, which can be applied in digital relays or in computational tools to determine the causes of undue disconnections without apparent justification. This method consists of a morphological filter for the detection of these currents, which was implemented in Matlab® and tested from the current signal processing generated by the simulation of a test system in the EMTP-ATP® software. The values of GICs used to test their performance were obtained from OPENDSS® software, which calculates geomagnetically induced current flow from technical data of the LT, such as the length of the line and the respective latitudes and longitudes of its terminals. The results obtained through the simulations in OPENDSS® showed the occurrence of GICs in the studied line. The results obtained from the processing of the signals obtained through the simulation of the system proved the excellence of the proposed technique.

Keywords: Geomagnetically induced currents. Detection. Protection. Morphological filter.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Explosões Solares.	23
Figura 2 – Representação dos polos geográficos e magnéticos.	25
Figura 3 – Comportamento da magnetosfera no instante de uma explosão solar.	26
Figura 4 – Cinturões de radiação e eixos rotacionais e magnéticos.	27
Figura 5 – Cinturões de Van Allen	28
Figura 6 – Anomalia do Atlântico Sul.	29
Figura 7 – Progressão da Anomalia do Atlântico Sul.	30
Figura 8 – Fluxograma do processo de GIC no SEP.	32
Figura 9 – Exemplo de como funciona o sistema elétrico de potência interligado, com presença de GICs.	35
Figura 10 – Transformador de Corrente com o núcleo danificado.	36
Figura 11 – Área de concessão da Transmissão da CEEE-GT.	40
Figura 12 – Relação de desarmes de 2010 a 2015.	41
Figura 13 – Relação mensal de desarmes por ano.	42
Figura 14 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	44
Figura 15 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes do ano de 2010 com os índices Geomagnéticos	44
Figura 16 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	45
Figura 17 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes do ano de 2011 com os índices Geomagnéticos	45
Figura 18 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	46
Figura 19 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes do ano de 2012 com os índices Geomagnéticos	47
Figura 20 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	47
Figura 21 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes do ano de 2013 com os índices Geomagnéticos	48
Figura 22 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	49
Figura 23 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes do ano de 2014 com os índices Geomagnéticos	49
Figura 24 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	50
Figura 25 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes do ano de 2015 com os índices Geomagnéticos	50
Figura 26 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes Total com os índices Geomagnéticos	51
Figura 27 – Porcentagem Anual de Desarmes antecedidos por Perturbações do Campo Magnético Terrestre.	52
Figura 28 – Porcentagem Anual de Desarmes antecedidos por Tempestades Solares.	52

Figura 29 – Ciclo Solar Completo de 1996 a 2006.	54
Figura 30 – Previsão do número de manchas solares.	54
Figura 31 – Ciclo Solar de Maio de 2010 a Setembro de 2012.	55
Figura 32 – Ciclo Solar de Dezembro 2013 a Julho de 2015.	56
Figura 33 – Ciclo Solar de 1996 a 2015.	57
Figura 34 – Localização da LT no Rio Grande do Sul.	61
Figura 35 – Sistema teste elaborado no software EMTP-ATP.	62
Figura 36 – Fluxograma da metodologia implementada.	64
Figura 37 – Resultados obtidos para uma GIC de 5,451 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.	66
Figura 38 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 5,451 A. (a) Resposta do filtro; (b) Erro Absoluto; (c) Erro Relativo.	66
Figura 39 – Resultados obtidos para uma GIC de 10,902 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.	67
Figura 40 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 10,902 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.	67
Figura 41 – Resultados obtidos para uma GIC de 16,45 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.	68
Figura 42 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 16,45 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.	68
Figura 43 – Resultados obtidos para uma GIC de 21,804 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.	69
Figura 44 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 21,804 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.	70
Figura 45 – Resultados obtidos para uma GIC de 27,255 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.	70
Figura 46 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 27,255 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.	71
Figura 47 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	79
Figura 48 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	79
Figura 49 – Relação de desarmes do mês de Março de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	80
Figura 50 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	80
Figura 51 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	81
Figura 52 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	81
Figura 53 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	82
Figura 54 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	82
Figura 55 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	83
Figura 56 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	83
Figura 57 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	84

Figura 58 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.	84
Figura 59 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	85
Figura 60 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	85
Figura 61 – Relação de desarmes do mês de Março de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	86
Figura 62 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	86
Figura 63 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	87
Figura 64 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	87
Figura 65 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	88
Figura 66 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	88
Figura 67 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	89
Figura 68 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	89
Figura 69 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	90
Figura 70 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.	90
Figura 71 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	91
Figura 72 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	91
Figura 73 – Relação de desarmes do mês de Março de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	92
Figura 74 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	92
Figura 75 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	93
Figura 76 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	93
Figura 77 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	94
Figura 78 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	94
Figura 79 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	95
Figura 80 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	95
Figura 81 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	96
Figura 82 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.	96
Figura 83 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	97
Figura 84 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	97
Figura 85 – Relação de desarmes do mês de Março de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	98
Figura 86 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	98
Figura 87 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	99
Figura 88 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	99
Figura 89 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	100
Figura 90 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	100
Figura 91 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	101
Figura 92 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	101
Figura 93 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	102
Figura 94 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.	102
Figura 95 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	103
Figura 96 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	103

Figura 97 – Relação de desarmes do mês de Março de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	104
Figura 98 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	104
Figura 99 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	105
Figura 100 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	105
Figura 101 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	106
Figura 102 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	106
Figura 103 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	107
Figura 104 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	107
Figura 105 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	108
Figura 106 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.	108
Figura 107 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	109
Figura 108 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	109
Figura 109 – Relação de desarmes do mês de Março de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	110
Figura 110 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	110
Figura 111 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	111
Figura 112 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	111
Figura 113 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	112
Figura 114 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	112
Figura 115 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	113
Figura 116 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	113
Figura 117 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	114
Figura 118 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.	114

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos Distúrbios das Tempestade.	33
Tabela 2 – Classificação do índice Planetarische Kennziffer.	33
Tabela 3 – Coordenadas esféricas.	59
Tabela 4 – Fluxo de GIC na LT	61
Tabela 5 – Parâmetros do Sistema Teste.	62

Lista de abreviaturas e siglas

GIC	Corrente Geomagneticamente Induzida
SEP	Sistema Elétrico de Potência
AMAS ou SAA	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
LT	Linha de Transmissão
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
DST	Índice de Distúrbios das Tempestades
KP	Índice Planetário Kennziffer
SE	Elemento Estruturante
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONS	Operador Nacional do Sistema
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
IMF	Campo Magnético Interplanetário
MM	Morfologia Matemática
SE	Elemento Estruturante
CC	Corrente Contínua

Lista de símbolos

θ	Ângulo de Fase
\oplus	Operador Morfológico Dilatação
\ominus	Operador Morfológico Erosão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	19
1.2	Justificativa	20
1.3	Objetivos do Trabalho	21
1.4	Delimitação	21
1.5	Estrutura do Trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Explosões Solares	23
2.2	Campo Magnético Terrestre	24
2.2.1	Cinturões de Van Allen	26
2.2.2	Anomalia do Atlântico Sul	28
2.3	Correntes Geomagneticamente Induzidas	30
2.3.1	Índices Geomagnéticos	33
2.3.2	Presença das GICs no Brasil	34
2.4	Consequências das GICs no Sistema Elétrico de Potência	34
2.4.1	Transformadores de Potência	36
2.4.2	Transformadores de Potencial e de Corrente	36
2.4.3	Geradores	36
2.4.4	Linha de Transmissão	37
2.4.5	Sistemas Interligados	37
2.5	Morfologia Matemática Aplicada a Processamento de Sinais	37
2.6	Considerações Finais	38
3	GICs, ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E O CICLO SOLAR	40
3.1	GICs e Índices Geomagnéticos: Suas relações e possível influência sobre o SEP Regional	40
3.2	O Ciclo Solar e Sua Conexão Com Desarmes Indeterminados	53
3.3	Considerações Finais	57
4	METODOLOGIA	59
4.1	Dados Técnicos da Linha de Transmissão	59
4.2	GICs utilizando o OPENDSS®	60
4.3	Sistema Teste desenvolvido para a Simulação de GICs no EMTP-ATP®	61
4.4	Proposta para Detecção de Correntes Geomagneticamente Induzidas	62
4.5	Considerações Finais	64

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1	Desempenho do Filtro Morfológico para Detecção de GICs Utilizando Dados de Simulação em OPENDSS®	65
5.2	Considerações Finais	71
6	CONCLUSÃO	73
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	74
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXOS	78
	ANEXO A – RELAÇÃO DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E OS DESARMES DE 2010.	79
	ANEXO B – RELAÇÃO DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E OS DESARMES DE 2011.	85
	ANEXO C – RELAÇÃO DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E OS DESARMES DE 2012.	91
	ANEXO D – RELAÇÃO DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E OS DESARMES DE 2013.	97
	ANEXO E – RELAÇÃO DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E OS DESARMES DE 2014.	103
	ANEXO F – RELAÇÃO DOS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS E OS DESARMES DE 2015.	109

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, aprisionando-as e evitando que as mesmas atinjam a superfície do planeta. Entretanto, as partículas ionizadas em movimento no campo magnético terrestre formam correntes elétricas em altas altitudes (além da atmosfera), que provocam alterações no próprio campo magnético, além de induzir correntes na superfície terrestre e em seus caminhos paralelos como cabos telefônicos, dutos metálicos, vias férreas e linhas de transmissão (PINTO et al., 2008).

Tais correntes são conhecidas como correntes geomagneticamente induzidas ou GICs (do inglês: *Geomagnetically Induced Currents*) e se apresentam como componentes quase contínuas de frequência inferior a 1Hz, e afetando significativamente o funcionamento de sistemas de comunicação, de satélites e de sistemas elétricos de potência. Além disso, ressalta-se que o fenômeno das GICs é amplamente estudado no hemisfério Norte (MOORE, 2012), onde, comprovadamente, já provocou grandes *blackouts* (GIRGIS et al., 2012)

Nesse contexto, destaca-se que 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 (PIRJOLA, 2000). 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. Ainda, destaca-se que o campo magnético enfraquece nas regiões próximas ao Equador (baixas latitudes), formando os chamados “Cinturões de Van-Allen”.

No hemisfério Sul, engenheiros eletricitistas 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, tempestades solares de grandes proporções atingiriam as latitudes mais baixas, enquanto que as fracas e moderadas, as quais são mais frequentes, 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 (do inglês: *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.

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 (TRICHTCHENKO; BOTELER; FOSS, 2007). No sistema elétrico, as GICs penetram pelo solo, isto é, pelos aterramentos (PIRJOLA, 2000). Essas correntes são aproximadas por pulsos de corrente quase contínua em sistemas semelhantes (GIRGIS et al., 2012).

Sabe-se que as GICs provocam saturação do núcleo de transformadores de potência, o que causa a distorção dos sinais de corrente e tensão nesses dispositivos. Isto pode levar a atuação indevida 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 (PIRJOLA, 2000).

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. Por fim, linhas de transmissão podem ter seu carregamento máximo violado, o que pode prejudicar os isolamentos da mesma e a qualidade da energia transmitida, sendo estes apenas alguns exemplos do quanto as correntes geomagneticamente induzidas podem ser prejudiciais para os sistemas elétricos de potência.

Portanto este trabalho engloba o estudo de uma linha de transmissão, localizada no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta desarmes não justificáveis, todos passíveis de multa, em contraste com a variação de índices geomagnéticos. Também neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para a detecção deste fenômeno.

1.1 Motivação

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, a implementação de uma ferramenta robusta torna-se essencial para a identificação das causas desses desligamentos. Sabe-se que existe uma anomalia geomagnética sobre o Brasil, principalmente, sobre o estado do Rio Grande do Sul, a qual aproxima as linhas do campo magnético terrestre da superfície, facilitando a ocorrência de GICs na região. Entretanto, poucos estudos foram feitos até o momento no intuito de comprovar a ocorrência dessas correntes em solo brasileiro. Tão pouco, foram criadas ferramentas capazes de detectar essas correntes. Além disso, um estudo estatístico relacionando desarmes não justificados de uma linha com a variação dos

índices geomagnéticos, o qual é apresentado neste trabalho, fortalece a ideia de que correntes geomagneticamente induzidas sejam uma possível causa desses desligamentos. Portanto, tendo em vista esse fato, foi desenvolvida uma metodologia eficaz e de fácil implementação para relés de proteção ou para uso como ferramenta de defesa por parte das concessionárias, a qual é capaz de extrair GICs dos sinais de corrente da rede, cuja comprovação exige a análise dos índices geomagnéticos para o momento do referido desligamento.

1.2 Justificativa

Tendo em vista o crescente interesse por parte 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.

O Sistema Elétrico Brasileiro, devido a sua localização no globo, está sujeito a fenômenos geomagnéticos, oriundos das perturbações do campo magnético terrestre, que são resultantes da interação entre partículas ionizadas provenientes de erupções solares com o campo magnético da Terra, as quais favorecem o surgimento das Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs). Tais correntes, ao penetrarem no Sistema Elétrico de Potência, podem provocar desligamentos não programados em trechos da rede, em consequência da atuação dos sistemas de proteção, além de danificar ou comprometer a vida útil de componentes do SEP, quando essas correntes apresentam grandes magnitudes e longa duração.

Nesse contexto, realizou-se um estudo do histórico dos desligamentos não programados de uma linha de transmissão, cuja ocorrência de desarmes não justificados é consideravelmente alta, sendo custosa sua operação por parte da concessionária. A partir desse estudo, o qual é apresentado no Capítulo 3.1, evidenciou-se a possibilidade da ocorrência de GICs na linha estudada, impulsionando a continuação da pesquisa. Ressalta-se que a linha de transmissão estudada possui predisposição à ocorrência de GICs, devido às suas características geológicas e sua localização em uma região de anomalia do campo magnético terrestre. Assim, foram relacionados os índices geomagnéticos com estes desarmes sem justificativa, consolidando a ideia de que as GICs estejam relacionadas com esses desarmes não justificados.

Tendo em vista o crescente interesse por parte dos fabricantes de relés digitais em lógicas de proteção cada vez mais confiáveis e precisas, frente às diversas situações às 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. Então baseados nos estudos apresentados, desenvolveu-se essa metodologia capaz de detectar essas Correntes Geomagneticamente Induzidas, auxiliando assim as concessionárias nas suas justificativas perante o órgão

regulamentador.

1.3 Objetivos do Trabalho

Por objetivo geral, este trabalho busca desenvolver e aprimorar uma metodologia capaz de detectar as correntes geomagneticamente induzidas em SEP. Por objetivos específicos, citam-se:

- Estudar e compreender o fenômeno das GICs e os conceitos e demais fenômenos associados a sua ocorrência;
- Comparar os índices geomagnéticos com os desarmes não justificados, dentro de um histórico de 6 anos (2010 a 2015), para verificar a possibilidade da ocorrência de GICs na região da Linha de Transmissão, a qual sofre com inúmeros desligamentos sem motivo aparente;
- Implementar um Sistema Teste replicando as características do sistema de potência em questão no software OPENDSS[®], para simular os valores de GIC possíveis para a linha estudada;
- Implementar o mesmo sistema teste no software EMTP-ATP[®], para simular os sinais de tensão e corrente da rede sob influência das GICs; e
- Aprimorar a metodologia proposta em trabalho de graduação para a detecção de GICs, tornando-a mais robusta para aplicação em relés digitais e ferramentas de defesa por parte das concessionárias perante o órgão regulamentador.

1.4 Delimitação

Como delimitações deste trabalho, citam-se:

- A linha de transmissão utilizada nos estudos é a LT ALE SE – SMA3, para a qual foi feito um estudo estatístico, relacionando seus desarmes não justificados com a variação dos índices geomagnéticos K_p, A_p e Dst;
- As informações sobre os índices geomagnéticos foram tratadas e adaptadas ao fuso horário local;
- A referida linha foi modelada, parametrizada e simulada nos softwares OPENDSS[®] e EMTP-ATP[®] para a obtenção dos possíveis valores de GIC na região e dos sinais de corrente da rede para a ocorrência dessas GICs, respectivamente; e

- Uma técnica para extração de GICs é proposta, a qual é fundamentada nas operações da Morfologia Matemática e testada para o processamento dos sinais da rede simulada em EMTP-ATP®.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica realizada para o desenvolvimento deste trabalho, onde os conceitos teóricos e fenômenos relacionados às correntes geomagneticamente induzidas são apresentados. Além disso, é feita uma breve descrição da Morfologia Matemática, cujos operadores são utilizados na metodologia proposta.

No Capítulo 3 é apresentada a análise do histórico de desarmes da LT estudada, frente aos dados dos índices geomagnéticos para o mesmo intervalo de tempo, o qual evidencia a possibilidade da ocorrência de GICs na LT em questão e também é abordada a relação do ciclo solar com o mesmo histórico.

No Capítulo 4, descreve-se os dados técnicos da Linha de Transmissão, a utilização de um software para simulação de GICs, o sistema teste implementado para sua validação e a metodologia usada para o desenvolvimento da proposta da dissertação.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos e sua análise. No Capítulo 6, as conclusões são apresentadas. Nos Anexos A até F estão dispostos todos os meses catalogados no horizonte de estudo apresentado nesta dissertação.

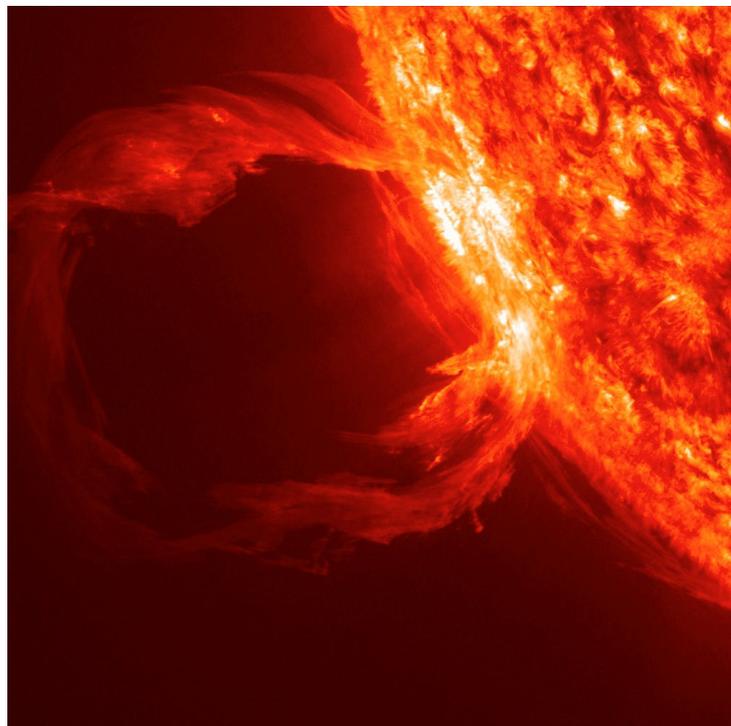
2 Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo, são abordados os conceitos relacionados ao fenômeno das GICs, tais como fundamentos sobre explosões solares e geomagnetismo. Também, são descritas as consequências do fenômeno sobre os sistemas elétricos de potência, bem como são apresentados os operadores da Morfologia Matemática, os quais foram aplicados na metodologia proposta para detecção das GICs.

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. (BOTELER; PIRJOLA, 1998)

Figura 1 – Explosões Solares.



Fonte – (NASA, 2015)

As manchas solares são basicamente linhas do campo magnético, conhecidas como loopings do sol, os quais são mostrados na Figura 1. Sua aparência muitas vezes está associada

com a descarga de grandes quantidades de matéria, chamadas de ejeções de massa coronal, compostas principalmente por hidrogênio e hélio ionizado. As explosões, com cerca de um milhão de graus Celsius na superfície do Sol, formam uma nuvem, chamada de vento solar, composta por íons e partículas subatômicas, as quais se movem em direção à Terra 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 (GICs) (GIRGIS et al., 2012).

O ciclo solar completo consiste em dois meio períodos de 11 anos cada, demarcados por reversões de polaridade do sol. Durante um semiciclo, as manchas solares estão em alinhamento com o campo magnético da terra, no outro, elas são antiparalelas. Picos de tempestades ocorrem no meio dos semiciclos 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).

Como verificado 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 aterramentos e demais caminhos à superfície terrestre, como linhas telefônicas, linhas de tubulação, estradas de ferro e linhas de transmissão. Também, estas perturbações geomagnéticas afetam sistemas de rádio comunicação, operação de satélites e redes de energia elétrica.

Por fim, ressalta-se que os sistemas de transmissão de energia elétrica tornam-se vulneráveis às perturbações solares quando compostos por linhas longitudinais (horizontais em relação as linhas do campo magnético terrestre), visto que sua vulnerabilidade à atividade solar está ligada à posição de seus terminais e nas latitudes geográficas distintas, tornando os países que se encontram próximos aos polos e abaixo de anomalias da magnetosfera mais susceptíveis à ocorrência de GICs (ANSARY, 2007).

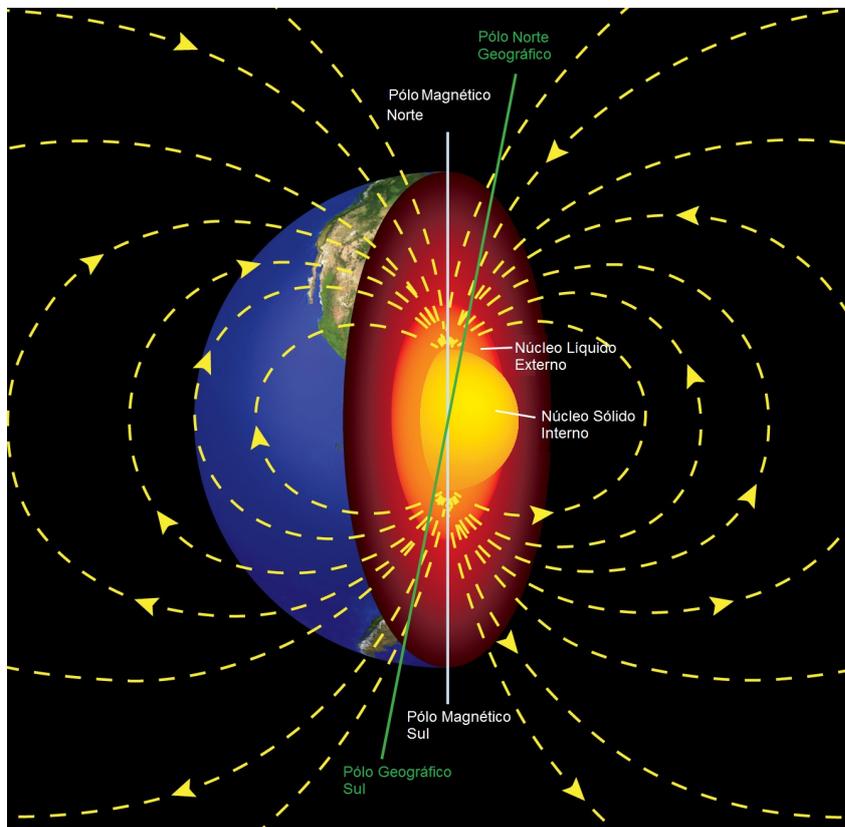
2.2 Campo Magnético Terrestre

A Terra comporta-se como um grande ímã, produzindo linhas de campo magnético, consequentemente, o campo magnético gerado pelo planeta se assemelha a um dipolo magnético, tendo seus polos magnéticos próximos aos polos geográficos, com diferença angular de aproximadamente $11,5^\circ$. Destaca-se que as linhas de campo da Terra saem do pólo Sul geográfico, que corresponde ao Norte magnético da Terra, em direção ao pólo Norte geográfico, o qual corresponde ao Sul magnético, estendendo-se por dezenas de milhares de quilômetros no espaço, formando a magnetosfera (HEINDL et al., 2011). É nesse campo que as partículas ionizadas provenientes dos ventos solares ficam aprisionadas, induzindo as GICs na superfície terrestre.

A teoria do dínamo é a mais aceita para explicar a origem do campo magnético terrestre que, de forma genérica, estende-se infinitamente, sendo que este se torna mais fraco conforme aumenta a distância em relação ao planeta.

Para melhor ilustrar o funcionamento do campo utiliza-se a Figura 2, a qual mostra o campo magnético da Terra circulando e atravessando toda superfície de maneira razoavelmente uniforme, lembrando assim um dipolo (ANSARY, 2007).

Figura 2 – Representação dos polos geográficos e magnéticos.



Fonte – (NASA, 2015)

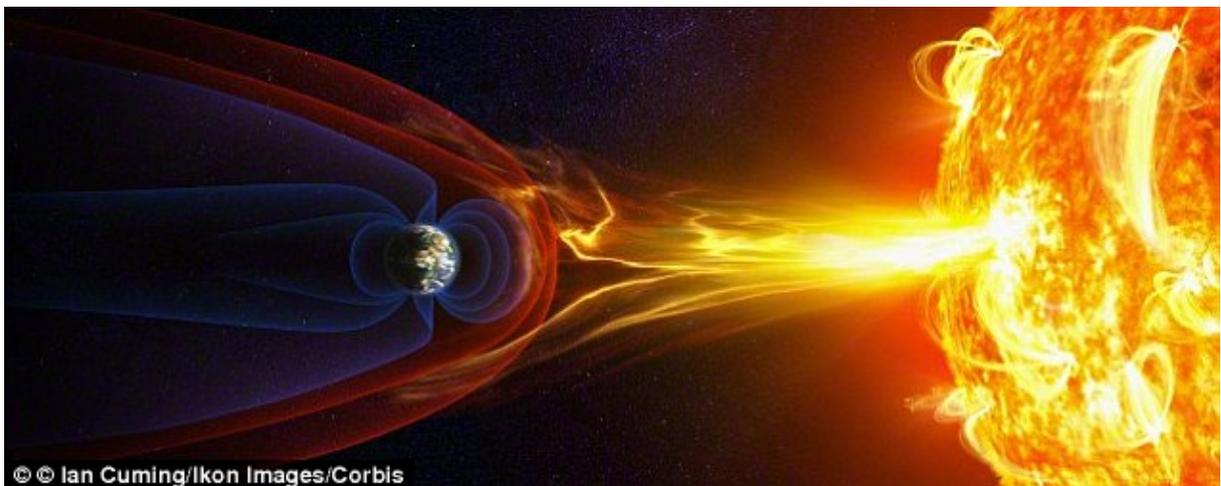
Entretanto, os geofísicos não aceitam esta convenção do ímã, onde as linhas de campo saem do sul geográfico para o norte geográfico. Na realidade, não há um ímã no núcleo terrestre e sim um fluido (MOORE, 2012). Estudos sobre o núcleo externo terrestre afirmam que nele existe um fluido eletricamente condutor, composto principalmente de ferro (Fe) e níquel (Ni) com uma alta condutividade elétrica dada por $\sigma = 5 \cdot 10^5 S/m$ (GIRGIS et al., 2013). Este fluido está em constante movimento, induzindo correntes elétricas que interferem no campo magnético original. Se não houvesse o movimento do fluido, o campo magnético da Terra se dissolveria lentamente ao longo do tempo e não haveria indução. Assim, afirmar que o campo magnético terrestre tem origem no núcleo externo da Terra, cujo sistema 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. (TOBERGTE; CURTIS, 2013).

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), a qual não sofre esta pressão, conforme mostrado na Figura 3.

O vento solar, por sua vez, além de partículas ionizadas, também traz consigo campos magnéticos que interagem com o campo magnético da Terra. Partículas carregadas e campos magnéticos acabam influenciando e interagindo uns com os outros. Normalmente, as partículas carregadas presentes nos ventos solares possuem energia na faixa de poucos milhares de elétrons-volts e seus campos magnéticos correspondentes apresentam intensidades na ordem de dezenas de nanoteslas, ocupando 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 (RT), direcionando e contendo partículas carregadas, tanto de origem solar quanto terrestre (BOTELER; PIRJOLA, 1998).

Figura 3 – Comportamento da magnetosfera no instante de uma explosão solar.



Fonte – (NASA, 2015)

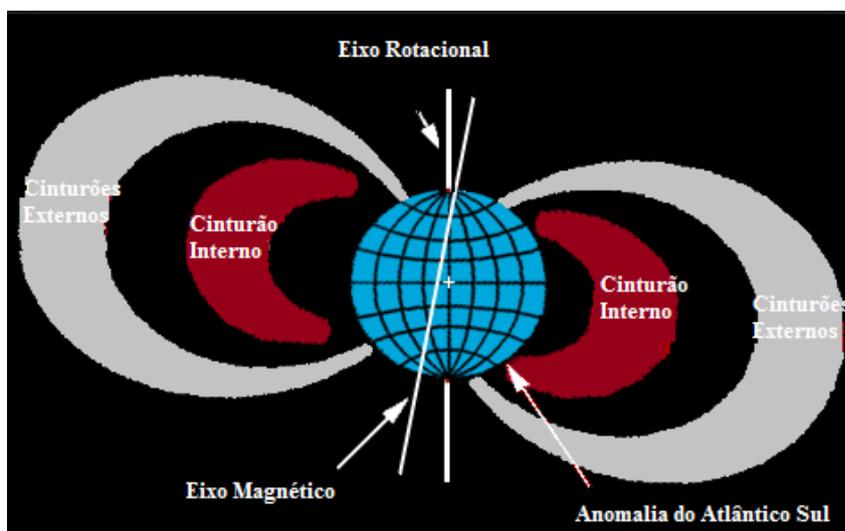
A continuidade e severidade do vento solar expandem a atmosfera externa do Sol. Este campo de origem solar é chamado de campo magnético interplanetário (*do inglês: Interplanetary Magnetic Field- IMF*), sendo inconstante próximo à Terra e possuindo uma intensidade de cerca de 5 nT. Com a rotação do Sol, o campo magnético é gerado e toma uma forma espiral (MOLINSKI, 2002).

2.2.1 Cinturões de Van Allen

Os Cinturões de Van Allen correspondem à região do campo magnético terrestre onde as partículas ionizadas são aprisionadas, sendo compostos por duas regiões de radiação, chamadas Cinturões de Radiação. Essa denominação é dirigida à parte mais energética do plasma preso ao campo magnético terrestre, onde existem íons com mais que 1MeV de energia, aproximadamente. (TOBERGTE; CURTIS, 2013).

Na Figura 4, o cinturão interno, que pode variar sua distância de 700 a 10.000 km (0,1 a 1,5 RT) de altitude, está na cor vermelha e o externo, que pode variar de 13.000 a 65.000 km (2 a 10 RT) de altitude, está na cor cinza. Note que a distância de cada cinturão de radiação varia enormemente de acordo com a latitude sobre a qual estão as partículas presas a eles.

Figura 4 – Cinturões de radiação e eixos rotacionais e magnéticos.



Fonte – (LEITHOLD; PEREIRA, 2006)

As fontes de partículas dos Cinturões de Radiação são o Sol e a galáxia, cujos íons são desviados, não pelo campo gravitacional, mas pelo campo magnético, que cria órbitas bem diferentes das originadas por campos gravitacionais. As partículas carregadas que ficam presas à Terra seguem as linhas de campo magnético, ao mesmo tempo em que circulam tais linhas centenas de vezes por segundo, resultando numa trajetória helicoidal, além de um terceiro movimento de translação ao redor da Terra.

Os movimentos das partículas eletricamente carregadas nas linhas de campo dos cinturões de radiação (magnetosfera interna) geram correntes elétricas que, por sua vez, geram um campo magnético próprio, o qual intensifica ligeiramente o campo magnético terrestre. Em Stern e Peredo (2003) afirmam que:

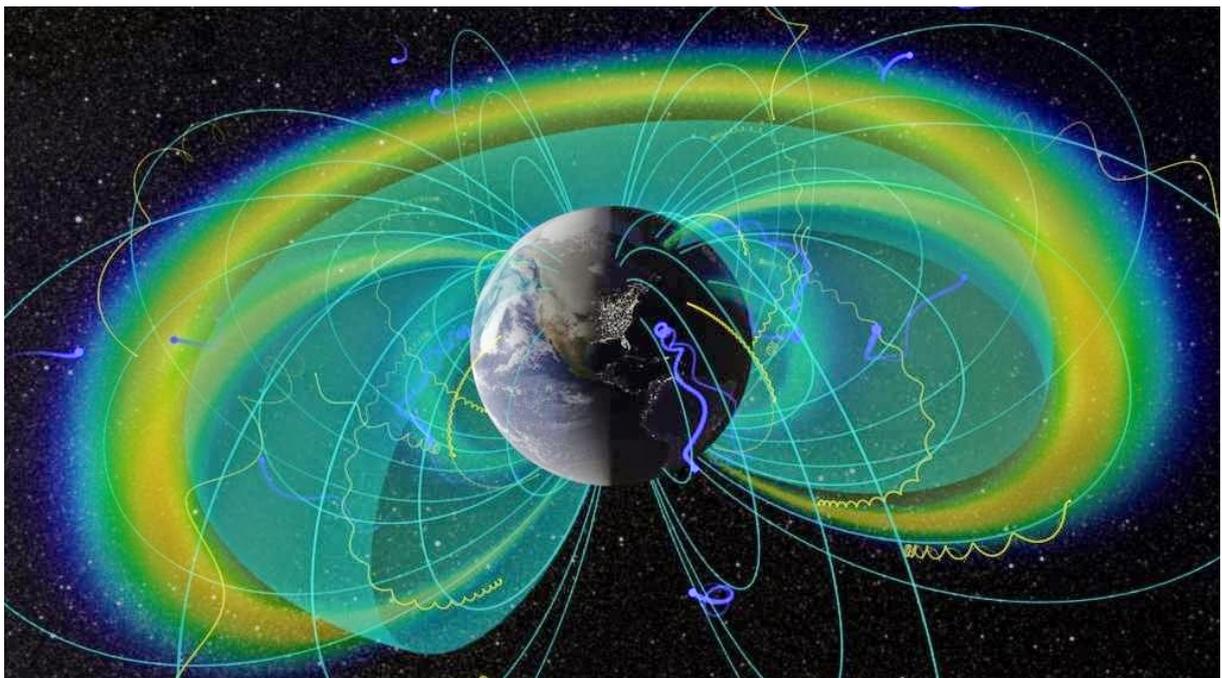
“Em típicas linhas de campo, unidas à Terra em ambas as extremidades, tal movimento conduziria logo as partículas à atmosfera, aonde colidiriam e perderiam sua energia. Entretanto, uma característica adicional desse movimento orbital geralmente impede que isto aconteça: o movimento da partícula retarda à medida que ela se move para as regiões onde o campo magnético é forte, chegando até a parar e inverter. É como se as partículas fossem repelidas de tais regiões, um contraste interessante com o ferro, que é atraído para onde o campo magnético é forte.”

Cabe ressaltar que o Cinturão Interno de Radiação ocupa uma região compacta sobre a linha do equador, apresentando uma baixa densidade e partículas com elevada energia (entre 10 e 100 MeV), as quais podem penetrar e danificar naves ou apresentar perigo para astronautas em exposição prolongada.

Já no cinturão externo, as partículas ionizadas apresentam energia típica de 50 keV, as quais são provenientes do vento solar e são atraídas pela longa cauda magnética da Terra, com suas linhas esticadas no lado noturno da magnetosfera, sendo capturadas no momento em que ocorreu uma tempestade magnética. (TOBERGTE; CURTIS, 2013)

Por fim, vale ressaltar que os dois cinturões de radiação requerem situações bem específicas para serem alimentados por novas partículas, sendo que estes eventos ocorrem com certa frequência, impedindo um déficit de partículas em grande quantidade ou a longos prazos (TOBERGTE; CURTIS, 2013). Na Figura 5, pode-se observar os cinturões de uma forma tridimensional facilitando assim sua visualização no espaço.

Figura 5 – Cinturões de Van Allen



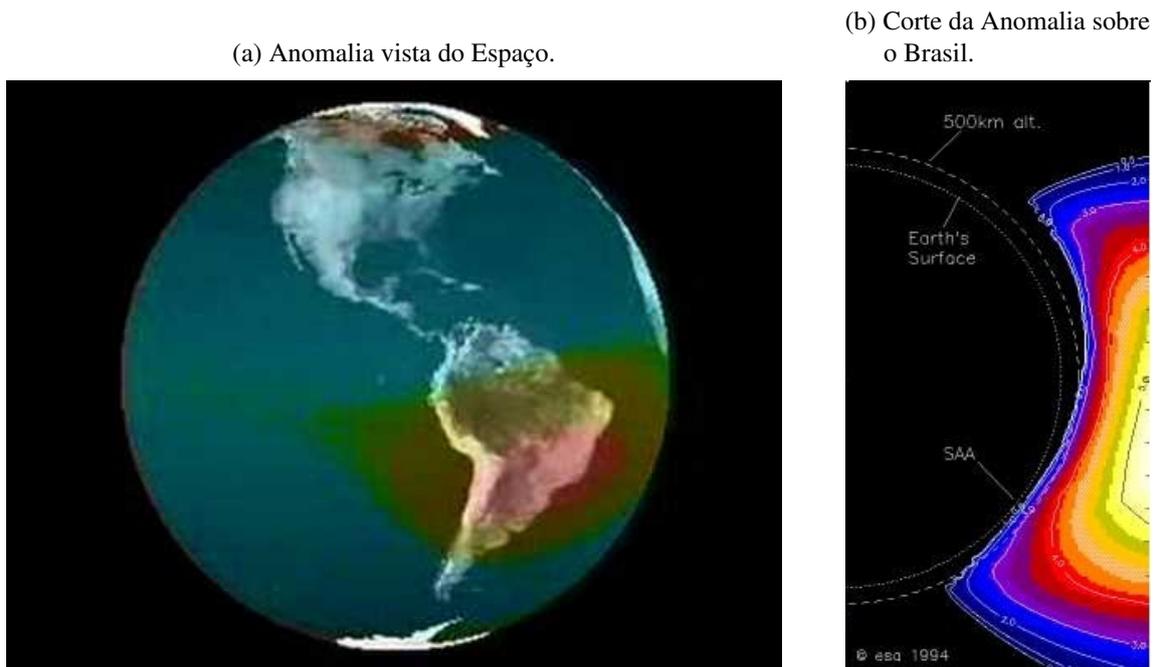
Fonte – (NASA, 2015)

2.2.2 Anomalia do Atlântico Sul

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul, designada pelas siglas AMAS ou SAA (do inglês: *South Atlantic Anomaly*), localiza-se na parte mais interna dos Cinturões de Van Allen, sendo a parte do campo magnético terrestre mais próxima da superfície do planeta. Isto resulta no fato de que, para uma dada altitude, a intensidade de radiação é mais alta nesta região do que em qualquer outra (LEITHOLD; PEREIRA, 2006).

A AMAS é produzida por um afundamento no campo magnético terrestre na região da América do Sul onde está localizada, e seu comportamento pode ser observado na Figura 6a, e na Figura 6b pode ser visualizado seu aprofundamento sobre o Brasil. Presume-se que é causada pelo fato do centro de o campo estar deslocado por, aproximadamente, 450 km em relação ao centro geográfico.

Figura 6 – Anomalia do Atlântico Sul.

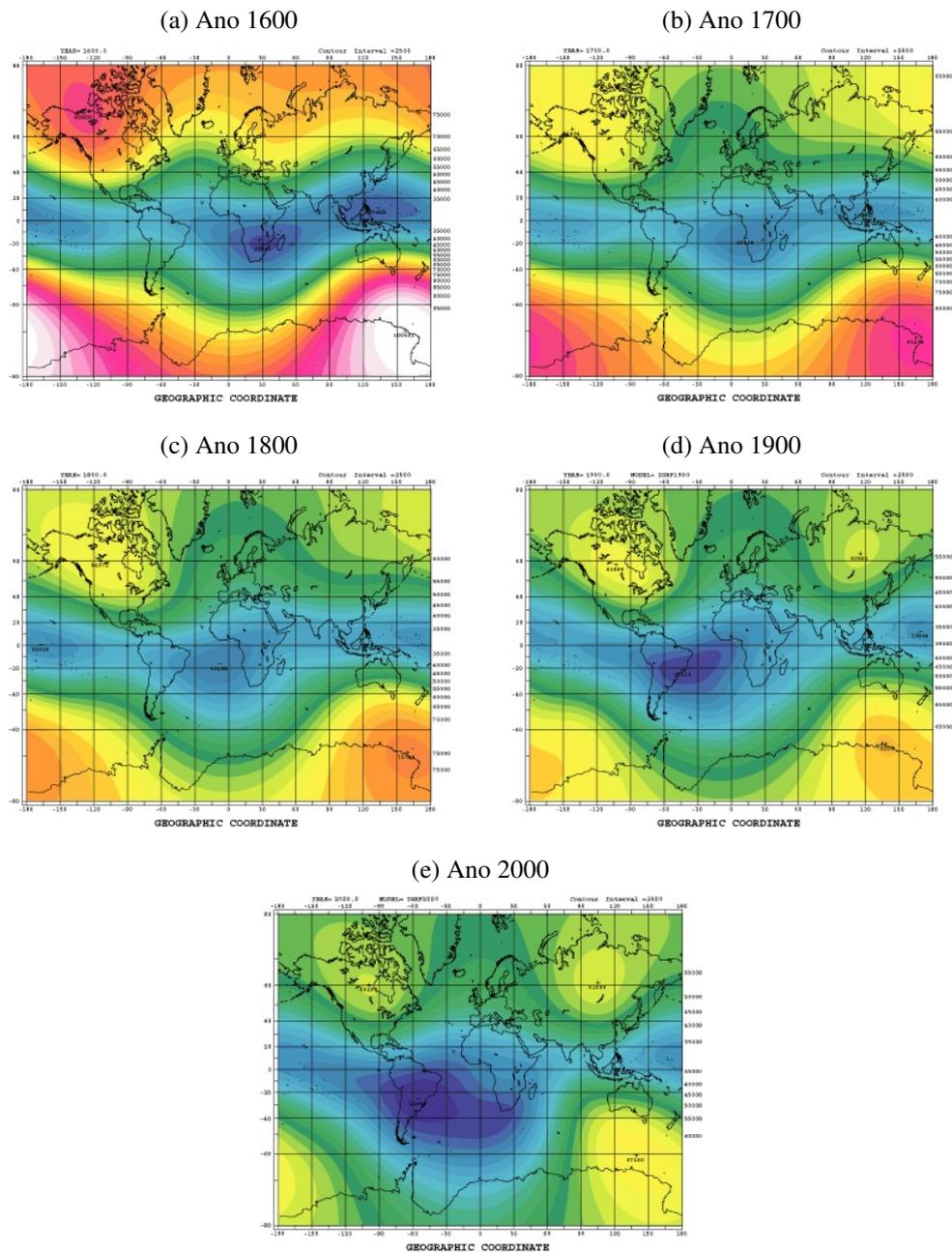


Fonte – (NASA, 2015)

Assim, a AMAS afeta satélites e facilita a ocorrência de correntes geomagneticamente induzidas na superfície terrestre. As espaçonaves e satélites que passam periodicamente pela região, de acordo com Tobergte e Curtis (2013), "ficam expostos durante vários minutos às fortes radiações que ali existem". Como exemplo, cita-se a Estação Espacial Internacional, a qual orbita o planeta com inclinação de $51,6^\circ$, necessitando de revestimento especial para suportar as fortes radiações oriundas do Sol, o Telescópio Espacial Hubble, que tem observações limitadas durante sua passagem sobre o Sul do Brasil. Destaca-se ainda que a AMAS sofre um deslocamento para oeste, com velocidade de $0,3^\circ$ por ano. Essa taxa de deslocamento é muito próxima da rotação diferencial entre o núcleo da Terra e sua superfície, estimada entre $0,3^\circ$ e $0,5^\circ$ por ano.

Na Figura 7, pode-se verificar a evolução da AMAS desde os anos 1600 até os anos 2000, sendo esta a região escura dos gráficos, a qual compreende o Brasil e representa um enfraquecimento do campo magnético terrestre.

Figura 7 – Progressão da Anomalia do Atlântico Sul.



Fonte – (MASAHITO, 1990)

2.3 Correntes Geomagneticamente Induzidas

Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs) são correntes espelho que surgem na superfície terrestre em função do movimento das partículas ionizadas presas ao campo magnético terrestre, o qual forma correntes elétricas em alta altitude (PINTO et al., 2008). Pirjola (2000) define GIC como:

“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 produzidas 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 entre os pontos de aterramento - o que faz com que GICs possam fluir através de transformadores, linhas de sistemas de potência e pelos pontos de aterramento.”

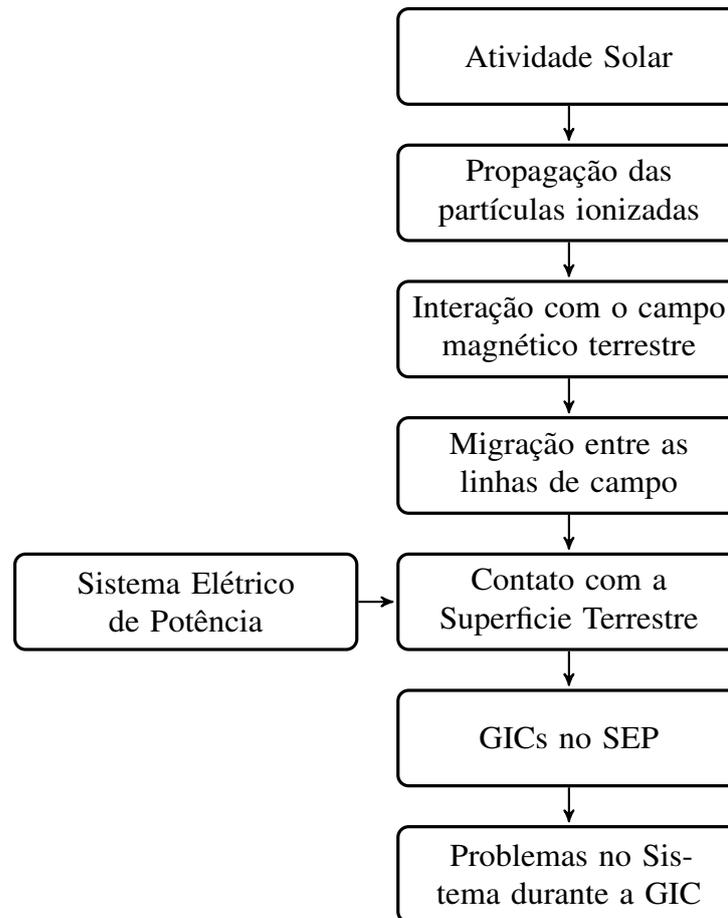
Durante as tempestades geomagnéticas não só a magnitude de campo magnético terrestre é relativamente grande em comparação com dias normais, mas também a sua taxa de variação. As tempestades causam variações do campo magnético de 1000 a 2000 nT e, assim formam as auroras em latitudes próximas dos pólos. No entanto são muito menores, em torno de 200 a 300 nT, em latitudes equatoriais e médias. Estas GICs 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 equipamentos ferroviários. De acordo com Girgis et al. (2012) “os transformadores podem ser saturados devido às GICs, resultando em efeitos nocivos e, possivelmente, até mesmo ao colapso de todo o sistema”. Ainda, Mustafa et al. (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.”

Especialmente, no caso das 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. Além disso, linhas de transmissão podem ter seu carregamento máximo violado, o que pode prejudicar as proteções da linha, os isolamentos da mesma e a qualidade da energia transmitida. No fluxograma da Figura 8 pode-se verificar os passos para o surgimento destas correntes no sistema elétrico de potência.

Além disso, ressalta-se que as GICs podem provocar sobrecarga em bancos de capacitores além de prejudicar os níveis de potência ativa e reativa produzidas por geradores síncronos, devido às distorções nos sinais que alimentam os reguladores de tensão, os quais controlam essas máquinas. Ainda, podem provocar a atuação indevida dos relés de proteção. Também, vale ressaltar que transformadores de potencial e de corrente estão sujeitos aos mesmos efeitos que os transformadores de potência.

Figura 8 – Fluxograma do processo de GIC no SEP.



Fonte – Autoria Própria

Portanto, os transformadores e demais componentes do sistema elétrico podem ser danificados, o que, eventualmente, provoca uma interrupção no fornecimento de energia, pela atuação indevida das proteções. Esses são apenas alguns exemplos do quanto as correntes geomagneticamente induzidas podem ser prejudiciais para os sistemas elétricos de potência. Nesse contexto, as GICs têm sido estudadas, principalmente, em regiões de latitude alta do hemisfério norte, onde a ocorrência de GICs em linhas de transmissão e transformadores são recorrentes.

Por fim, destaca-se que, 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 através de índices, dados por valores médios, e podem ser classificadas de acordo com as suas intensidades. Tais índices são descritos nas subseções a seguir.

2.3.1 Índices Geomagnéticos

Existem três índices geomagnéticos utilizados para classificar os níveis de interação eletromagnética entre o campo magnético terrestre e as atividades solares, sendo estes:

- Dst (Disturbance Storm Time): corresponde a intensidade da tempestade solar por hora. Os quais os dados são obtidos a partir dos dados médios dos observatórios geomagnéticos de Kakioka (JMA), Honolulu e San Juan (USGS), Hermanus (RSA), Alibag (IIG), NTIC, INTERMAGNET os quais estão localizados próximos a linha do equador em sua maioria. De acordo com Masahito (1990), a sua influência direta no Campo Magnético terrestre dura até 24 horas após sua ocorrência. Porém dependendo da intensidade da tempestade sua influência magnéticas pode ser detectada até 2 dias após sua ocorrência. A Tabela 1 apresenta os intervalos de classificação das tempestades solares por horas.

Tabela 1 – Classificação dos Distúrbios das Tempestade.

Índice Dst	
Tempestade Fraca	$-50 < Dst \leq -30nT$
Tempestade Moderada	$-100 < Dst \leq -50nT$
Tempestade Severa	$-150 < Dst \leq -100nT$
Tempestade Severa I	$-300 < Dst \leq -150nT$
Tempestade Severa II	$Dst \leq -300nT$

- Kp (Planetary Kennziffer): indica o grau de perturbação do campo geomagnético global, esse índice é obtido por meio de observações feitas em 13 observatórios distribuídos em torno da terra e consiste de um único dígito de 0 a 9 para cada intervalo de 3 horas do dia. E sua classificação pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do índice Planetarische Kennziffer.

Índice Kp - Ap	
Perturbação Fraca	$Kp \leq 5$
Perturbação Moderada	$5 < Kp \leq 6$
Perturbação Forte	$6 < Kp \leq 7$
Perturbação Severa	$7 < Kp \leq 8$
Perturbação Extremo	$8 < Kp \leq 9$

- Ap: Para facilitar as medições e classificação do grau de perturbação, foi criado o índice Ap corresponde a computação média de 8 laboratórios e corresponde a média de 3 horas durante evento de tempestade. Utiliza a mesma classificação do índice Kp que se apresenta na Tabela 2.

Estes dois índices estão unicamente associado ao evento de tempestade geomagnéticas e estão disponíveis em NASA-NOAA (1982).

2.3.2 Presença das GICs no Brasil

Conforme visto na Seção 2.2.2, o Brasil e grande parte da América do Sul estão localizados na região da chamada Anomalia do Atlântico Sul. Assim, todos os 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 indevida de algumas proteções podem estar relacionadas com as GICs.

No Brasil, o monitoramento 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 Pesquisas Espaciais (INPE).

Segundo Mustafa et al. (2013), foi observada a existência de duas razões para o acionamento indevido das proteções nessa região: ou estas aconteceram por falta de manutenção por parte da concessionária dos equipamentos relacionados à essas proteções, ou estas ocorreram por eventos de natureza geomagnética.

Ressalta-se que já foram constatadas GICs em São José (Furnas), Adrianópolis (Furnas), Magé (CERJ), Rio de Janeiro (capital), na Usina nuclear de Angra dos Reis, na 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 et al. (2008). Tais eventos provocaram desligamentos de grandes trechos do sistema elétrico brasileiro.

Alguns estudos acerca da ocorrência de GICs no Brasil já foram realizados, destacando-se os trabalhos de Mustafa et al. (2013) e Pinto et al. (2008). Apesar desses estudos, ainda não há a confirmação unânime da ocorrência de GICs no Estado do Rio Grande do Sul. Entretanto, somente agora este fenômeno vem sendo considerado pelo ONS como possível causa para desligamentos não programados do Sistema Elétrico de Potência.

2.4 Consequências das GICs 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 no tempo induz correntes nos condutores. Para expressá-lo de forma mais precisa, a lei de Faraday implica na existência de um campo elétrico durante uma variação temporal do campo geomagnético. Este campo elétrico, em seguida, direciona todas correntes para o sistema. (BOZOKI et al., 1996)

Observando a Figura 9, percebe-se que as GICs penetram nas linhas de transmissão pelos aterramentos dos transformadores das subestações e demais equipamentos aterrados.

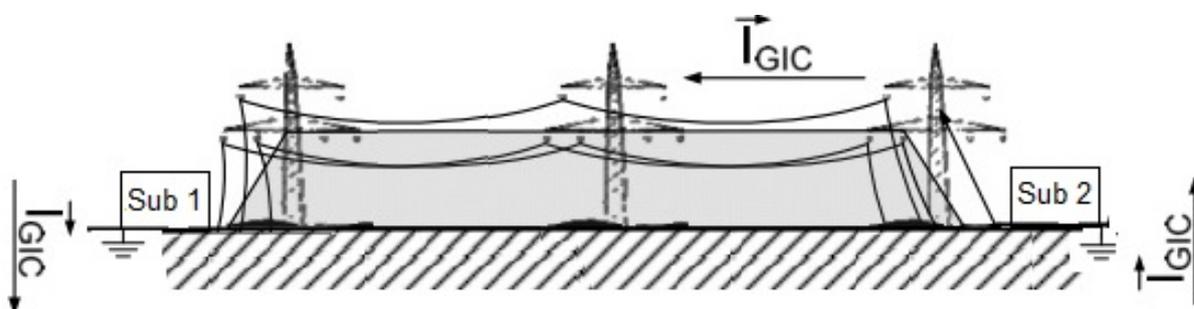
A força motriz para as GICs é a tensão induzida nas próprias linhas de transmissão, tanto pela corrente ionosférica e pela corrente à terra. Embora a GIC varie em magnitude, possui por características frequências muito baixas que, normalmente variam entre 0,1 a 0,01 Hz (quase CC) com magnitudes médias entre 0 e 15 A, podendo apresentar picos de até 100 A e frequências de até 0,5 Hz, com durações que variam entre poucos milissegundos até alguns minutos, as quais

perduram por períodos que variam de acordo com a intensidade da atividade solar (RAMÍREZ-NI, 2016).

Em relação ao período de duração, as GICs, na maioria dos casos, duram de 1 a 5 segundos, porém há registros da ocorrência de GICs com duração de 30 segundos e até com meia hora de atividade. (GIRGIS et al., 2013)

Na configuração apresentada na Figura 9, a corrente geomagneticamente induzida 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.

Figura 9 – Exemplo de como funciona o sistema elétrico de potência interligado, com presença de GICs.



Fonte – Autoria Própria

Uma vez que as GICs circulem no sistema elétrico, os relés de proteção podem atuar indevidamente sob a influência da sobrecarga imposta pela corrente geomagneticamente induzida (GIRGIS et al., 2013).

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 et al., 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. Alguns dos principais equipamentos prejudicados pela ação das GICs no sistema, são listados a seguir.

2.4.1 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. Ressalta-se que balancear uma rede em tais situações requer uma capacidade adicional significativa de potência reativa (PIRJOLA, 2000).

2.4.2 Transformadores de Potencial e de Corrente

Os transformadores de corrente (TCs) são fundamentais para o funcionamento adequado dos esquemas de proteção utilizados nos sistemas elétricos de potência, uma vez que a sua função é replicar as altas correntes primárias em menor escala no secundário, propiciando, assim, acesso aos sinais de corrente da rede. Esses transformadores, como qualquer outro com núcleo ferromagnético, estão sujeitos a um fenômeno conhecido como saturação. Um TC com núcleo saturado distorce a forma de onda no secundário, podendo causar a má atuação dos relés a ele conectados (DOS SANTOS, 2011). A saturação ocasiona aquecimento excessivo e consequentes danos, sendo que a vida útil dos transformadores nas zonas onde há ocorrência de GICs é menor do que o normal. A Figura 10 apresenta um transformador de corrente danificado pela ação das GICs (GIRGIS et al., 2012).

Figura 10 – Transformador de Corrente com o núcleo danificado.



Fonte – Laboratório de Pesquisa Geológica do Canadá em Ottawa.

2.4.3 Geradores

Os sinais distorcidos pela ação das GICs podem levar à variações das potências ativas e reativas, desbalanceamento de correntes e distorções harmônicas, provocando o sobreaqueci-

mento da máquina e aumento da vibração mecânica das partes fixas e móveis do gerador (PINTO et al., 2008).

2.4.4 Linha de Transmissão

Este é um dos principais componentes atingidos pelas GICs no sistema elétrico de potência. Com a inserção de harmônicas, pode haver variação da componente fundamental da tensão e isto leva a variação dos limites que a linha suporta, provocando a atuação das proteções e o comprometimento de sua vida útil.

Em especial destaca-se que as linhas subterrâneas que funcionam com o potencial elétrico induzido entre a tubulação e o solo, tendo sua taxa de corrosão aumentada, a vida útil do material ou de partes dele se compromete também. (PIRJOLA, 2000).

2.4.5 Sistemas Interligados

Com a saturação de um transformador, ocorre o consumo elevado de reativos e o surgimento de harmônicas. Isso pode 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 et al., 2008).

2.5 Morfologia Matemática Aplicada a Processamento de Sinais

A morfologia matemática fundamenta-se na teoria de conjuntos, possibilitando a extração de amostras a partir da escolha apropriada de um elemento de comparação, denominado Elemento Estruturante ou SE (do inglês: *Structuring Element*).

De acordo com Wu, Lu e Ji (2009), a aplicação destes operadores ao processamento de sinais em sistemas elétricos de potência é possível, pois essas operações morfológicas convertem uma imagem ou um sinal em uma descrição quantitativa de sua estrutura geométrica. Sendo assim, os operadores morfológicos relacionam uma imagem ou um sinal com o seu SE, ao possuir uma imagem própria, modifica-se a imagem ou sinal original em outra imagem ou sinal através da comparação com o SE.

Primeiramente, foram desenvolvidos operadores morfológicos binários para a aplicação em processamento de imagens ou sinais binários, os quais foram definidos como operadores de dilatação e de erosão. Dados dois conjuntos S e B , representando, respectivamente, um sinal binário e um SE binário, o operador de dilatação é definido como a união entre os conjuntos resultantes das translações do conjunto S com cada elemento do conjunto B multiplicado por

menos 1, conforme a Equação 2.1 (DOS SANTOS, 2011).

$$S \oplus B = \bigcup_{b \in B} S_{-b} \quad (2.1)$$

Onde S_{-b} conjunto resultante da translação de S com cada elemento de B multiplicado por menos 1, definido abaixo.

$$S_{-b} = \{s - b | s \in S\} \quad (2.2)$$

O operador de erosão é definido conforme a Equação (2.3). Onde S_b representa cada conjunto resultante da translação de S com cada termo de B, conforme (2.4).

$$S \ominus B = \bigcap_{b \in B} S_b \quad (2.3)$$

$$S_b = \{s + b | s \in S\} \quad (2.4)$$

A morfologia binária foi estendida para o processamento em escala de cinza, onde os operadores morfológicos básicos de dilatação e de erosão são dados pelas Equações (2.5) e (2.6).

$$(S \oplus B)(n) = \max_{(n-v) \in S, v \in B} \{s(n-v) + b(v)\} \quad (2.5)$$

$$(S \ominus B)(n) = \min_{(n+v) \in S, v \in B} \{s(n+v) - b(v)\} \quad (2.6)$$

Vale ressaltar que o operador morfológico de erosão diminui os picos e expande os vales de um sinal, enquanto que o operador de dilatação promove o contrário, isto é, suprime os vales e expande os picos. Os operadores morfológicos de erosão e dilatação foram utilizados na técnica proposta para a detecção de GICs, apresentada no Capítulo 4. Tais operadores foram devidamente modificados para a aplicação em questão, permitindo a extração precisa das componentes contínuas dos sinais de corrente.

2.6 Considerações Finais

Neste Capítulo, introduziram-se os fundamentos das Correntes Geomagneticamente Induzidas, bem como os conceitos a cerca dos fenômenos geomagnéticos englobados. Esta abordagem teórica foi desenvolvida com o objetivo de fornecer os conhecimentos necessários para a realização desta pesquisa. Foram abordados conceitos sobre a origem das GICs, os índices geomagnéticos, bem como foram relatados os fatos que apontam para sua ocorrência dentro do Sistema Elétrico brasileiro.

Destaca-se que as Correntes Geomagneticamente Induzidas podem implicar na operação indevida dos relés de proteção ou no comprometimento da vida útil dos componentes conectados no SEP. As consequências deste fenômeno também foram apresentadas neste Capítulo, sendo também abordados principais conceitos da morfologia matemática, a qual é aplicada na formulação da técnica proposta para detecção de GICs.

Nesse contexto, o Capítulo seguinte apresenta a comparação entre a variação dos índices geomagnéticos e histórico dos desarmes não justificados da LT Alegrete - Santa Maria, bem a como a possível influência do Ciclo Solar sobre a ocorrência das GICs no SEP Regional.

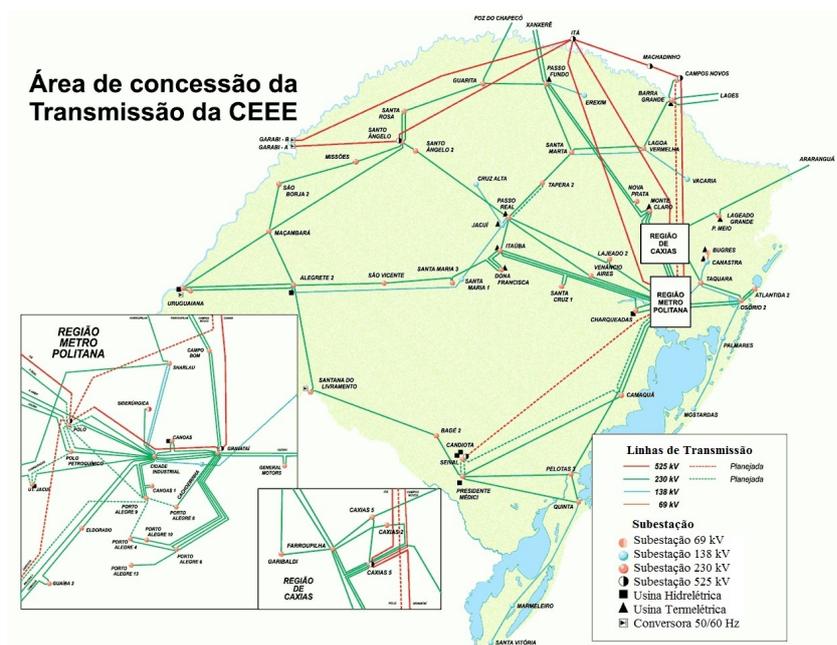
3 GICs, Índices Geomagnéticos e O Ciclo Solar

Este Capítulo apresenta uma análise do histórico de desligamentos não programados da Linha de Transmissão ALE SE- SMA 1 de 138 kV, para os quais não foram apresentadas justificativas perante os órgãos regulamentadores, de modo a relacioná-los com a atividade solar e a possível ocorrência de GICs nessa linha. Para tal, foram analisados os índices Dst, Kp e Ap para horizonte de 6 anos. Também, é apresentado a questão do ciclo de manchas solares para o mesmo horizonte de estudo.

3.1 GICs e Índices Geomagnéticos: Suas relações e possível influência sobre o SEP Regional

A Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE-GT) é responsável por parte da transmissão de energia elétrica do Rio Grande do Sul, como mostra a Figura 11. Sendo assim, a linha de transmissão (LT) em estudo pertence à área de concessão desta companhia, sendo esta denominada ALE SE- SMA 1 de 138 kV, localizada entre as cidade de Alegrete e Santa Maria (ANEEL, 2016). Nesta seção, é apresentado um estudo referente à possível relação entre a variação dos índices geomagnéticos e os desarmes desta LT em um intervalo de 6 anos.

Figura 11 – Área de concessão da Transmissão da CEEE-GT.

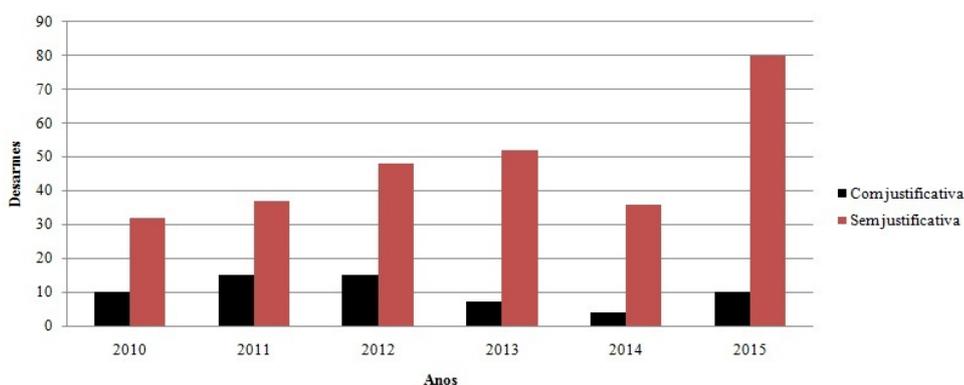


Fonte – (CEEE, 2016)

De acordo com relatórios da CEEE e ONS, os desarmes desta LT são constantes e sem justificativas perante o órgão regulamentador (ANEEL), o qual aplica multas severas às concessionárias em caso de desligamentos não programados sem justificativa comprovada.

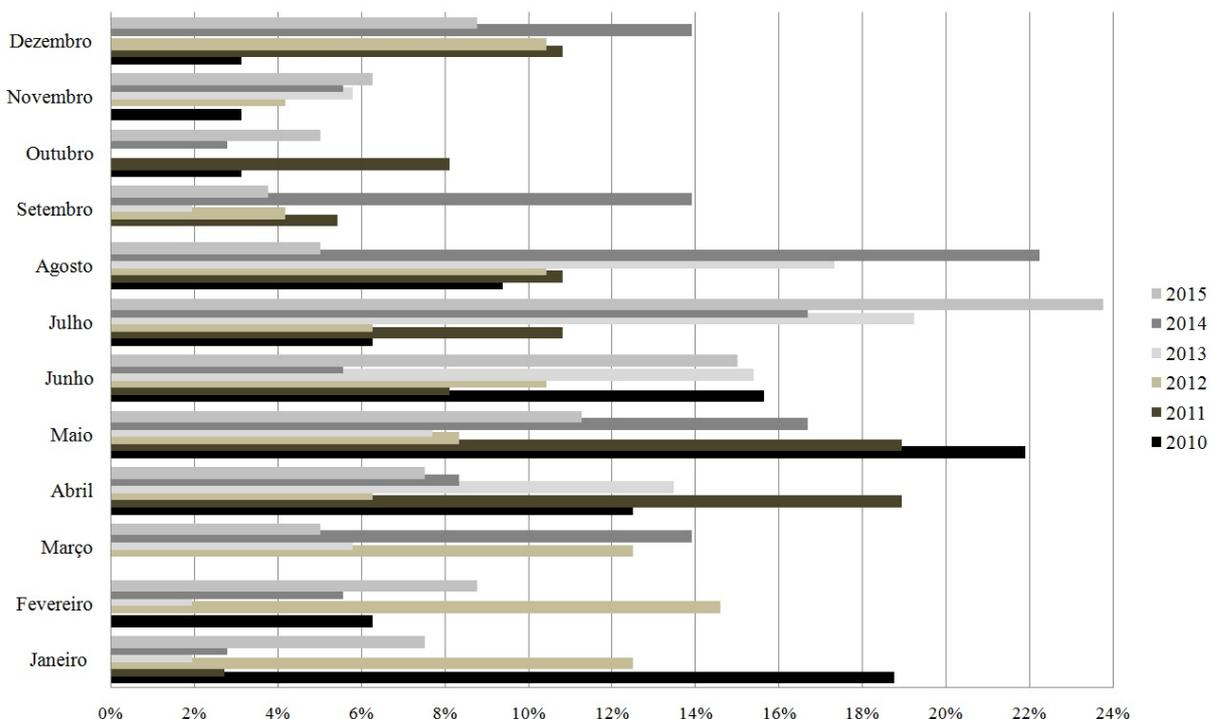
Na Figura 12, destaca-se nas colunas vermelhas os desarmes sem justificativa e seu aumento significativo ao longo dos anos. As colunas na cor preta representam desarmes justificados, como por exemplo, aqueles causados por temporais, queimadas ou manutenções forçadas na linha. Então, constata-se que no ano de 2010 dos desarmes que ocorreram, 10 foram justificáveis e os outros 32 não apresentaram justificativas, sendo que, para sua ocorrência, a agência regulamentadora aplicou multas sobre a concessionária em questão. Os anos de 2011, 2012 e 2013 seguiram nesta mesma lógica. Os desarmes foram acontecendo com alguns poucos apresentando justificativa. No total, para o horizonte de estudo 285 multas foram cobradas da CEEE por desligamentos não programados e sem justificativa, enquanto apenas 61 desarmes foram justificados. Isso representa um elevado custo de operação da linha, visto que, na maioria dos casos, os desarmes ocorrem por motivos desconhecidos.

Figura 12 – Relação de desarmes de 2010 a 2015.



A Figura 13 apresenta a porcentagem dos desarmes mensais não justificados para cada ano do horizonte de estudo. Para o ano de 2010 o mês de Maio foi o mês que mais teve desarmes, em torno de 22%. Já para o ano de 2011, os meses de Maio e Abril arrebatarem 19% dos desarmes totais deste ano. Já no ano de 2013 o mês de Julho obteve 19% dos desarmes anuais, e para 2014 o mês de Agosto arrebata 22% dos desligamentos daquele ano. Finalmente, no ano de 2015, o mês de Julho alcançou 24% dos desarmes. Destaca-se que nos meses correspondentes ao inverno e outono ocorreram a maioria dos desarmes anuais, contrariando a ideia de que o verão seria a estação mais propícia à ocorrência de GICs, por ser a estação com maior índice de incidência da radiação solar. Vale ressaltar que, devido a Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul, a qual é uma mancha de fluxo invertido do campo magnético terrestre, isto é, uma mancha com fluxo magnético direcionado para dentro, os desarmes podem ocorrer em qualquer época do ano, não necessitando estarem nos períodos de maior incidência solar, dia ou noite.

Figura 13 – Relação mensal de desarmes por ano.



A partir da análise dos desarmes não justificados da LT em questão e dos índices geomagnéticos medidos para o mesmo horizonte de estudo, foi levantada a hipótese de que, para esses desligamentos não programados, a ocorrência de GICs na LT estudada pode justificar esses eventos, conforme mostrado a seguir. Sendo assim, cabe ressaltar que os dados do índice geomagnético Dst, são fornecidos pela Universidade de Kyoto de acordo com Masahito (1990). Esses dados foram ajustados para ficarem de acordo com o fuso horário de Brasília-DF, uma vez que se encontravam no fuso japonês. Ressalta-se que o horário de verão brasileiro foi devidamente considerado para este ajuste. De acordo com a literatura especializada (MUSTAFA et al., 2013) e com a própria fonte dos dados de Dst, os distúrbios devem ser considerados relevantes em até, no máximo, dois dias depois de sua ocorrência, sendo que, após este período ele se torna irrelevante para os efeitos considerados neste trabalho.

Ainda deve-se destacar que, para os outros dois índices geomagnéticos, Kp e Ap, de acordo com a NASA, a influência no Sistema Elétrico de Potência é mais direta, isto é, quando têm-se uma distorção do campo magnético assume-se que, no máximo, em algumas horas pode haver alguma influência sobre o SEP. Os índices Kp e Ap são fornecidos pelo Centro Nacional de Informação Ambiental (NOAA-NASA) Colorado, EUA e estão disponíveis no site (NASA-NOAA, 1982). Estes dados também foram ajustados para o fuso horário do Brasil.

Assim, as Figuras 14, 16, 18, 20, 22 e 24 representam os gráficos dos índices geomagnéticos em função do tempo, sendo que em (a)são apresentados valores em nano Tesla,

unidade atribuída ao Dst. Em (b), têm-se o valor de Kp, e em (c), os valores de Ap. Ressalta-se que os índices Kp e Ap não possuem unidades. Destaca-se ainda que as linhas vermelhas presentes nos três gráficos representam os desarmes da LT, sendo que o valor alto (diferente de zero) representa o período em que a LT esteve desligada. Por fim, o eixo correspondente ao tempo está dividido em dias conforme o mês analisado, os quais estão subdivididos em horas. Tais gráficos foram feitos com o objetivo de demonstrar as variações do campo magnético anteriores ou simultâneas aos desligamentos da linha, de modo a evidenciar a possível relação dos fenômenos geomagnéticos e, conseqüentemente, da ocorrência de GICs com esses desarmes.

Além disso, as Figuras 15, 17, 19, 21, 23 e 25 representam os em forma de pizza, em (a), demonstram a porcentagem dos desarmes verificados para determinado ano, dentro do horizonte de estudo, os quais não apresentaram justificativa. Estes foram subdivididos em eventos antecipados ou não por variação dos índices geomagnéticos em relação ao total anual de desarmes. Já em (b), são apresentadas as porcentagens dos desarmes não justificados, os quais foram antecipados por perturbações do campo magnético, relacionados à variação de cada um dos índices, ou suas combinações, dentro dos intervalos considerados plausíveis para influência no sistema elétrico de potência. Destaca-se que, quando se trata dos conjuntos nos quais considera-se o índice Dst (quando há variação do Dst e Kp, por exemplo) o intervalo de tempo a ser considerado deve ser menor do que 12 horas, pois os índices Kp e Ap são índices que demonstram perturbações do campo magnético, as quais produzem e fazem intervalos de tempo menores do que aquelas representados pelo Dst. Portanto, intervalos maiores que estes, de 24 e 48 horas, foram analisados somente para o índice Dst.

Ainda, sabendo que a atividade magnética deve existir, destaca-se que as tempestades magnéticas e as perturbações do campo geomagnético global de intensidade fraca não foram consideradas nesta análise.

Sendo assim, na Figura 14, é possível observar que o houveram desarmes nos dias 6, 8, 15, 19, 21 e 31 do mês de Maio de 2010, todos aproximadamente com um minuto de duração. Contudo somente os índices Kp e Ap demonstraram uma variação de 7 a 9 unidades. E esses valores caracterizam Perturbações Severa e Extrema do campo magnético terrestre, respectivamente, conforme na Tabela 2. Já o desarme do dia 19 teve duração de uma hora e quinze minutos, ocorrido após uma variação do do índice Ap que, a qual apontou, de acordo com a Tabela 2, representa uma Perturbação Forte do campo magnético. Por fim, destaca-se que, para o desarme do dia 31, os índices Kp e Ap apresentaram valores que caracterizam Perturbações Fracas do campo magnético. Entretanto, o índice Dst apresentou uma forte variação menos de 48 horas antes do desarme mencionado, chegando ao valor de -80nT, o qual se enquadra na faixa classificada como Tempestade Moderada, conforme a Tabela 1 da seção 2.3.1.

Com base na Figura 15a, pode-se observar que, do total de desarmes para o ano de 2010, 40% ocorreram após a variação de algum índice geomagnético, podendo estes estarem relacionados à fenômenos geomagnéticos e, conseqüentemente, à ocorrência de GICs na linha

estudada. Já Figura 15b, demonstra que, dos 40% de desarmes antecedidos por variações do campo magnético terrestre, 41% foram antecedidos por variação de Ap e 23% por variação de Kp. Ainda, destaca-se que 24% dos desarmes considerados terem sido antecipados pela variação destes dois índices. Por fim, 12% dos desligamentos não justificados ocorreram após a variação do índice Dst, não sendo verificado nenhum caso com variação simultânea de Dst e Kp, ou Dst e Ap, ou ainda Dst, Ap e Kp.

Figura 14 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

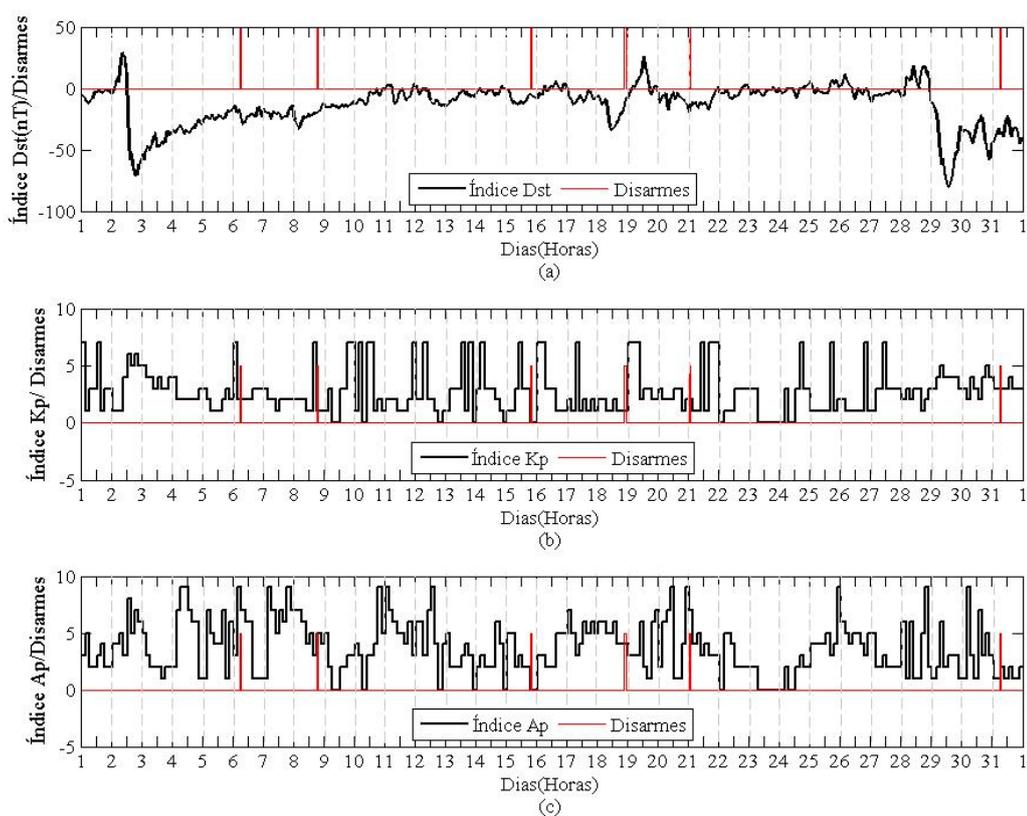
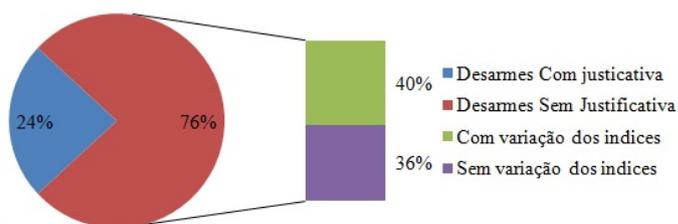
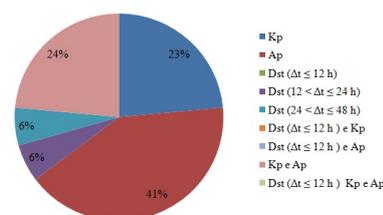


Figura 15 – Estudo estático sobre relação de desarmes do ano de 2010 com os índices Geomagnéticos

(a) Relação de desarmes e variações de índices geomagnéticos do ano de 2010.

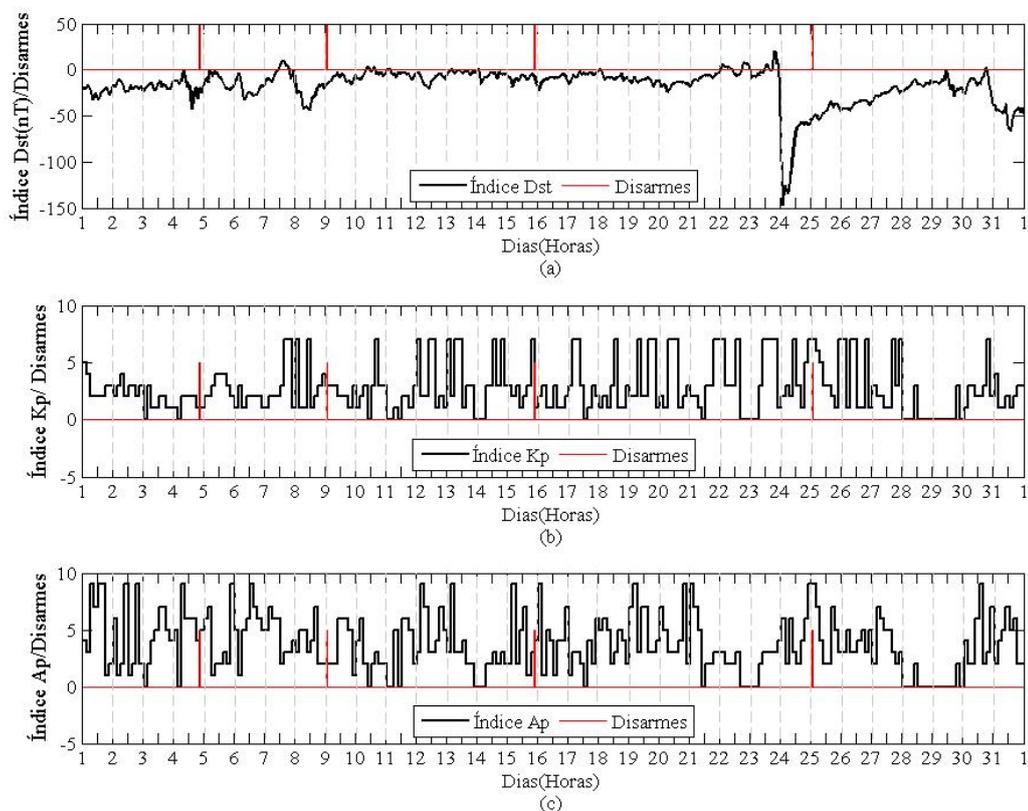


(b) Índices com maior variação no ano de 2010.



Na Figura 16, é possível observar os desarmes na LT estudada referentes ao mês de Outubro do ano de 2011. Para o referido período, foram verificados desarmes nos dias 4, 8, 9, 15 e 25.

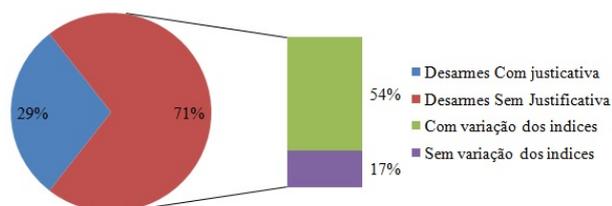
Figura 16 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.



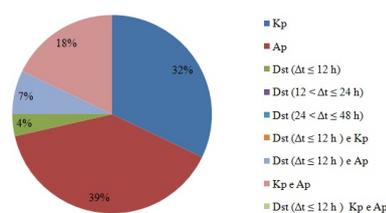
No caso dos dias 4 e 9, houveram variações do índice Ap, as quais podem ser enquadradas como Perturbações Moderadas, respectivamente. Já para o desarme do dia 15, pode-se verificar que ocorre grande variação do índice Ap poucas horas antes do ocorrido. Porém, o desarme do dia 25 foi antecedido pelo distúrbio dos três índices, sendo verificada uma grande variação do índice Dst, caracterizando uma Tempestade Severa I, além das medições de Ap e Kp, as quais caracterizam Perturbações Severa e Extremo, respectivamente.

Figura 17 – Estudo estático sobre relação de desarmes do ano de 2011 com os índices Geomagnéticos

(a) Relação de desarmes e variações de índices geomagnéticos do ano de 2011.



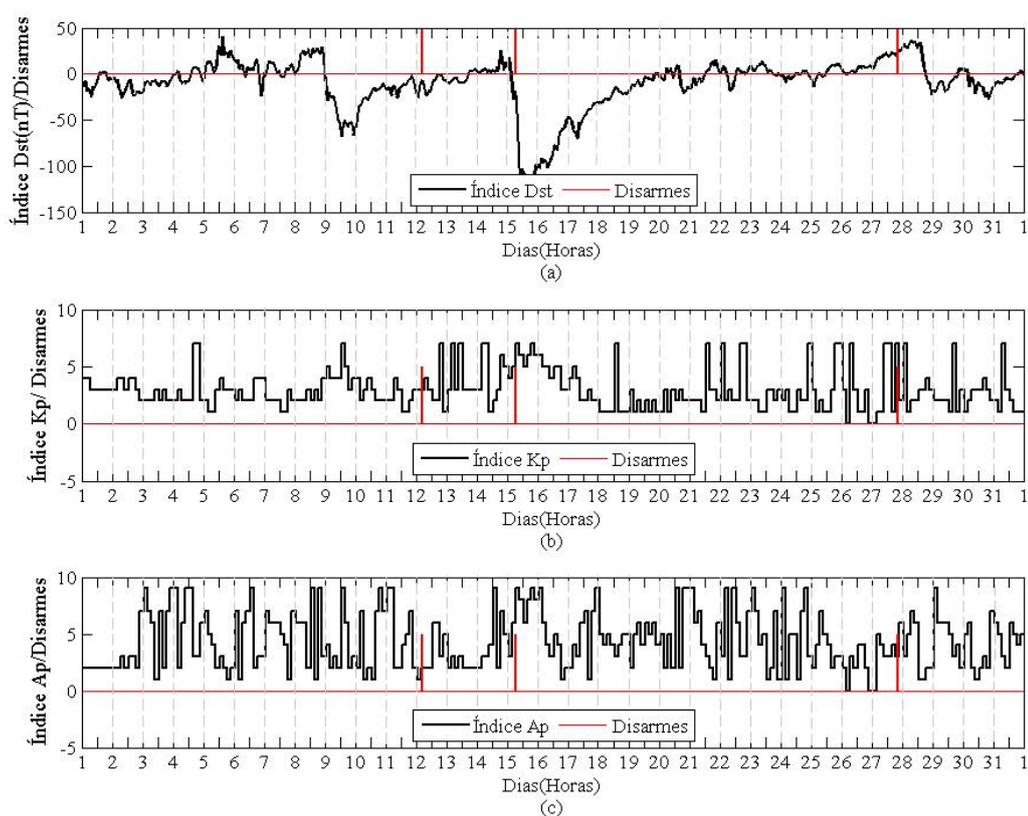
(b) Índices com maior variação no ano de 2011.



A Figura 17a mostra que, dentre todos os desarmes verificados para o ano de 2011, 71% não apresentaram justificativa, sendo que 54% do total de desarmes coincidiram com a variação de algum dos índices geomagnéticos, ou uma de suas combinações. Assim, a Figura

17b mostra que, dos 54% de desarmes sem justificativa antecedidos por atividade geomagnética, 39% ocorreram após a variação do índice Ap, logo atrás 32% após a variação do Kp e 18% após a variação de Kp e Ap em conjunto. Ainda, pode-se destacar que 7% dos desarmes em questão ocorreram após variação dos índices Dst e Ap em conjunto. Por fim, 4% dos desarmes sem justificativa antecedidos por atividade geomagnética aconteceram após a variação do Dst em um intervalo menor do que 12 horas antes da ocorrência do desarme.

Figura 18 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2012 com o Dst, Kp e Ap.



Outro caso a ser destacado é o do mês de Julho de 2012, cujos índices geomagnéticos e desarmes ocorridos para o referido mês são mostrados na Figura 18, onde é possível verificar que ocorreram desligamentos indevidos da LT nos dias 12, 15 e 27. Para os eventos nos dias 12 e 27, somente Kp e Ap sofreram alteração, caracterizando Perturbações Severas. No entanto, para o desarme do dia 15, pode-se observar que o Dst foi a -128 nT, caracterizando uma Tempestade Severa, seguida por alterações de Kp, o qual foi medido em 7 unidades, e de Ap que foi medido em 9 unidades, caracterizando uma Perturbação Severa e extrema, respectivamente.

Pela Figura 19a, dentre todos os desarmes verificados para o ano de 2012, 75 % desses eventos não apresentaram justificativa, sendo que a concessionária foi multado em todos esses casos pelo órgão regulamentador. Do número total de desarmes, 48% apresentaram variação de algum índice geomagnético ou de algum conjunto destes. Sendo assim, a Figura 19b mostra a grande variedade de variações de índices ou do conjunto destes antecedendo os desarmes não justificados. Entretanto, cabe destacar que a maior parte dos desligamentos sem justificativa

ocorreram após a variação do índice Kp (23% dos casos). Destaca-se ainda que 17% dos casos ocorreram após a variação do índice Ap e 13%, após a variação simultânea dos índices Ap e Kp.

Figura 19 – Estudo estático sobre relação de desarmes do ano de 2012 com os índices Geomagnéticos

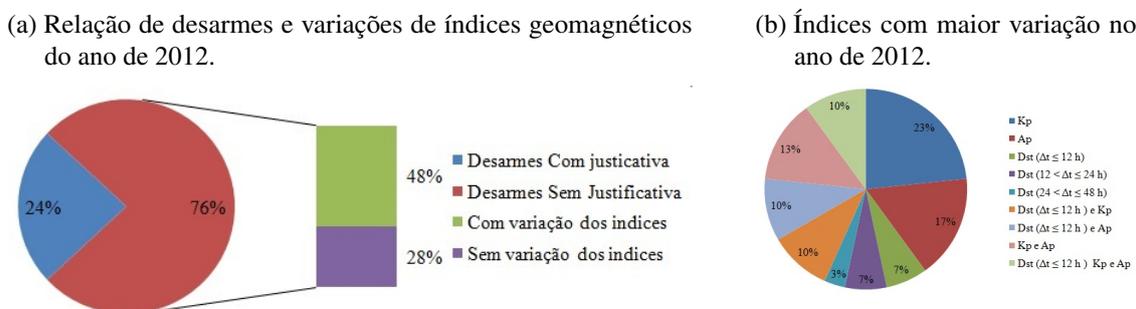
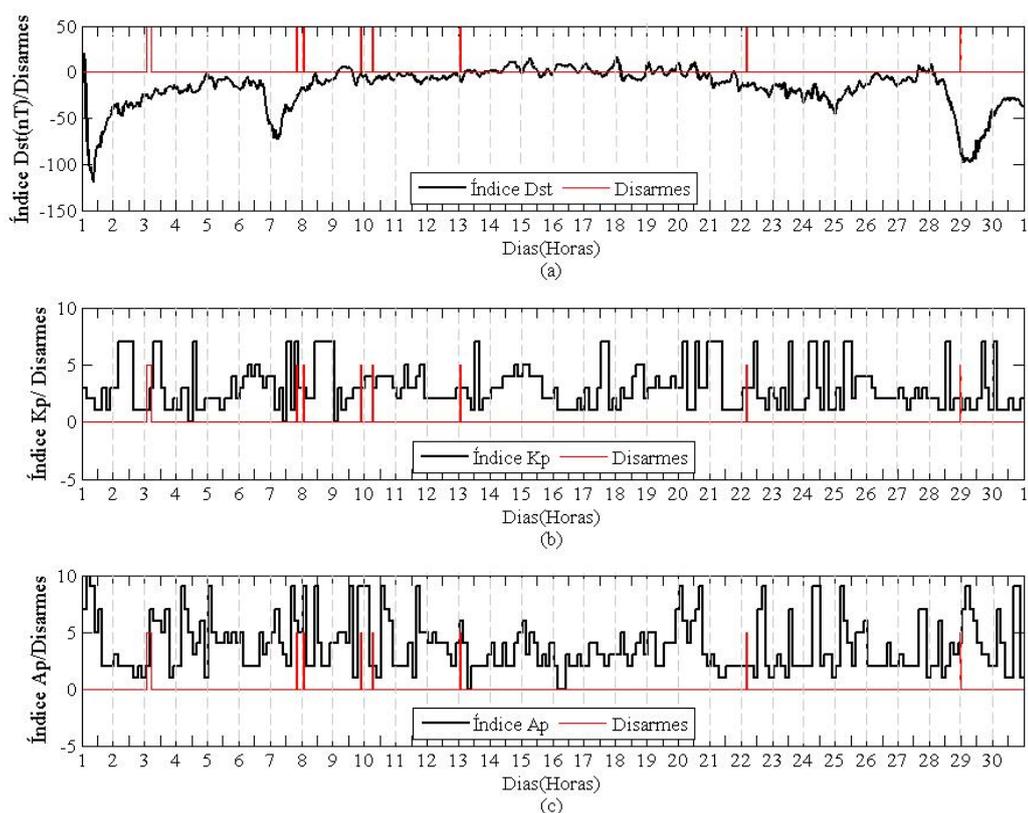


Figura 20 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

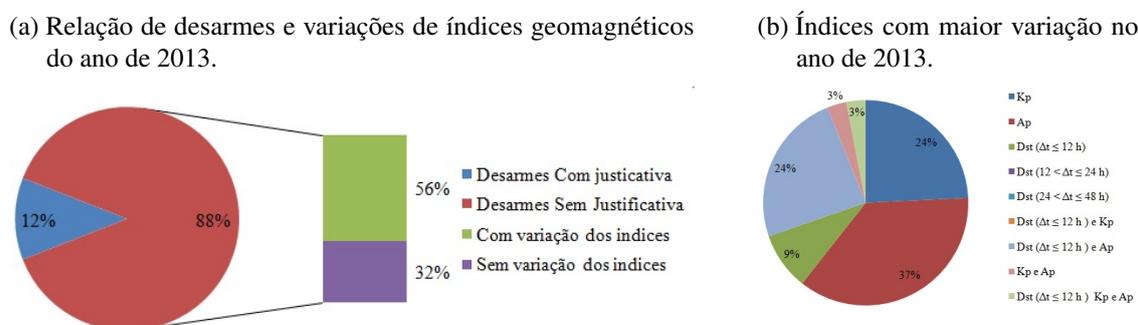


Para o ano de 2013, destaca-se o mês de Junho, para o qual os desarmes não justificados ocorreram nos dias 3, 7, 8, 9, 10, 13, 22 e 28, conforme mostrado na Figura 20. Ressalta-se que o desarme do dia 3 durou aproximadamente 3 horas, justamente quando todos os índices sofreram grandes alterações antes da ocorrência do referido desligamento, caracterizando uma Tempestade Moderada (segundo o índice Dst), e sendo a Perturbação do campo classificada como Severa (segundo os índices Kp e Ap). Nos dias 7 e 8 ocorreram desarmes, que coincidiram com uma deformação extrema do campo magnético, de acordo com a Tabela 2. Nos dias 10, 13, 21 e 22

somente o Kp e o Ap apresentaram alterações que se enquadram em um grau de Perturbação Forte a Severo, exceto para o dia 21, para o qual as medições de Kp e Ap indicaram Perturbação Fraca do campo magnético. Contudo, no dia 28 houve variação do Dst juntamente com os índices Kp e Ap, caracterizando uma Tempestade Severa e um grau de Perturbação Extremo.

A Figura 21a mostra a relação de desarmes com e sem justificativa para o ano de 2013, sendo que 88% desse total foram classificados como sem causa aparente, sendo 56% antecipados por variações dos índices geomagnéticos. Ainda, a Figura 21b demonstra-se que os desarmes ocorridos após é a variação do Dst, em conjunto com os demais índices ou não, somam 36% dos casos. Já para os índices Kp e Ap, o número de desarmes antecipados por suas variações atingiram 24% e 37% dos casos, respectivamente.

Figura 21 – Estudo estático sobre relação de desarmes do ano de 2013 com os índices Geomagnéticos



Já para o ano de 2014, a Figura 22 mostra os índices geomagnéticos e os 2 desarmes não justificados ocorridos no mês de Setembro. Destaca-se o desarme do dia 17, o qual foi antecedido por uma Perturbação Severa do campo magnético, verificada através da intensidade do índice Kp, e uma tempestade solar de -223 nt, classificada como Severa I. Já o desarmes do dia 28 provocou um desligamento da linha em questão, iniciado a 1 hora e 22 minutos perdurando até as 23 horas e 34 minutos daquele dia, totalizando 22 horas e 12 minutos de desligamento, sem que suas causas fossem determinadas. Este desligamento foi antecedido por uma Perturbação Extrema do campo magnético, classificada segundo o índice Ap. Ressalta-se que, no intervalo em que a linha esteve desligada, está englobado o acionamento dos relés, manobras para o religamento da linha e o deslocamento da equipe até o local de falta acusado pelo relé 21. Ainda, vale ressaltar que este desarme ocorreu em período noturno, comprovando que os fenômenos geomagnéticos não estão obrigatoriamente associados ao período diurno.

Considerando o ano de 2014 (Figura 23), pode-se observar que, dos desarmes ocorridos neste ano, 90% não foram justificados. Do total de desarmes, 70% ocorreram após a variação de algum índice geomagnético. Vale ressaltar que, neste ano, a maioria dos desarmes ocorreram após variação do índice Ap (48% dos casos), seguido por aqueles ocorridos após a variação de Kp (21% dos casos) e pelos antecipados por variação destes dois índices, (Kp e Ap), os quais representaram 17% dos casos, conforme mostrado na Figura 23b .

Figura 22 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

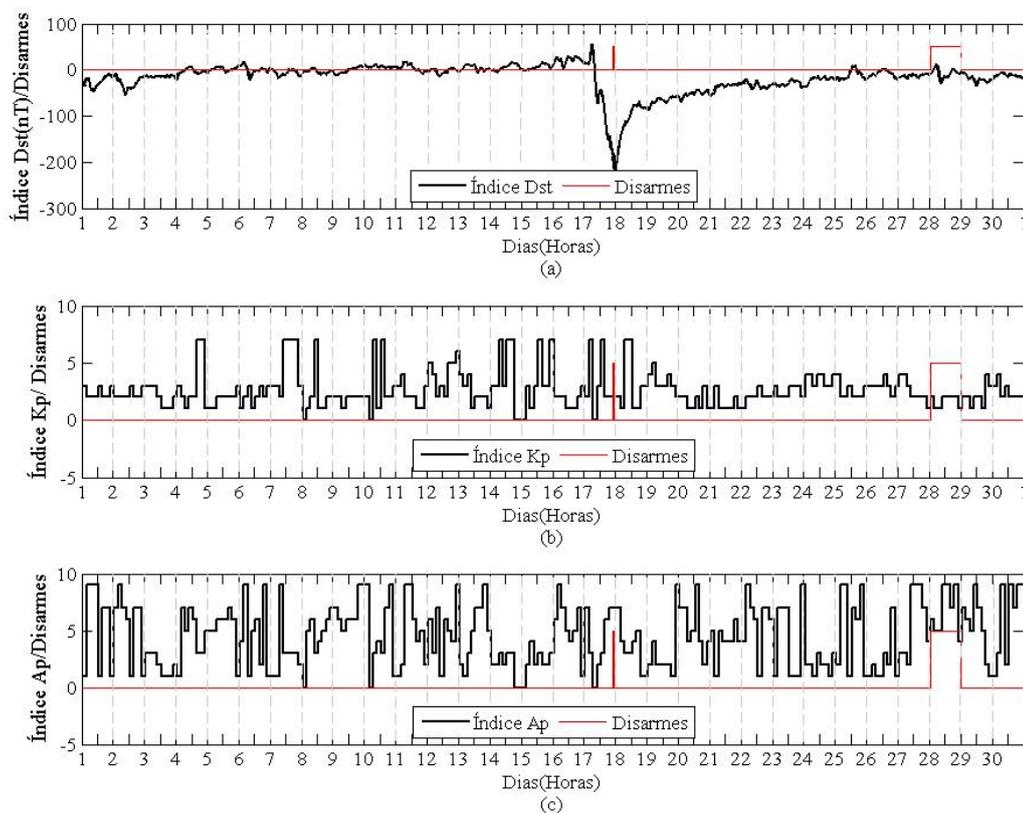
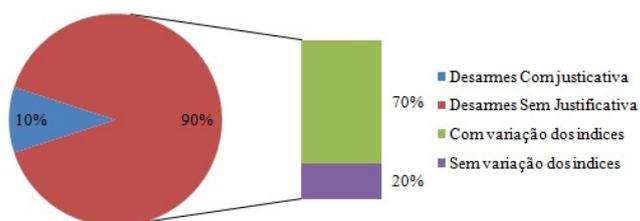
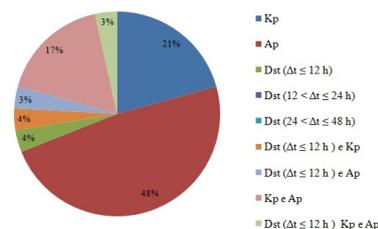


Figura 23 – Estudo estático sobre relação de desarmes do ano de 2014 com os índices Geomagnéticos

(a) Relação de desarmes e variações de índices geomagnéticos do ano de 2014.

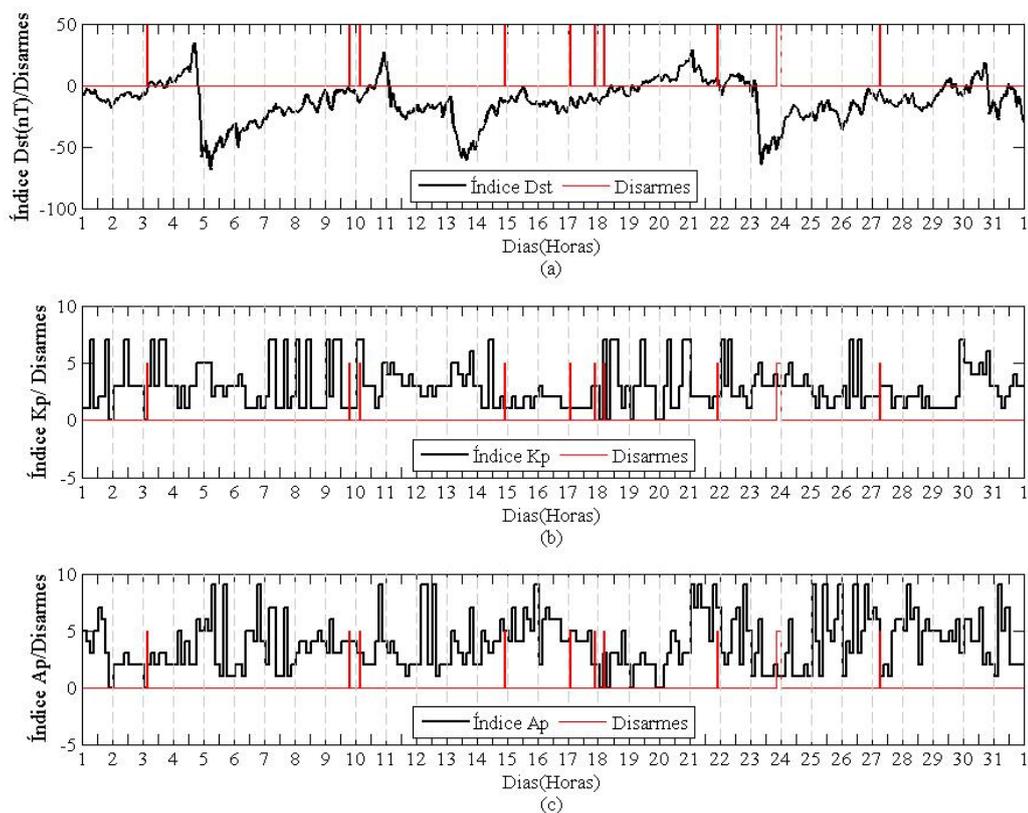


(b) Índices com maior variação no ano de 2014.



Por fim, destaca-se o mês de Julho do ano de 2015, ano o qual apresentou o maior número de desarmes dentro do histórico analisado. Ressalta-se que o mês em questão apresentou o maior número de desarmes do ano de 2015. No total, foram 10 desligamentos neste mês, conforme mostrado na Figura 24. Observa-se que ocorreram dois desarmes no dia 17, os quais aconteceram em momentos de baixa atividade geomagnética. Entretanto, um desarme com duração 2 horas e 32 minutos foi verificado para o dia 23. Para esse caso, a perturbação do campo foi classificada como severa, devido as variações de Kp e Ap. Oito horas antes, foi verificada uma intensa variação de Dst, iniciada oito horas antes do desarme, a qual se encaixa nos níveis de Tempestade Solar Moderada.

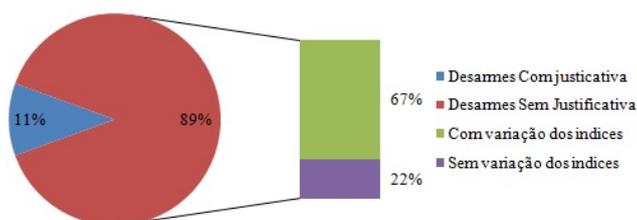
Figura 24 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2015 com o Dst, Kp e Ap.



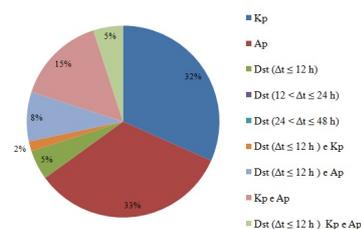
Nos dias 3, 9, 10, 14, 18, 21 e 27 todos os desarmes tiveram duração de minutos. No dia 3, as perturbações e tempestades foram classificadas como fracas, sendo descartada a hipótese de influência geomagnética para esses eventos. Nos dias 9 e 10 as perturbações do campo classificam-se como severas. O desarme do dia 14 foi antecedido por uma tempestade moderada e Perturbações Severas do campo magnético. No dia 18, a tempestade solar classificou-se como fraca, porém, a perturbação do campo foi classificada como Severa. Por fim, nos dias 21 e 27, as perturbações de campo classificaram-se como severa e forte, respectivamente, não havendo tempestades solares.

Figura 25 – Estudo estático sobre relação de desarmes do ano de 2015 com os índices Geomagnéticos

(a) Relação de desarmes e variações de índices geomagnéticos do ano de 2015.



(b) Índices com maior variação no ano de 2015.



Além disso, na Figura 25a, pode-se observar a que a quantidade de desarmes anuais sem

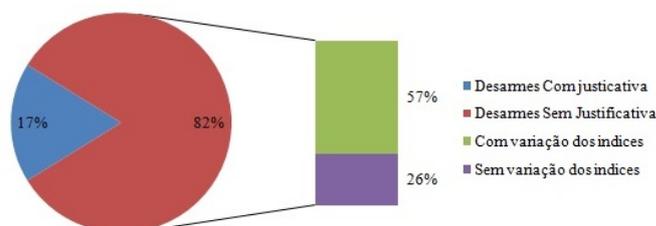
justificativa é a maior dentre todos os anos analisados neste estudo, sendo estes 89% do total de desarmes para o referido ano. Destaca-se ainda que 67% do total de desligamentos verificados para o período ocorreram após a variação de algum dos índices geomagnéticos. Destes 67%, 33% ocorreram após a variação de Ap, 32% após avariação de Kp e 15% após a variação destes dois índices.

Tendo em vista esses resultados, percebe-se que a maioria dos desligamentos não justificados dentro do histórico analisado ocorreram após as variações dos índices Kp e Ap, indicando que os desarmes ocorram devido às perturbações do campo magnético da Terra e a consequente produção de GICs, não estando relacionada diretamente com as Tempestades solares em si, e sim com suas consequências, as quais podem ser verificadas em até 48 horas após suas ocorrências.

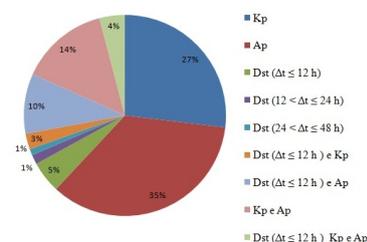
Vale destacar o aumento do número de desarmes sem justificativa na linha estudada dentro do histórico analisado, os quais aconteceram após a variação de algum dos índices geomagnéticos. A Figura 26a mostra que, durante o horizonte de estudo, 87% do total de desarmes não possuem justificativa, e sendo que 57% foram antecedidos por alguma variação de algum dos três índices. Além disso, segundo a Figura 26b, pode-se perceber que, no horizonte de estudo, os índices que sofreram maior variação antes dos desarmes não justificados foram o Ap e Kp, sendo 35% antecedidos por variação do Ap e 27% por variação do Kp.

Figura 26 – Estudo estáticos sobre relação de desarmes Total com os índices Geomagnéticos

(a) Relação de desarmes e variações de índices geomagnéticos de 2010 a 2015.



(b) Índices com maior variação de 2010 a 2015.



Nesse contexto, a Figura 27 apresenta a porcentagem anual dos eventos de perturbações do campo magnético que precederam os desarmes, classificados de acordo com a Tabela 2, em função da variação dos índices Ap e Kp, em relação ao total de desligamentos da linha estudada. De forma análoga, a Figura 28 mostra as porcentagens de Tempestades Solares e suas classificações dadas em função do índice Dst (Tabela 1), também em relação ao número total de desarmes verificados para cada ano, dentro do histórico analisado.

Ressalta-se que, de acordo com o Relatório de Análise: Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) do ano de 2016 (ANEEL, 2016), realizado no período de 1º de Agosto de 2014 a 31 de Julho de 2015, a linha de 138 kV Santa Maria- Alegrete, ou agora com nova configuração (LT 138 kV ALE-SE x SMA3 + LT 138 kV SMA3 x SMA1), apresentou 76 desligamentos, sendo a linha de transmissão selecionada para análise aquela mais sofreu com desligamentos não programados entre todas

da região Sul, de um total de 14 Linhas de Transmissão analisadas. Dos 76 desligamentos, 66 foram classificados como sendo de causa indeterminada e 10 como chuva/temporal (não inseridos nas análises deste período). Por esses motivos, a ANEEL solicitou um novo Plano de Melhorias para a companhia, pois as soluções apontadas no último plano não foram satisfatórias, os quais enquadravam somente duas hipóteses para os desarmes indeterminados: umidade elevada ou presença de pássaros. Dessa forma, a CEEE não atingiu a meta para redução destes desarmes apresentada no último Plano de Melhorias. Por fim, vale destacar que a referida linha de transmissão foi seccionada em 18 de Maio de 2016, na Subestação Santa Maria 3. Na continuação do trabalho, será feito o acompanhamento das duas linhas de transmissão resultantes.

Figura 27 – Porcentagem Anual de Desarmes antecedidos por Perturbações do Campo Magnético Terrestre.

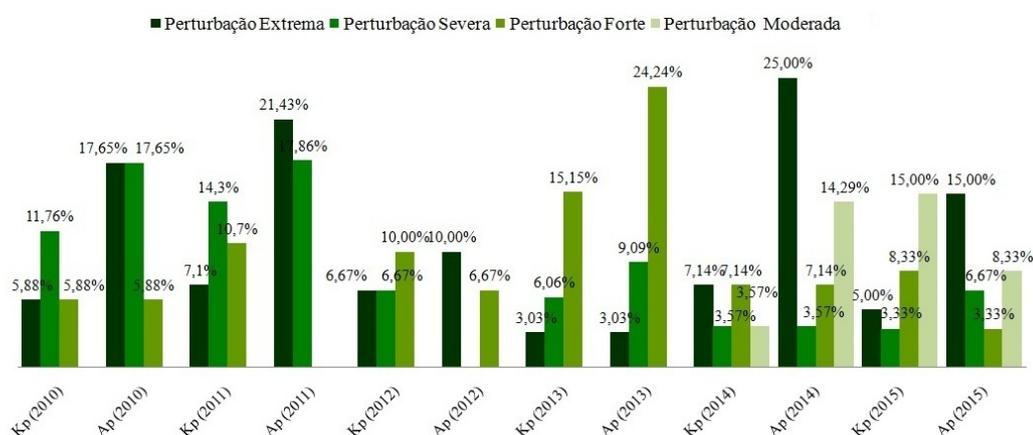
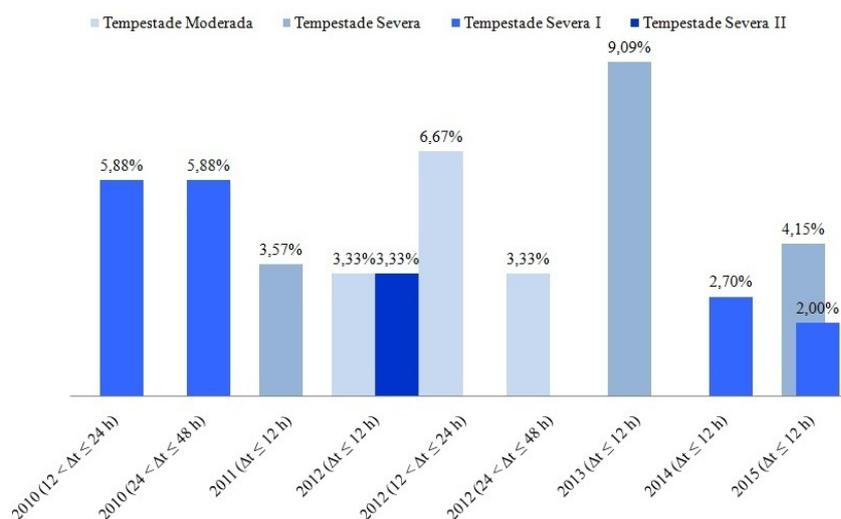


Figura 28 – Porcentagem Anual de Desarmes antecedidos por Tempestades Solares.



3.2 O Ciclo Solar e Sua Conexão Com Desarmes Indeterminados

O ciclo solar é a variação da quantidade de fluxo magnético que sobe até a superfície do Sol, causando assim erupções em sua superfície. Os telescópios registraram a primeira mancha no Sol em 1611. A partir de então, os observadores notaram que as manchas solares movimentavam-se sobre a superfície do sol, alterando a teoria de sua natureza imutável, a qual foi completamente modificada, quando houveram registros de manchas solares que aumentaram e diminuíram ao longo do tempo, em um ciclo regular de aproximadamente 11 anos, chamado de ciclo de manchas solares (NASA, 2016). O comprimento exato do ciclo pode variar de 8 até 14 anos, sendo que o número de manchas solares sempre aumenta ao longo do tempo e, em seguida, volta a baixa novamente (NASA, 2017), lembrando uma senóide.

O aumento das manchas solares é proveniente do aumento da atividade solar, sendo que, nesses períodos, são observadas grandes flores de radiação conhecidas como rajadas solares (ou rajadas de material solar), que expõem massa coronal no espaço, inclusive, em direção a Terra. O maior número de manchas solares em qualquer época do ciclo é designado como "máximo solar", enquanto o menor número é designado como "mínimo solar". Cada ciclo varia em intensidade, de forma que alguns máximos solares são tão baixos que quase não se distinguem do mínimo precedente.

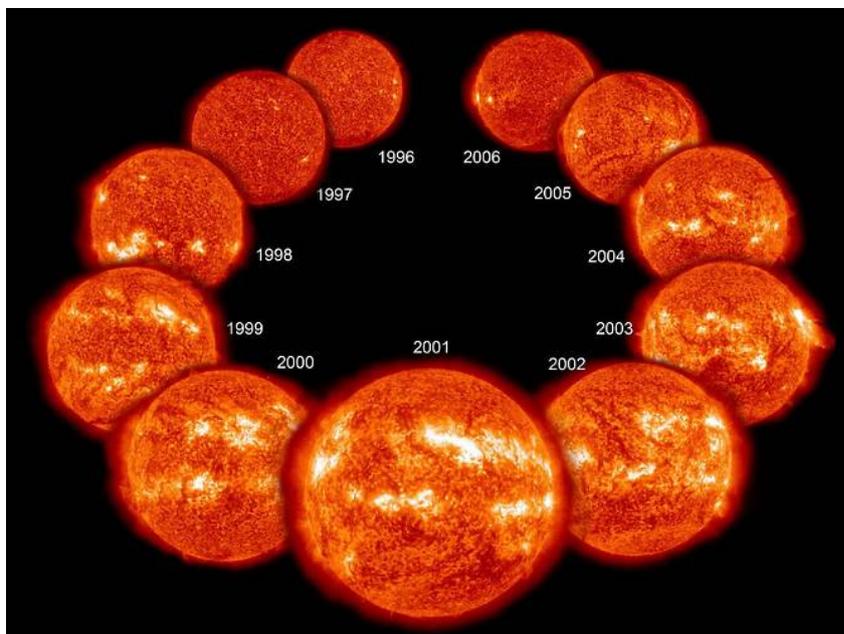
Foi somente após a primeira metade do século 20 que os cientistas começaram a entender o que causa o ciclo de manchas solares. Os pesquisadores determinaram que as manchas solares eram um fenômeno magnético e que, de fato, o sol inteiro era magnetizado com um polo magnético norte e sul como um ímã de barra. Ao acompanhar as ondas sonoras que percorrem o centro do sol, os cientistas puderam obter uma compreensão do quanto este centro é profundo. Eles descobriram que o material magnético dentro do sol é constantemente alongado e torcido como bolhas até a superfície. O padrão exato dos movimentos não é conclusivamente mapeado, mas com o tempo eles entenderam que são polos magnéticos e estes podem vir a sofrer uma inversão por completo (NASA, 2015).

O ciclo de manchas solares acontece devido a esta inversão de polos, onde norte torna-se sul e sul torna-se norte, ocorrendo, aproximadamente, a cada 11 anos, conforme mencionado anteriormente. Cerca de 11 anos mais tarde, os polos invertem-se novamente, e voltam para onde eles se encontravam inicialmente, fazendo com que o ciclo solar completo real corresponda a 22 anos. O sol se comporta similarmente ao longo de cada ciclo de 11 anos, não importando qual polo está no topo. No entanto, por esse motivo, o ciclo mais longo tende a receber mais atenção (NASA, 2016).

Na Figura 29, observa-se o ciclo completo de onze anos do Sol. Nota-se a progressão do mínimo solar no ano de 1996 para as condições máximas no ano de 2001. Além disso, verifica-se o retorno ao mínimo no ano de 2006. Essa Figura foi feita a partir de uma colagem de dez

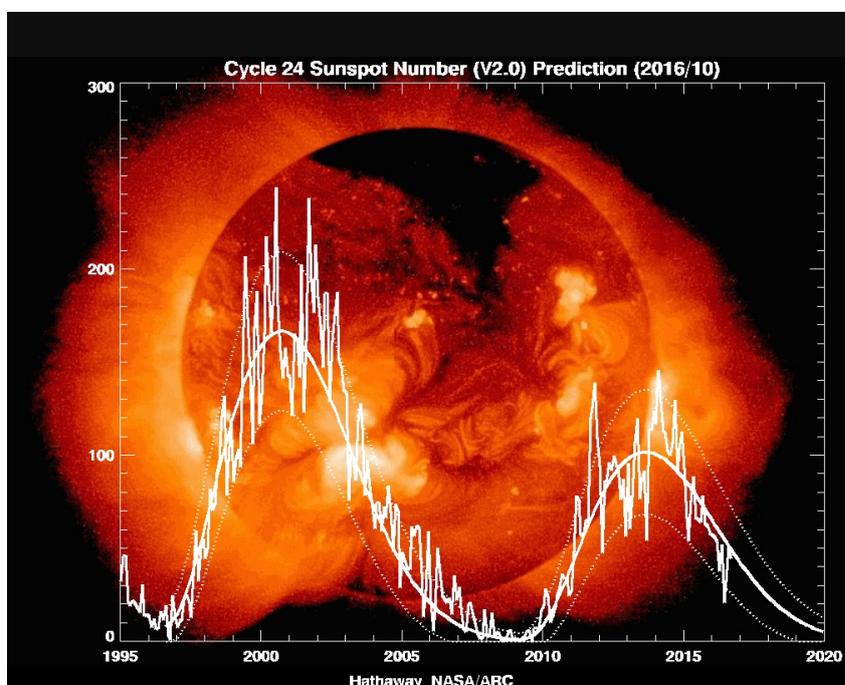
imagens de disco fornecidas pela NASA (2017).

Figura 29 – Ciclo Solar Completo de 1996 a 2006.



Fonte – (NASA, 2017)

Figura 30 – Previsão do número de manchas solares.



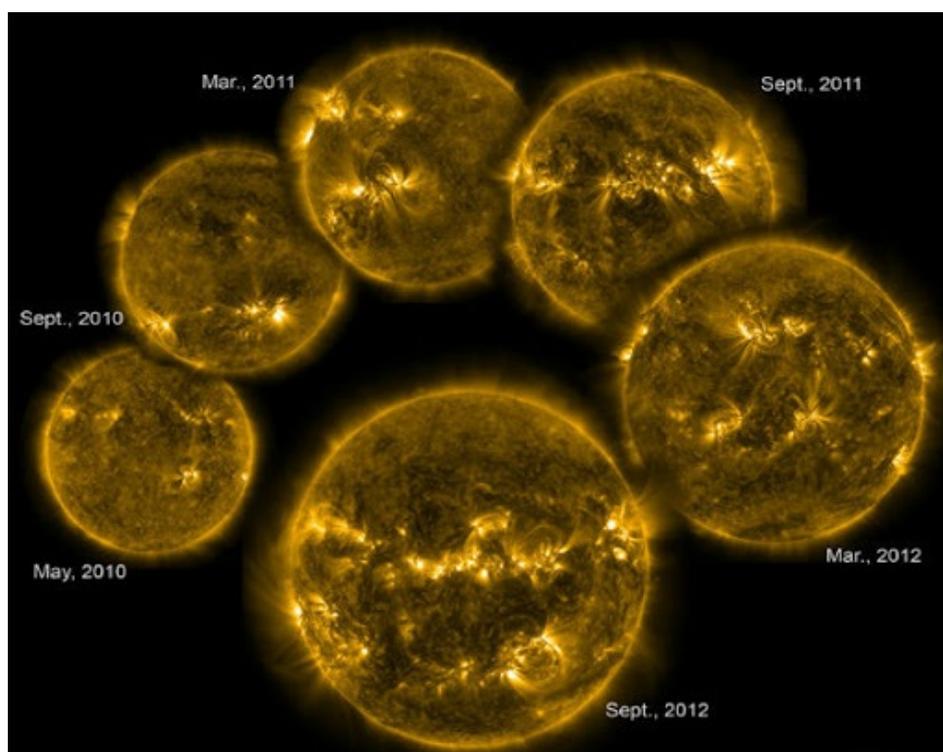
Fonte – (NASA, 2017)

Atualmente, acredita-se que o sol esteja no máximo de seu ciclo, pois as ejeções de massa coronal estão mais comuns do que há alguns anos atrás. As projeções fornecidas indicam que o ciclo máximo (número de manchas solares) atingiu o pico no início de 2014 se estendendo

ao final de 2015. Contudo, estas informações só podem ser confirmadas após o término do ciclo completo, o qual, segundo a projeção, está previsto para o ano de 2020. Tal projeção pode ser vista na Figura 30, onde o eixo x apresenta os anos e o eixo y, o número de manchas solares registrado para o respectivo ano. Acredita-se que este é o ciclo de manchas solares mais lento da era espacial, sendo que este é o único período para o qual se tem observações mais detalhadas.

Já a Figura 31, apresenta os registros das atividades solares desde Maio 2010 até Setembro de 2012, período para o qual foram comparadas as variações dos índices geomagnéticos e a ocorrência de desarmes da LT 138 kV ALE-SE x SMA3 + LT 138 kV SMA3 x SMA1, conforme mostrado na Seção 3.1. A partir dessa Figura e levando em conta a possibilidade de um máximo solar, pode-se afirmar que o ciclo solar e, evidentemente, as atividades solares podem estar associadas ao desligamento indevido da linha estudada, uma vez que a variação dos índices geomagnéticos durante o período estudado, o qual é condizente com o ciclo solar, aliado a localização da linha, apontam para a ocorrência de GICs na região. Ressalta-se que as atividades geomagnéticas foram intensas neste período coincidindo com os desarmes indeterminados registrados pela companhia responsável pela referida LT.

Figura 31 – Ciclo Solar de Maio de 2010 a Setembro de 2012.



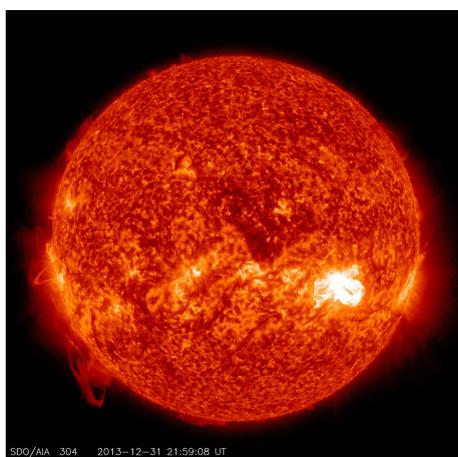
Fonte – (NASA, 2017)

Ainda, a Figura 32 apresenta o ciclo solar desde Dezembro de 2013 à Julho de 2015. Na Figura 32a, observa-se o registro de uma erupção solar de alta intensidade do mês de Dezembro de 2013. Também, a Figura 32b confirma as suspeitas da NASA de que o sol estava progredindo para seu ápice, pois percebe-se um aumento das erupções na superfície solar. Essa Figura registra

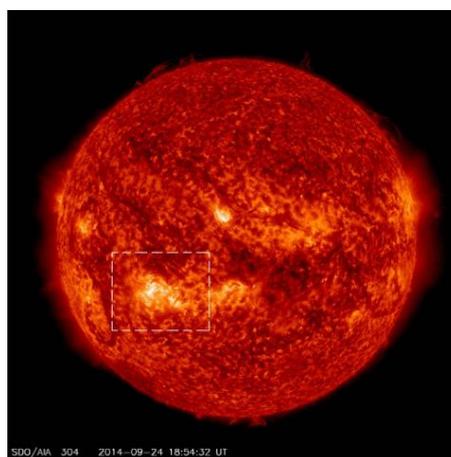
o exato momento da ejeção de massa coronal no mês de Setembro de 2014, a qual pode estar associada uma tempestade solar de -223 nt, classificada como Severa I, abordada no Capítulo 3.1. Por fim, a Figura 32c mostra uma intensificação na atividade solar, permitindo concluir que o sol esteja em seu ciclo máximo. Esta intensificação da atividade geomagnética pode ser observada na Figura 24, período para o qual ocorreram 10 desligamentos sem justificativa da linha estudada (Seção 3.1). Para uma visualização completa, a Figura 33 mostra um ciclo completo dentro do horizonte de estudo abordado neste trabalho.

Figura 32 – Ciclo Solar de Dezembro 2013 a Julho de 2015.

(a) Registro de atividade solar em Dezembro de 2013.



(b) Registro de atividade solar em Setembro de 2014.



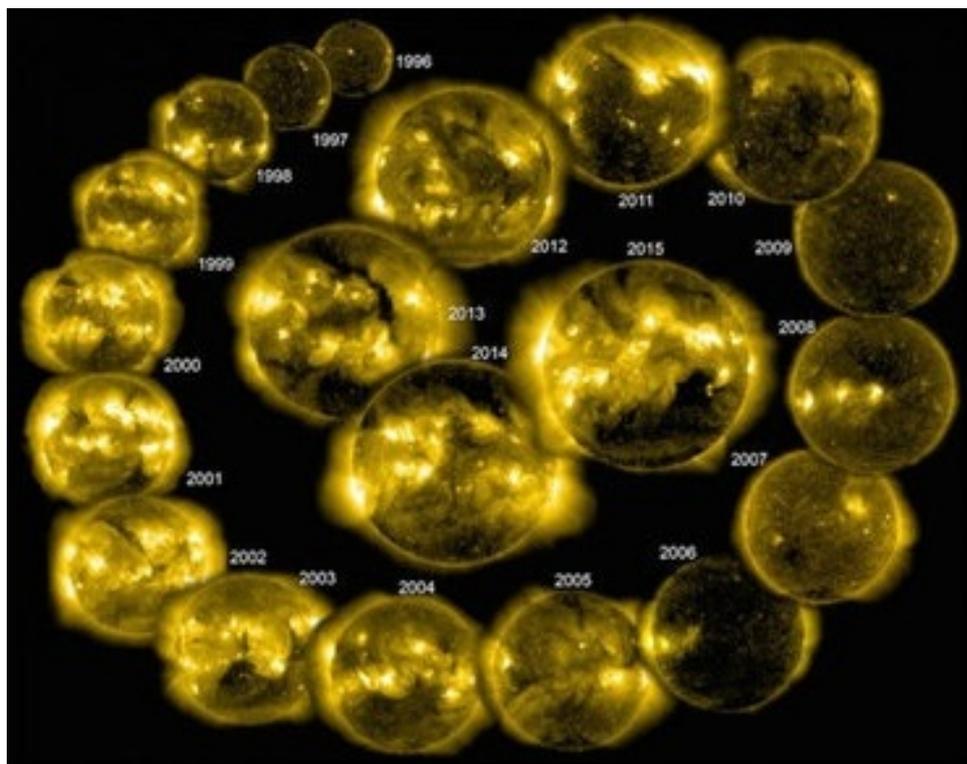
(c) Registro de atividade solar em Julho de 2015.



Fonte – (NASA, 2017)

Dessa forma, ressalta-se que estas projeções e registros aqui apresentados coincidem com o aumento significativo de desarmes registrados pela CEEE-GT, permitindo concluir que região da LT estudada é passível de influência da atividade solar e, conseqüentemente, geomagnética, corroborando a importância deste estudo.

Figura 33 – Ciclo Solar de 1996 a 2015.



Fonte – (NASA, 2017)

3.3 Considerações Finais

Neste Capítulo, foi apontada uma possível correlação entre os distúrbios geomagnéticos, os quais são a causa primária das GICs, e a ocorrência de desarmes sem justificativa aparente, ocorridos na linha de transmissão de 138 kV, entre Santa Maria e Alegrete, no Estado do Rio Grande do Sul.

O estudo considerou a duração dos desarmes sem justificativa aparente e o histórico da deformação do campo magnético terrestre (Índices Geomagnéticos) para os períodos analisados. Ressalta-se que os desarmes analisados neste estudo não possuem justificativas perante o órgão regulamentador, o que é passível de multa. Dessa forma, ficou evidenciado que a grande maioria destes desarmes foram antecedidos por uma variação do campo magnético. Além disso, um estudo estatístico para determinar quais Índices Geomagnéticos sofreram maior variação nesse histórico de deformação do campo magnético foi apresentado.

O Ciclo Solar também foi abordado com a finalidade de estabelecer uma conexão com a deformação do campo magnético terrestre e os desarmes relacionados. De acordo com os cientistas da NASA, os quais analisam o ciclo solar, o sol está no máximo de seu ciclo, pois as ejeções de massa coronal estão mais comuns do que há alguns anos atrás, coincidindo assim com os desarmes indeterminados.

Portanto, com base no estudo aqui apresentado, o Capítulo seguinte apresenta uma meto-

dologia para extração do sinal de GIC da forma de onda dos sinais de corrente da rede, a qual utiliza operadores da morfologia matemática, para este fim. Ressalta-se que a técnica proposta foi implementada em Matlab® e testada para sinais de corrente obtidos a partir de simulações de um sistema teste nos softwares OPENDSS® e EMTP-ATP®.

4 Metodologia

Este Capítulo apresenta a metodologia proposta para detecção das GICs em Sistemas Elétricos de Potência. Primeiramente, são apresentados os dados referentes à linha de transmissão, os quais foram utilizados para simulação do sistema nos softwares OPENDSS® e EMTP-ATP®. Nesse contexto, ressalta-se que o OPENDSS® foi utilizado para estimar os níveis de GIC no sistema em questão, utilizando dados como as longitudes e latitudes dos terminais da linha. Além disso, os valores obtidos de GIC através do OPENDSS® foram usados para obtenção das formas de onda de corrente nos terminais da linha, os quais representam as subestações de ALE SE e SMA 1. Esses sinais foram conseguidos através de simulações do mesmo sistema no software EMTP-ATP®, sendo estes utilizados para validar a metodologia proposta para detecção das GICs, descrita ao final deste Capítulo.

4.1 Dados Técnicos da Linha de Transmissão

Sabendo que a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE-GT) é responsável por parte da Linha de Transmissão estudada, como mostra a Figura 11, foi necessário um estudo mais profundo para obtenção dos dados específicos para incorporar o software OPENDSS® nesta pesquisa.

Então a linha abordada é nomeada de ALE SE- SMA 1 (e agora com uma nova configuração LT ALE SE x SMA3 somada a SMA3 x SMA1) com uma faixa de tensão de 138 kV e 197 km de comprimento total (ANEEL, 2016). Esta LT é composta por cabos do tipo CAA Lark 397.5, os quais apresentam resistência de 0,1703 Ω /km e reatância indutiva de 0,3599 Ω /km (NEXANS, 2013). As latitudes e longitudes da Tabela 3 correspondem aos terminais da linha de transmissão dentro das respectivas subestações.

Tabela 3 – Coordenadas esféricas.

Coordenadas/Subestação	SMA 1	ALE SE
Longitude	53°47'30.20" O	55°46'13.58" O
Latitude	29°39'37.5" S	29°47'1.78" S

Já analisando do ponto de vista da proteção, ela é 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, sendo que as principais proteções acionadas são os relés direcionais, de sobrecorrente e os relés de distância (MUSTAFA et al., 2013).

Por ser muito longa, acredita-se que a linha ALE SE x SMA1 transpõe linhas do campo magnético terrestre facilitando a existência das GICs. Além disso, o solo na região é predominante

argilo-arenoso, conforme Reinert et al. (2007), sendo um aspecto geológico que também contribui para a possível ocorrência dessas correntes naquela região. Estes fatores em conjunto com a nossa localização na SAA são de suma relevância para dar credibilidade que os desligamentos daquela LT são ocasionados por GICs.

4.2 GICs utilizando o OPENDSS®

OpenDSS é capaz de realizar simulações de GIC em SEP. Atualmente, a capacidade de análise está limitada aos sistemas de três fases, e não podem ser integrados em outros tipos de simulações. No entanto, no exemplo de GIC, pode-se aproveitar a capacidade de modelagem N fases do OpenDSS para analisar o valor de corrente em cada fase do sistema.

GIC são componentes quase contínuas (BOTELER; PIRJOLA, 1998) assim, as simulações de GICs envolvem uma frequência muito baixa (tipicamente 0,1 Hz) (PINTO et al., 2008). A força motriz por trás do fluxo de GIC na rede é a chamada tensão induzida nas linhas de transmissão. A tensão induzida é gerada pelo acoplamento das linhas de transmissão com o campo geoeletrico induzido na superfície da terra. Para o exemplo de GIC em linhas de transmissão, parâmetros e cálculos de componentes quase contínuas, que são descritos em Dugan (2013), foram inseridos aos equipamentos presentes neste exemplo (transformadores, subestações redes terrestres e dispositivos de bloqueio GIC). Contudo, o calculo deste fluxo de corrente baseia-se em utilizar as coordenadas esféricas, distâncias e influência dos campos geomagnéticos Leste e Norte. Em Horton et al. (2012), o desenvolvimento deste calculo de GIC foi melhor abordado, não sendo o foco neste trabalho.

A Figura 34 mostra a disposição da LT sobre o mapa do estado do Rio Grande do Sul, fornecida pelo software OPENDSS®, após a inserção de todos os dados do sistema da Tabela 3. A imagem sobre a qual a LT está disposta, na Figura 34, foi obtida pelo software Google Earth® para melhor visualização e inserida no OPENDSS® por meio de recursos gráficos do próprio software. Então, com os valores da Tabela 3, foram calculadas as GICs no sistema da Figura 35, porém apenas as GICs que fluem pela linha de transmissão são relevantes para este estudo, por esta razão os valores de GICs nos equipamento não foram utilizados.

A Tabela 4 mostra os valores do fluxo de GICs fornecidos pelo software OPENDSS® de acordo com os parâmetros apresentados na seção 4.1 na LT. Além disso, o valor máximo de corrente, exigido como dado de entrada no OPENDSS®, foi delimitado em 100 Ampères. As correntes resultantes, mesmo com a variação do campo geoeletrico, respeitaram a corrente limite estabelecida e também o sentido real do fluxo de corrente, que pela defasagem angular, dá-se no sentido Santa Maria - Alegrete.

Os dados apresentados na Tabela 4 têm como índice de referência o campo geoeletrico uniforme na direção Leste. O campo geoeletrico Norte não foi utilizado, pois considerou-se a posição da linha de transmissão na localidade do hemisfério sul.

Figura 34 – Localização da LT no Rio Grande do Sul.

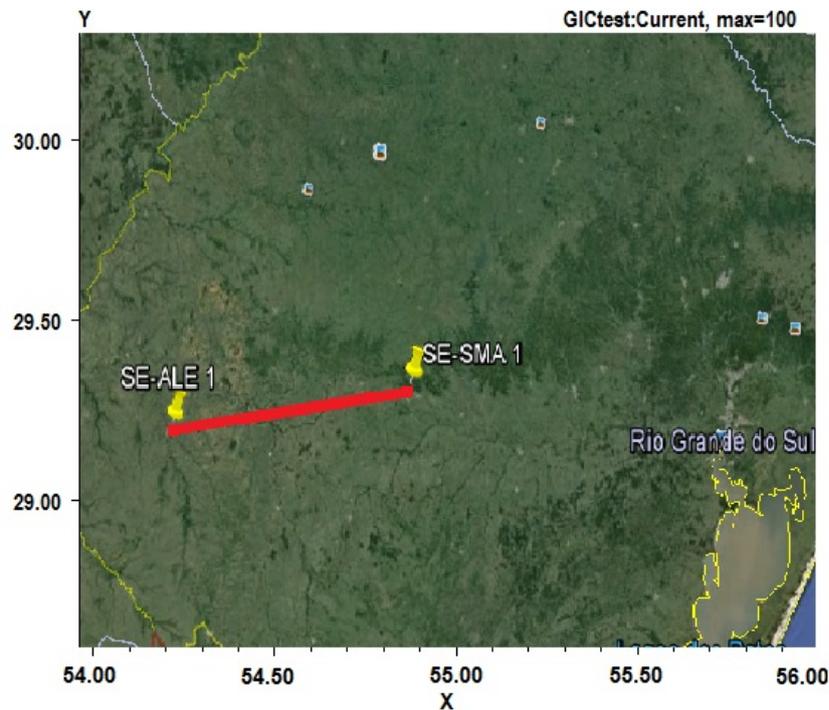


Tabela 4 – Fluxo de GIC na LT

Campo Geométrico (V/km)	Corrente na Linha (A)
1	5,451
2	10,902
3	16,45
4	21,804
5	27,255

4.3 Sistema Teste desenvolvido para a Simulação de GICs no EMTP-ATP®

O sistema teste proposto para simulação no EMTP-ATP® é exposto na Figura 35. Tal sistema é composto por uma linha de transmissão, a qual é representada por um bloco RLC trifásico. Os parâmetros utilizados na simulação da LT são os mesmos descritos na seção 4.1, estando resumidos na Tabela 5.

Além disso, os geradores representam a carga e a fonte, representando as subestações ALE SE e SMA 1, respectivamente, conforme os ângulos de fase adotados para cada uma das fontes. Ainda, três fontes de corrente contínua foram conectadas à barra de SMA 1, uma para cada fase do sistema. Cada fonte insere um pulso de corrente contínua nas linhas de transmissão. A duração da GIC no sistema é determinada pela atuação de uma chave de tempo controlado.

Os valores de GICs, fornecidos pelo OPENDSS®, foram inseridos como amplitudes das fontes de corrente contínua do sistema simulado em software EMTP-ATP®, Figura 35, de

modo a atender as características das GICs, tanto em magnitude, quanto em duração.

Figura 35 – Sistema teste elaborado no software EMTP-ATP.

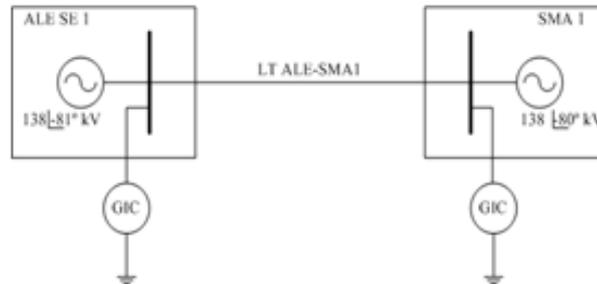


Tabela 5 – Parâmetros do Sistema Teste.

Dados Técnicos da Linha	
Comprimento da Linha	197 km
Primeiro Gerador (SA)	138 \angle -81 kV (Alegrete - ALE SE 1)
Segundo Gerador (SB)	138 \angle -80 kV (Santa Maria - SMA 1)
R_{L0} CA - 60 HZ a 75 oC	0,1703 Ω/km
Reatância Indutiva (X_{L0})	0,3599 Ω/km
Reatância Capacitiva (X_{C0})	0,2187 S/km
Solo	Argilo- Arenoso

Os sinais de corrente obtidos nessas simulações foram processados pela metodologia proposta, a qual foi capaz de extrair corretamente o valor da GIC correspondente, conforme mostrado na Seção 5.1. Ressalta-se que os erros transitórios são representados pelos erros absoluto e relativo. O erro absoluto corresponde à diferença entre o valor estimado de GIC pelo filtro e a GIC de referência, dada segundo o OPENDSS®. Já o erro relativo é dado conforme a Equação (4.1) e é expresso em porcentagem.

$$Erro_{Relativo} = \frac{GIC_{Estima} - GIC_{Referencia}}{GIC_{max}} * 100 \quad (4.1)$$

4.4 Proposta para Detecção de Correntes Geomagneticamente Induzidas

O filtro proposto é inspirado na técnica apresentada por Wu, Lu e Ji (2009) para remoção da componente unidirecional exponencialmente decrescente (componente CC) das correntes de curto-circuito. Para a detecção das correntes geomagneticamente induzidas foi utilizado operadores da morfologia matemática denominados dilatação (4.2) e erosão (4.3), os quais auxiliam na detecção das anomalias causadas pelas GICs nas formas de onda dos sinais de

corrente da rede. Nas Equações abaixo, x representa a posição da amostra na janela $W(n,x)$ e varia de 1 até N , para cada janela de amostras.

$$W(n, x) \oplus SE = \max(W(n, x) + SE(n)) \quad (4.2)$$

$$W(n, x) \ominus SE = \min(W(n, x) - SE(n)) \quad (4.3)$$

O filtro processa uma janela com conjunto W_1 contendo N amostras, frequência fundamental, conforme (4.4).

$$W_1(n) = [x_1 x_2 x_3 \dots x_n] \quad (4.4)$$

Em (4.4), 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).

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 (4.2) e (4.3), expostas anteriormente, tornam-se as expressões descritas nas Equações (4.5) e (4.6).

$$W_1(n) \oplus SE = \max(W_1(n)) \quad (4.5)$$

$$W_1(n) \ominus SE = \min(W_1(n)) \quad (4.6)$$

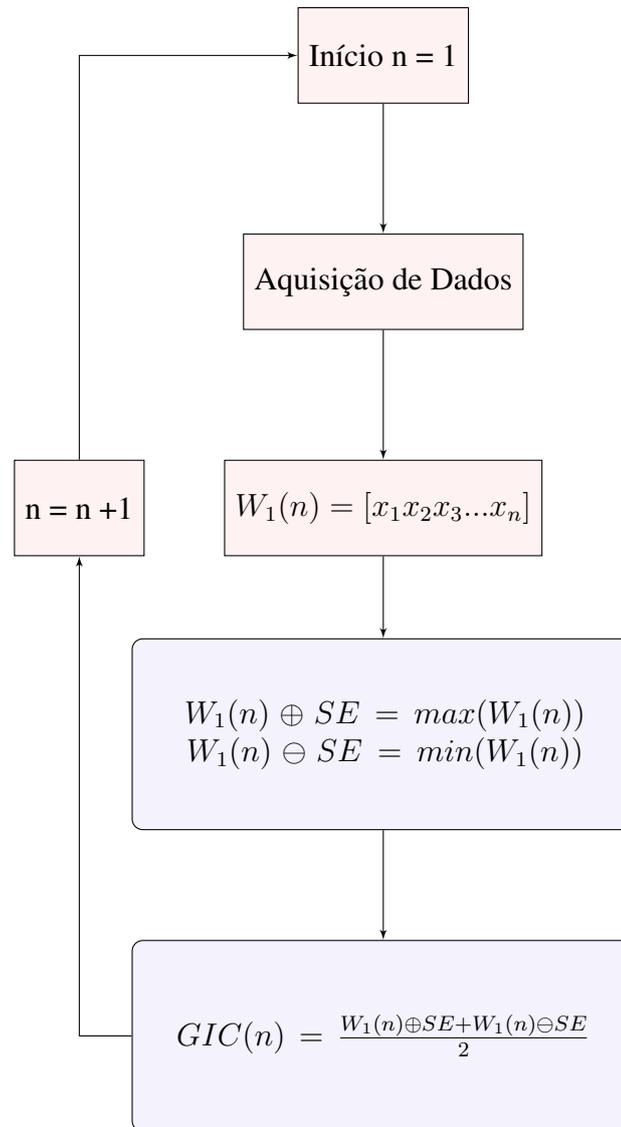
O valor da GIC é dado pela média da soma entre os resultados obtidos a partir de (4.5) e (4.6), conforme a Equação (4.7). O valor de $GIC(n)$ representa a componente contínua que provoca o *offset* na forma de onda de corrente.

$$GIC(n) = \frac{W_1(n) \oplus SE + W_1(n) \ominus SE}{2} \quad (4.7)$$

Esta metodologia foi implementada no Matlab® e apresenta bom desempenho e precisão na detecção de GICs, conforme os resultados obtidos, lembrando que foram analisada várias condições de GICs num sistema teste (Seção 4.3), para diferentes taxas de amostragem (16, 32, 64 e 96).

Uma vez que as GICs, por se tratarem de pulsos de corrente quase contínua, apresentam-se como *offset* nas formas de onda dos sinais de corrente, é possível extrair a componente que provoca esta distorção com o auxílio da Morfologia Matemática. Na Figura 36 pode-se observar o fluxograma da metodologia descrita acima.

Figura 36 – Fluxograma da metodologia implementada.



4.5 Considerações Finais

Este Capítulo apresenta o sistema teste, criado, o qual fundamenta-se nos parâmetros da linha de transmissão de 138 kV, entre as cidades de Alegrete e Santa Maria. Esse sistema teste foi implementado no software OPENDSS® que, por sua vez, demonstrou a possibilidade de ocorrência de GICs na região de estudo. O mesmo sistema teste foi implementado também no software EMTP-ATP® para obtenção de sinais de corrente da rede sob influência das GICs, simuladas em OPENDSS®. Esses sinais constituem um banco de dados, o qual foi utilizado para validar a técnica aqui proposta. Tal técnica, fundamenta-se em operadores da Morfologia Matemática, sendo capaz de extrair as GICs das formas de onda de corrente da rede. O Capítulo seguinte apresenta o desempenho da metodologia ao processar os sinais do banco de dados, confirmando sua robustez e eficácia ao desempenhar a função para a qual foi destinada.

5 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir do Filtro Morfológico descrito no Capítulo 4.4, sendo que tal metodologia foi testada por meio de simulações computacionais. Primeiramente, foram adquiridos valores de GIC, os quais foram computados segundo o software OPENDSS®[®], para a região compreendida pela linha estudada. Foram gerados diferentes valores de GIC a partir de diferentes condições de campo geoeletrico testadas. Em seguida, os valores de GIC obtidos via OPENDSS®[®] foram utilizados para simulação da linha em estudo no software EMTP-ATP®[®], a partir do qual foram gerados os sinais de corrente processados pelo filtro morfológico proposto. Tendo em vista o desempenho da técnica proposta, é possível afirmar que a mesma é capaz de detectar as correntes geomagneticamente induzidas com boa aproximação. A Seção seguinte detalha os resultados obtidos.

5.1 Desempenho do Filtro Morfológico para Detecção de GICs Utilizando Dados de Simulação em OPENDSS®[®]

Nesta seção, são apresentados os testes realizados envolvendo o filtro morfológico descrito na seção 4.4, cuja resposta foi avaliada em termos do erro transitório da estimação da GIC segundo o filtro proposto. O método desenvolvido foi testado por meio de simulação simulações computacionais da LT em questão. Tais simulações foram feitas com auxílio do software EMTP-ATP®[®], a partir do sistema teste da Figura 35, utilizando os resultados expostos na seção 4.2 para os possíveis valores de GIC na região. Ressalta-se que todas as correntes estão referenciadas ao primário do transformador de corrente e que, para os casos aqui apresentados, os sinais foram amostrados a uma taxa de 96 amostras/ciclo.

Sendo assim, a Figura 37 (a) mostra o sinal de corrente obtido a partir da simulação em EMTP-ATP®[®] para o campo geoeletrico de 1 V/km, o qual produz uma GIC de 5,451 A, conforme mostrado na Figura 37 (b). Esse sinal foi gerado a uma taxa de 96 amostras por ciclo e a ação da GIC se inicia no instante 1 segundo e tem duração de 3 segundos. Já a Figura 38 mostra a resposta da metodologia desenvolvida ao processar o sinal da Figura 37, bem como os erros absoluto e relativo da respectiva estimação.

Segundo a Figura 38, em (a), percebe-se a proximidade entre o sinal de referência e o estimado pela metodologia. Em (b) e (c), são mostrados os erros transitório absoluto e relativo da estimação, os quais apresentam valores elevados nos momentos de início e fim da incidência da GIC, apresentando erros praticamente nulos para o intervalo entre esses dois instantes. O valor alto de erro, o qual aparece no instante inicial do efeito da GIC, ocorre devido ao tempo necessário para que a primeira amostra sob efeito da GIC entre na janela de dados da metodologia.

De forma análoga, o erro elevado no final do intervalo corrompido pela GIC ocorre devido à presença de amostras corrompidas pela GIC na janela de dados no instante em que o efeito da mesma é encerrado. Apesar destes erros elevados, pode-se concluir que a atuação da metodologia apresenta um excelente desempenho dada a capacidade de estimar a GIC com grande precisão.

Figura 37 – Resultados obtidos para uma GIC de 5,451 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.

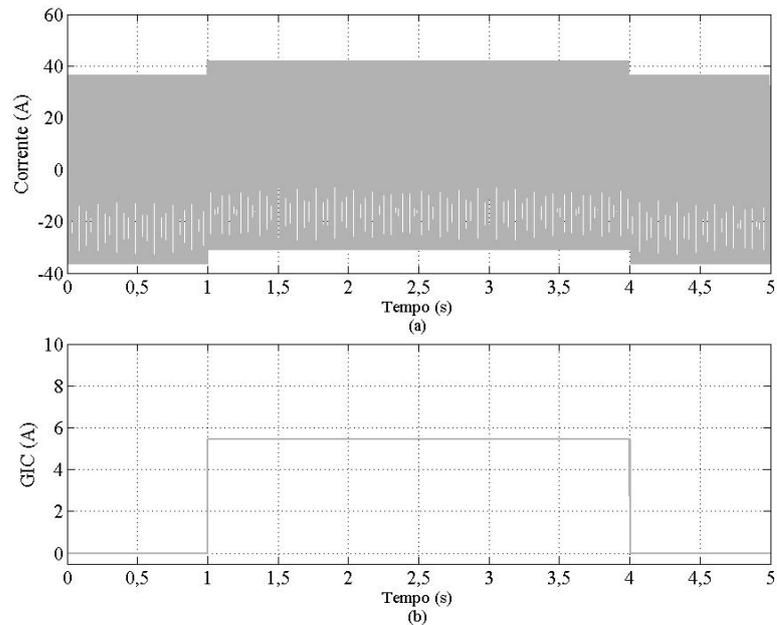
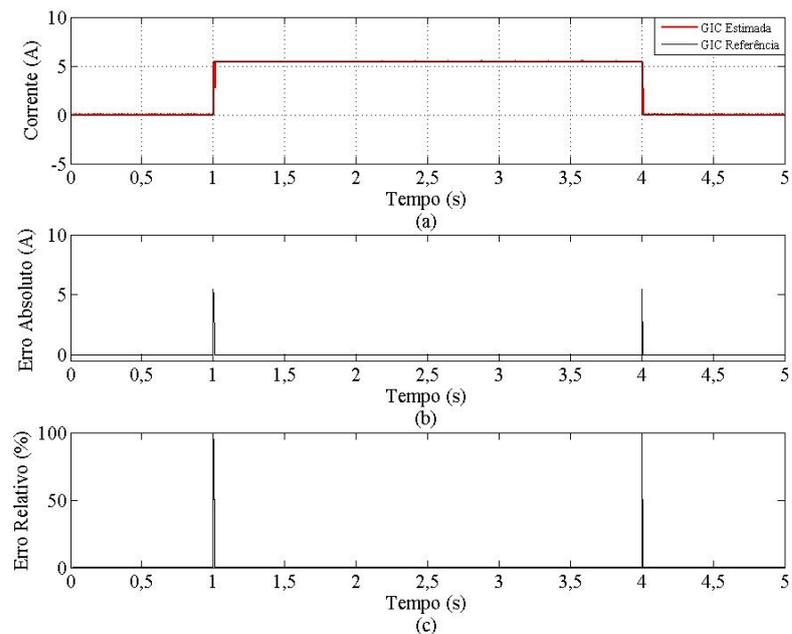


Figura 38 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 5,451 A. (a) Resposta do filtro; (b) Erro Absoluto; (c) Erro Relativo.



Já a Figura 39 (a) mostra a forma de onda do sinal obtido a partir da simulação da ação de uma GIC de 10,902 A, também com duração de 3 segundos, no sistema teste analisado. É

importante ressaltar que esse valor de GIC é resultante da simulação em OPENDSS® para um campo geoeétrico de 2 V/km. Em (b), é mostrada a resposta da metodologia de detecção de GICs. Novamente, a resposta da técnica proposta foi precisa, uma vez que foi detectada uma GIC de, aproximadamente, 10,902 A durante 3 segundos, conforme mostrado na Figura 40.

Figura 39 – Resultados obtidos para uma GIC de 10,902 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.

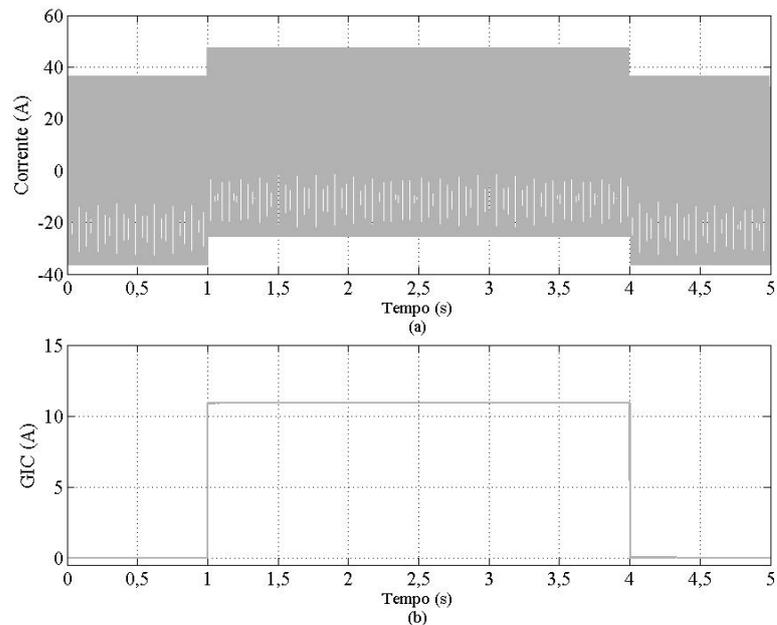
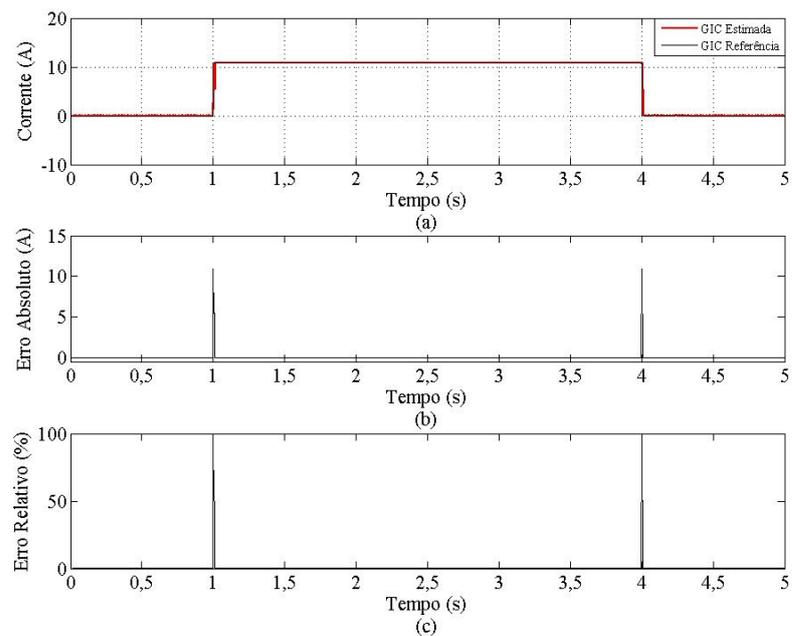


Figura 40 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 10,902 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.



A partir dessa Figura 40, pode-se observar o excelente desempenho da metodologia proposta, a qual obteve erros aproximadamente nulos para estimativa da GIC de 10,902 A. Os valores

elevados de erro no início e fim do intervalo de ocorrência da GIC ocorrem pelos mesmos motivos relatados para o caso anterior.

Para um campo geolétrico de 3 V/km, a Figura 41 (a) mostra a forma de onda do sinal obtido a partir da simulação da ação de uma GIC de 16,45 A, também com duração de 3 segundos. Em (b), é mostrado o sinal da GIC resultante.

Figura 41 – Resultados obtidos para uma GIC de 16,45 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.

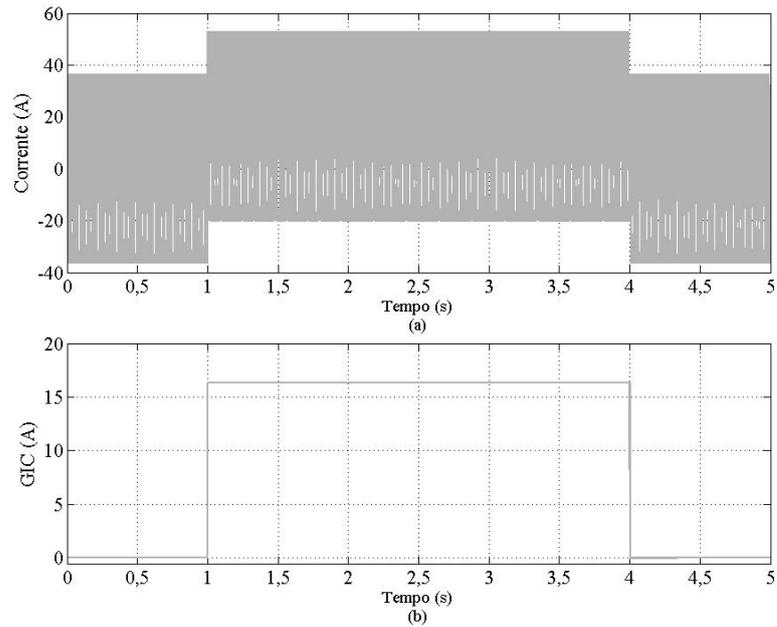
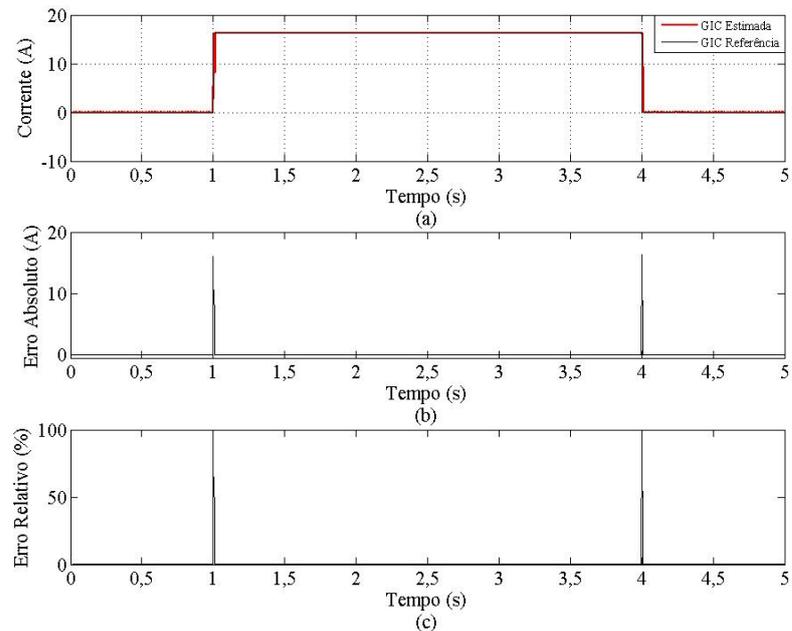


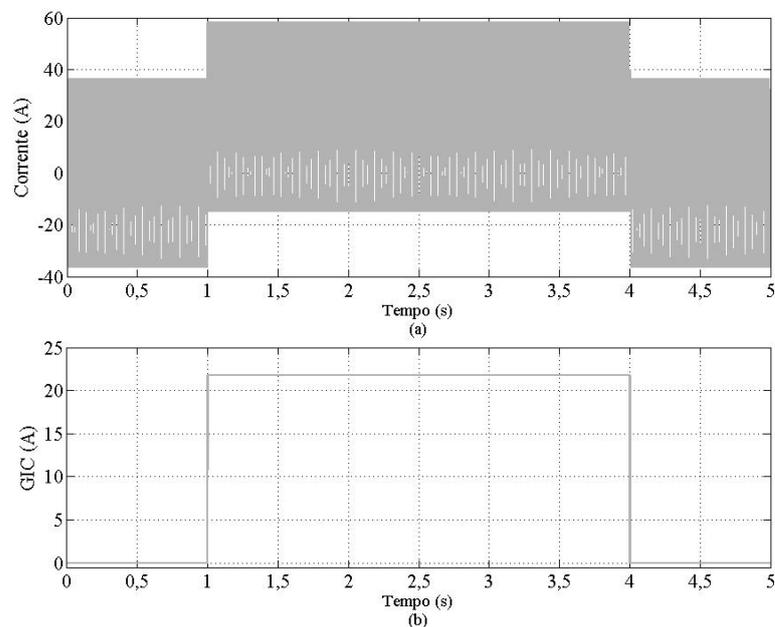
Figura 42 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 16,45 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.



Na Figura 42, pode-se observar o excelente desempenho da metodologia proposta, a qual obteve erros aproximadamente nulos para estimativa da GIC de 16,45 A durante os 3 segundos de duração, exceto nos instantes de início e fim da incidência da corrente geomagneticamente induzida, o que ocorre devido aos motivos esclarecidos para os casos anteriores.

Já para um campo geoeletrico de 4 V/km, a Figura 43(a) mostra a forma de onda do sinal obtido a partir da simulação da ação da GIC de 21,804 A, também com duração de 3 segundos, no sistema teste analisado. Pode-se notar o *offset* causado pela ação dessa corrente. Ainda, em (b), é mostrado o sinal da GIC simulada.

Figura 43 – Resultados obtidos para uma GIC de 21,804 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.



Na Figura 44 apresenta o desempenho da metodologia para a GIC de 21,804 A. Em (a), percebe-se a proximidade entre o sinal de referência e o estimado pela metodologia. Em (b) e (c), são mostrados os erros transitórios absoluto e relativo da estimação, os quais apresentam valores elevados nos momentos de início e fim da incidência da GIC pelos mesmos motivos relatados para os casos anteriores. Ainda, destaca-se que a estimação da GIC apresenta erros praticamente nulos para o intervalo entre esses dois instantes.

Por fim, na Figura 45 (a), mostrada a forma de onda do sinal obtido a partir da simulação da ação de uma GIC de 27,255 A, também com duração de 3 segundos, resultante da atuação de um campo geoeletrico de 5 V/km. Em (b), pode-se verificar o sinal de GIC atuante no sistema. Além disso, a partir da Figura 46, pode-se observar o excelente desempenho da metodologia proposta, a qual obteve erros aproximadamente nulos para estimativa da GIC de 27,255 A.

Ressalta-se que, da mesma forma que para os casos anteriores, a metodologia apresenta erros elevados para os instantes de início e fim da incidência da GIC e erros praticamente iguais

a zero para o intervalo entre esses dois instantes, mostrando-se eficaz e robusta para a detecção dessas correntes.

Figura 44 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 21,804 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.

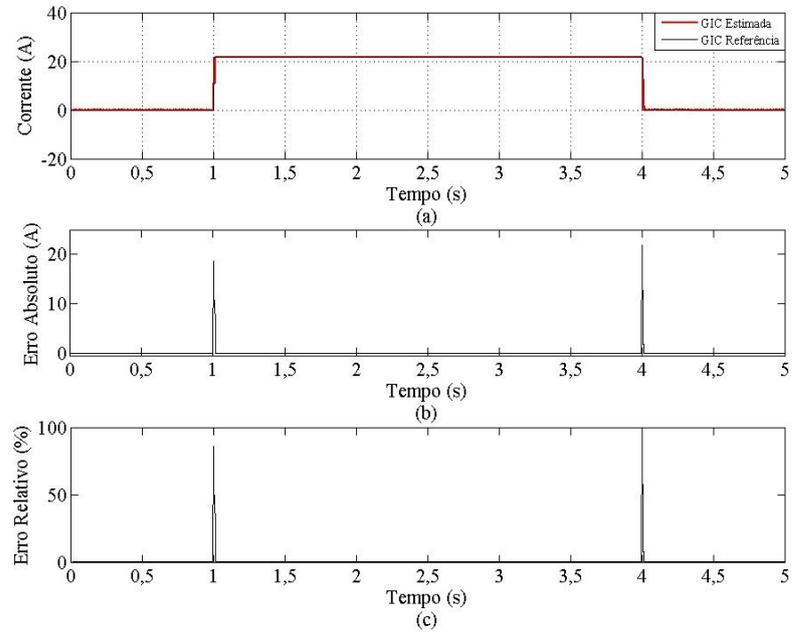


Figura 45 – Resultados obtidos para uma GIC de 27,255 A. (a) Sinal de Corrente Resultante da ação da GIC. (b) Sinal da GIC.

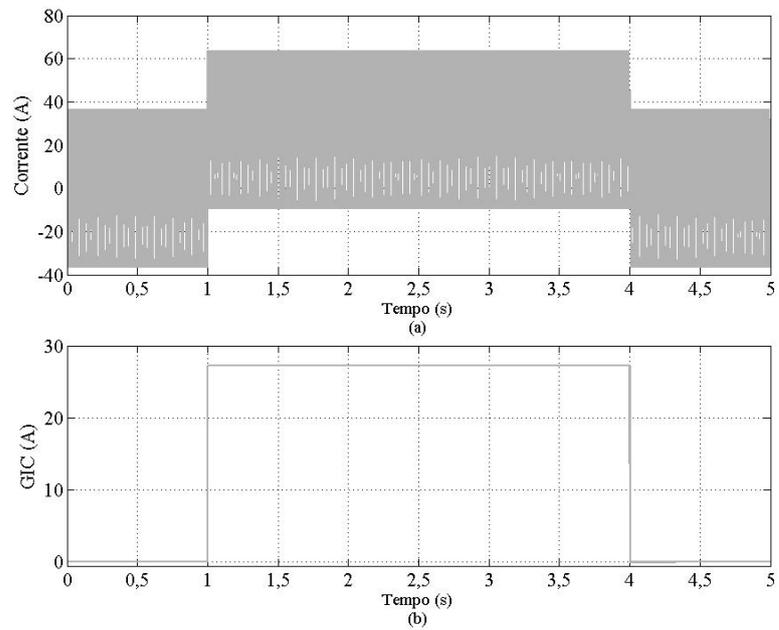
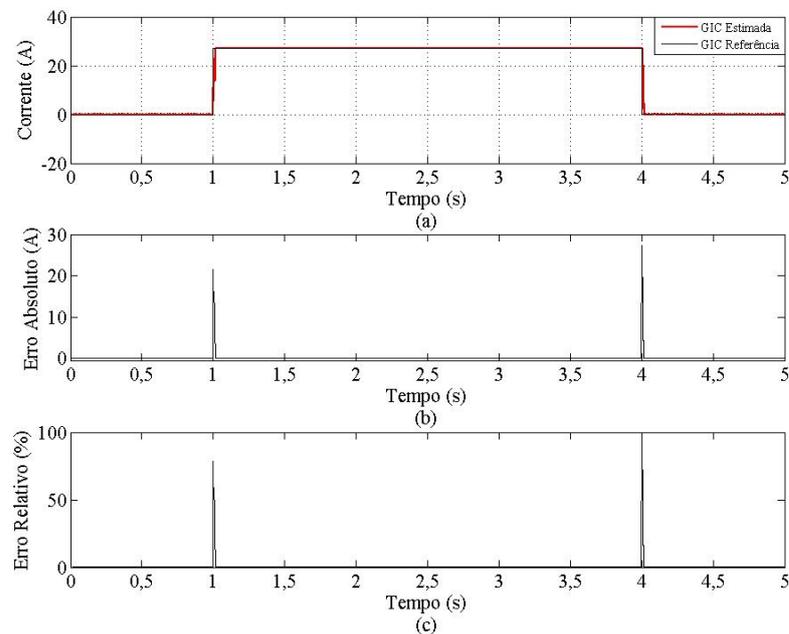


Figura 46 – Desempenho da metodologia proposta para uma GIC de 27,255 A. (a) Resposta do filtro (b) Erro Absoluto (c) Erro Relativo.



5.2 Considerações Finais

Em todos os casos analisados (GICs de 5,451 A, 10,902 A, 16,45 A, 21,804 A e 27,255 A), a metodologia apresenta erros elevados para os instantes de início e fim da incidência da GIC e erros praticamente iguais a zero para o intervalo entre esses dois instantes. Isso ocorre porque, nesses instantes, a janela processada ainda guarda os máximos e mínimos anteriores ao novo estado. Por exemplo, para o instante inicial da ocorrência da GIC, a janela processada guarda máximos e mínimos do sinal de corrente de carga anterior à ocorrência da GIC. Analogamente, para o instante onde é cessado o efeito da GIC, a janela de dados processada ainda contém máximos e mínimos do sinal de corrente sob efeito da GIC e, por isso, a estimativa apresenta os erros elevados nos referidos instantes. Logo, pode-se dizer que a estimativa da GIC é atrasada em uma amostra em relação ao sinal de referência. Em outras palavras, a GIC estimada será uma amostra atrasada em relação a sua ocorrência. Esse fato não é relevante, uma vez que todas as aplicações da morfologia matemática oferecem atrasos em relação às estimativas e que o atraso de uma amostra representa um intervalo muito pequeno de tempo em relação aos tempos de atuação dos sistemas de proteção.

Dessa forma, os resultados demonstrados nesta seção comprovam que a metodologia proposta é capaz de detectar adequadamente a ocorrência de GICs em sistemas elétricos de potência. Ressalta-se que, em condições de carregamento elevado, as GICs podem provocar a atuação indevida dos dispositivos de proteção, promovendo desligamentos não programados, os quais são passíveis de multa pelo órgão regulamentador.

Por conseguinte, espera-se que, com a atuação da metodologia proposta, os problemas

causados pelas GICs, tanto para o sistema elétrico quanto para as concessionárias de energia, sejam amenizados. Isso será possível a partir da criação de técnicas de bloqueio dos relés de proteção, as quais utilizem a resposta do filtro proposto como referência. Isto evitaria a atuação indevida desses dispositivos durante a ocorrência dessas correntes. Por fim, ressalta-se que a resposta do filtro proposto poderá ser utilizada na elaboração de defesas das concessionárias de energia frente ao órgão regulamentador, quando estas forem multadas.

O Capítulo seguinte apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

6 Conclusão

Este trabalho apresenta um estudo sobre as correntes geomagneticamente induzidas (GICs), as quais podem provocar a atuação indevida dos sistemas de proteção e reduzir a vida útil dos equipamentos do SEP, além de causar desligamentos não programados, os quais são passíveis de punição por parte dos órgãos regulamentadores.

Também, apresenta-se uma possível correlação entre os distúrbios geomagnéticos, os quais são a causa primária das GICs, e a ocorrência de desarmes sem justificativa aparente, ocorridos na linha de transmissão de 138 kV, entre Santa Maria e Alegrete, no Estado do Rio Grande do Sul. Considerando a localização da respectiva LT, a característica do solo, o tipo de proteção do sistema e a duração dos desarmes sem justificativa aparente, além do histórico da deformação do campo magnético terrestre para os períodos analisados, evidencia-se uma possível relação entre esses desligamentos e as perturbações do campo magnético terrestre, tendo em vista os resultados apresentados. Tais resultados indicam a possível ocorrência de GICs na referida região. Ressalta-se que os desarmes analisados neste estudo não possuem justificativas perante o órgão regulador, o que é passível de multa.

Além disso, propõe-se uma técnica para detecção de GICs. Tal metodologia utiliza operadores da morfologia matemática, de modo a extrair o valor exato da GIC. A técnica proposta foi implementada em Matlab® e testada para sinais de corrente obtidos a partir de simulações de um sistema teste nos softwares OPENDSS® e EMTP-ATP®. Os resultados obtidos a partir do processamento desses sinais comprovaram a boa capacidade de detecção de GICs da técnica proposta, a qual apresentou baixos erros de estimação em todos os casos analisados.

Embora os resultados apresentados sejam bastante significativos, ressalta-se que a metodologia para detecção não é conclusiva sobre a ocorrência das GICs, sendo essencial a análise dos índices geomagnéticos para confirmação da ocorrência das GICs. Dessa forma, para conclusão sobre a ocorrência da GIC, uma análise da resposta do filtro e dos referidos índices faz-se necessária.

Por fim, tendo em vista os estudos e as análises aqui apresentados, espera-se que a técnica proposta possa contribuir para a melhoria da confiabilidade da proteção durante a ocorrência das GICs, além de evitar desligamentos não programados ocasionados pela atuação indevida dos relés, bem como tornar-se uma ferramenta de defesa para as concessionárias de energia frente às severas punições impostas pelos órgãos regulamentadores.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros à esta Dissertação, citam-se:

- Avaliar a influência das GICs sobre a saturação de transformadores de corrente, de potencial e potência;
- Analisar o efeito térmico das GICs sobre transformadores de potência e sua vida útil;
- Analisar o efeito das GICs sobre os relés de proteção, tanto pela corrente circulante na linha de transmissão, quanto pela corrente circulante no aterramento da própria proteção;
- Criar técnicas de bloqueio para relés de proteção, que atuem com base na resposta do filtro proposto e em sinais provenientes de magnetômetros estrategicamente instalados ao longo do dispositivo protegido;
- Criação de uma ferramenta computacional capaz de confirmar a ocorrência de GIC com base na resposta do filtro e nos índices geomagnéticos, para defesa de concessionárias frente aos órgãos regulamentadores, quando estas forem multadas por desligamentos não justificados.

Referências

ANEEL. *Relatório de Análise : desligamentos forçados do Sistema de Transmissão / Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília : ANEEL, 2016. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 40, 51 e 59.*

ANSARY, A. SOLAR CYCLES AND EARTH'S WEAKENING MAGNETIC FIELD. *www.nexusmagazine.com*, p. 31–36, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

BOTELER, D. H.; PIRJOLA, R. J. Modelling geomagnetically induced currents produced by realistic and uniform electric fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 4, p. 1303–1308, 1998. ISSN 08858977. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 60.

BOZOKI, B. et al. The effects of GIC on protective relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 725–734, 1996. ISSN 08858977. Citado na página 34.

CEEE. *Companhia de Energia Elétrica Estadual*. 2016. Disponível em: <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1913>. Citado na página 40.

DOS SANTOS, E. M. *Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção*. Tese (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

DUGAN, R. C. Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). *Electric Power Research Institute, Inc.*, n. November, p. 1–177, 2013. Citado na página 60.

GIRGIS, R. et al. Effect of GIC on Power Transformers and power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, ABB Power, p. 1–8, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 24, 31 e 36.

GIRGIS, R. et al. Methodology for evaluating the impact of GIC and GIC capability of power transformer designs. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, p. 1–5, 2013. ISSN 19449925. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 35.

HEINDL, M. et al. INVESTIGATION OF GIC RELATED EFFECTS ON POWER DC- Load Source TUT. 2011. Citado na página 24.

HORTON, R. et al. A test case for the calculation of geomagnetically induced currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 4, p. 2368–2373, 2012. ISSN 08858977. Citado na página 60.

LEITHOLD, A.; PEREIRA, O. *ANOMALIA MAGNÉTICA DO*. 2006. 1–10 p. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

MASAHITO, N. *Graduate School of Science, Kyoto University*. 1990. nose@kugi.kyoto-u.ac.jp p. Disponível em: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/_realtime/index.html. Citado 3 vezes nas páginas 30, 33 e 42.

MOLINSKI, T. S. Why utilities respect geomagnetically induced currents. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, n. 16, p. 1765–1778, 2002. ISSN 13646826. Citado na página 26.

- MOORE, J. W. *Ev world*. 2012. Disponível em: <<http://evworld.com/about.cfm>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 25.
- MOORE, S. K. Extreme Solar Storm Forecasters predict stormy space weather It was one of the fastest-traveling solar storms seen , and induced up. *IEEE Spectrum*, p. 15–16, 2003. Citado na página 24.
- MUSTAFA, T. I. a. H. et al. A Study of Correlation between Protection Trips and Geomagnetically Induced Currents in a Power Transmission Line in Brazil. *Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 837–840, 2013. ISSN 10774076. Citado 5 vezes nas páginas 31, 34, 35, 42 e 59.
- NASA. *Sun - Galleries - Planets - NASA Solar System Exploration*. [S.l.], 2015. Citado 6 vezes nas páginas 23, 25, 26, 28, 29 e 53.
- NASA. *STEREO-A's reawakening - STCE*. [S.l.], 2016. Citado na página 53.
- NASA. *Sun - Overview - Planets - NASA Solar System Exploration*. 2017. Citado 5 vezes nas páginas 53, 54, 55, 56 e 57.
- NASA-NOAA. *NOAA - Natiom Centers for environmental information*. 1982. KP–AP INDEX p. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 42.
- NEXANS, C. *Alumínio - Condutores Nus*. [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/fileLibrary/Download_540134436/Brazil/files/catalogonus_maio2013.pdf>. Citado na página 59.
- PINTO, L. M. V. G. et al. Um Novo Olhar sobre a Segurança de Sistemas Elétricos. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, p. 1–6, 2008. Disponível em: <<http://www.mantenimentomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/olhar.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 18, 30, 34, 37 e 60.
- PIRJOLA, R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 28, n. 6, p. 1867–1873, 2000. ISSN 00933813. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 30, 36 e 37.
- RAMÍREZ-NI, J. Core saturation effects of geomagnetic induced currents in power transformers. v. 14, p. 87–92, 2016. Citado na página 35.
- REINERT, D. et al. *Principais solos da depressão central e campanha do Rio Grande do Sul*. [S.l.], 2007. 47 p. Citado na página 60.
- STERN, D. P.; PEREDO, M. *The Exploration of the Earth's Magnetosphere*. 2003. Disponível em: <<http://www.phy6.org/Education/wmap.html>>. Citado na página 27.
- TOBERGTE, D. R.; CURTIS, S. *O Campo Magnético da Terra*. 1689–1699 p. Tese (Doutorado), 2013. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 28 e 29.
- TRICHTCHENKO, A. a.; BOTELER, D. H.; FOSS, A. M. GIC modelling for an overdetermined system. *7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology the Proceedings, EMCECO 2007*, n. May, p. 254–256, 2007. ISSN 08407789. Citado na página 19.

WU, Q.; LU, Z.; JI, T. *Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 1. 93–124 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 62.

Anexos

ANEXO A – Relação dos índices Geomagnéticos e os Desarmes de 2010.

Figura 47 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

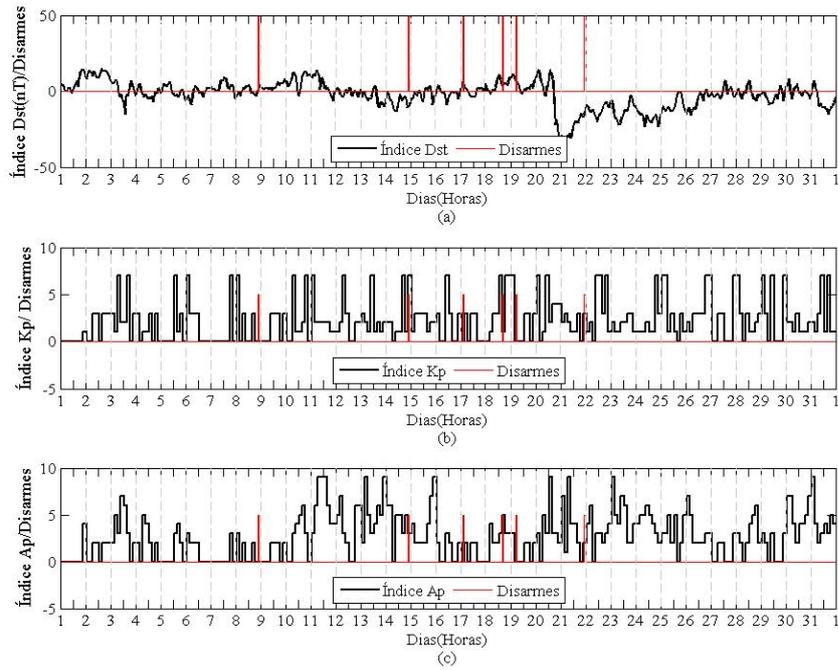


Figura 48 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

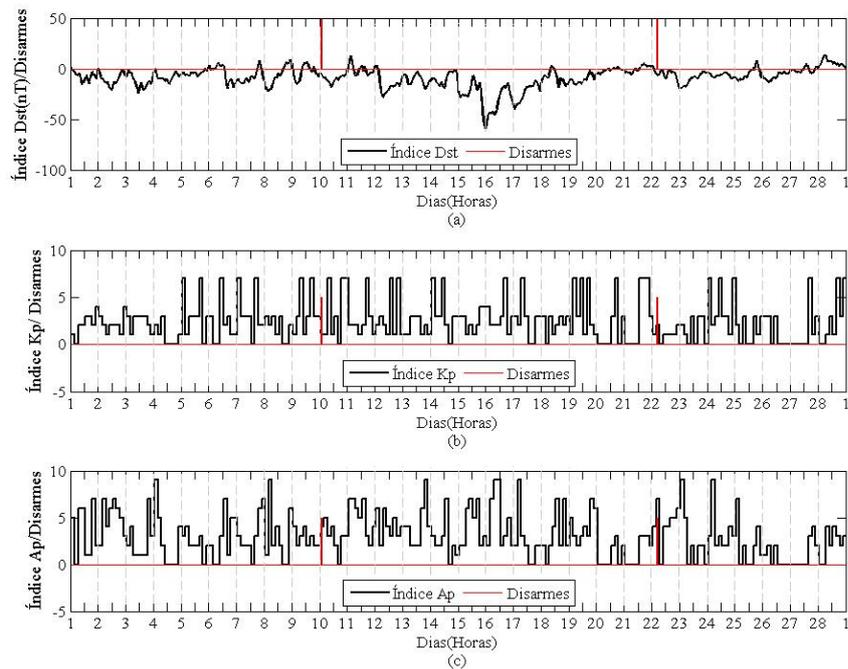


Figura 49 – Relação de desarmes do mês de Março de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

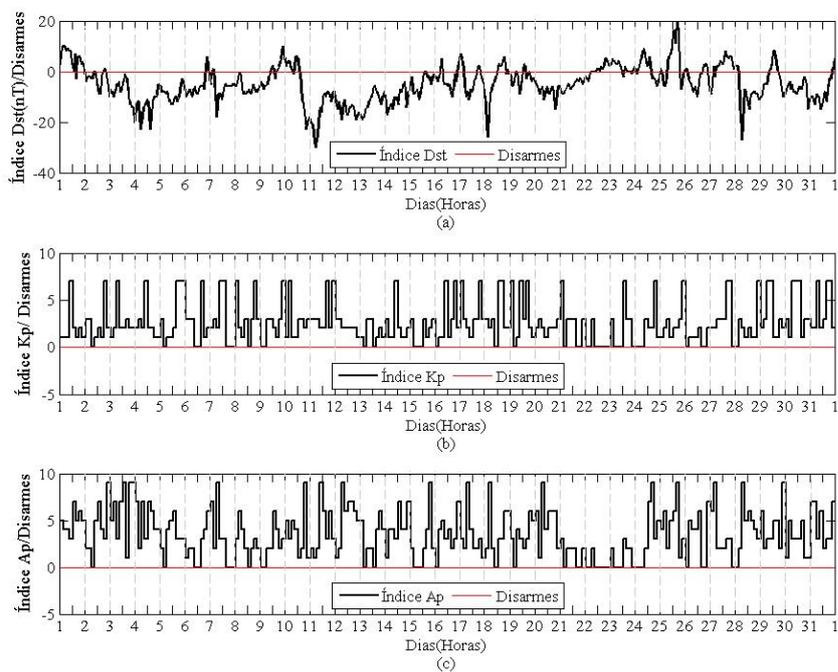


Figura 50 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

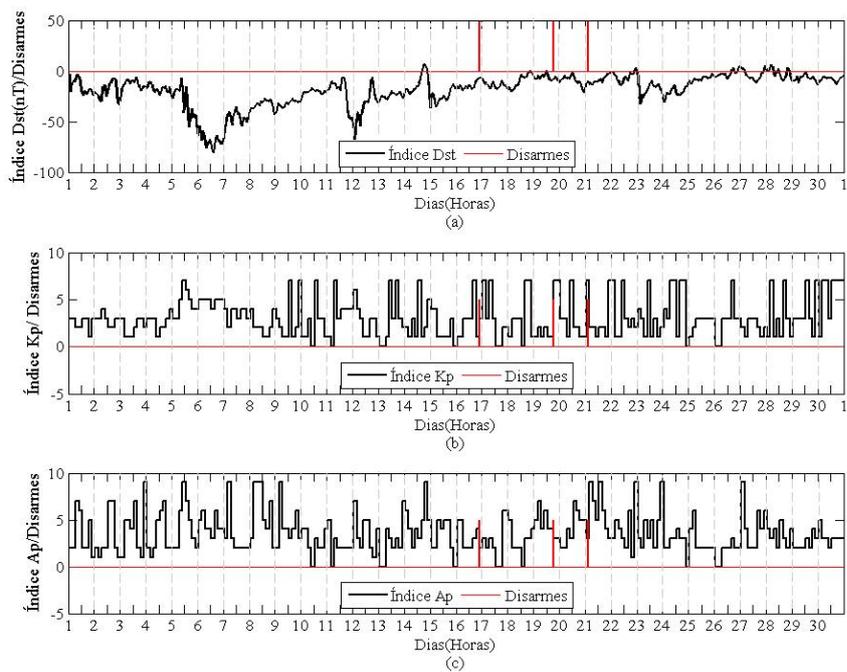


Figura 51 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

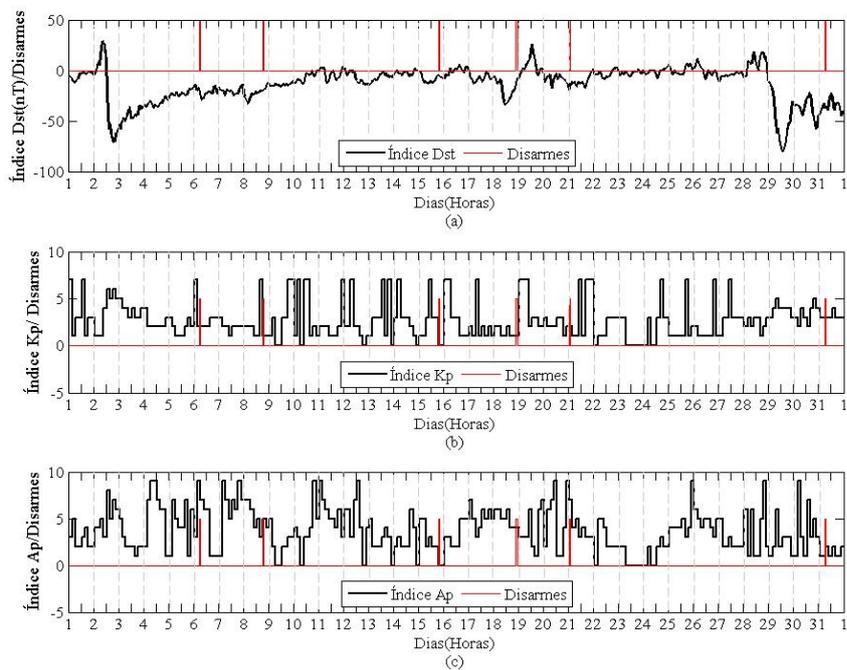


Figura 52 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

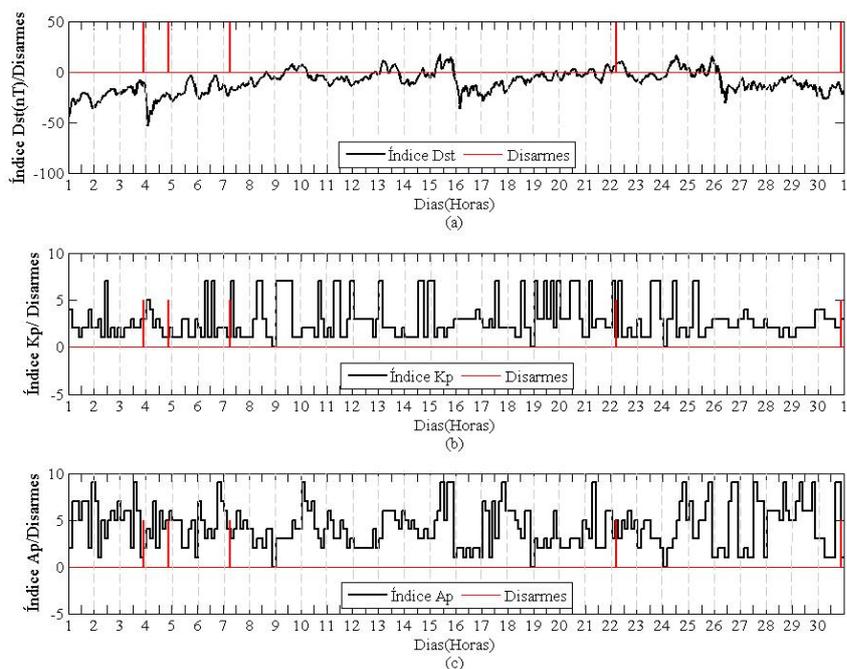


Figura 53 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

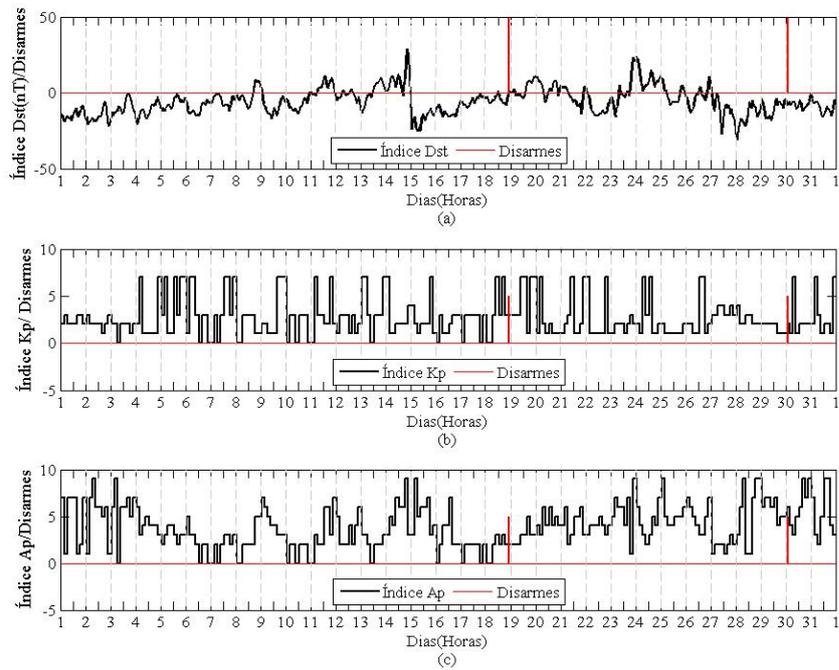


Figura 54 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

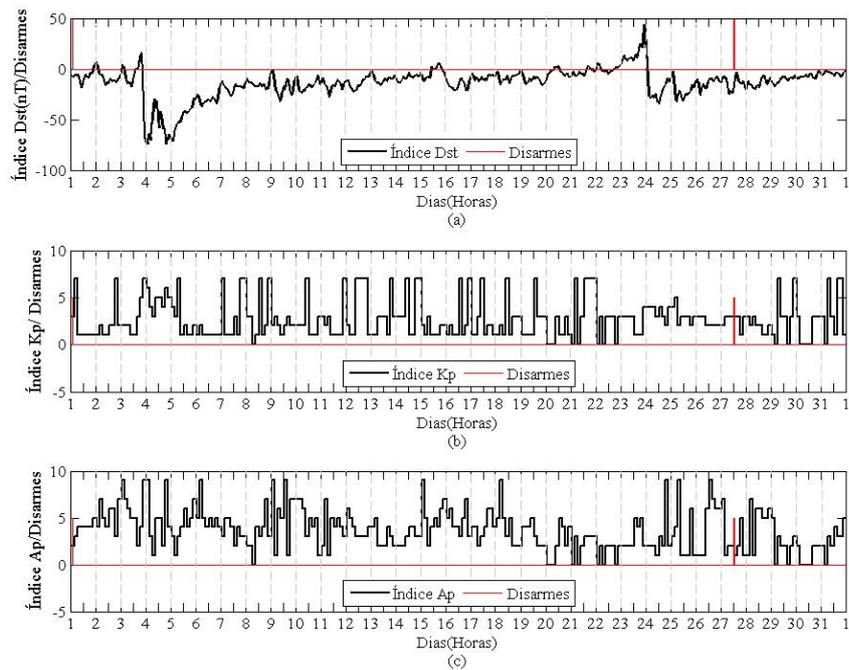


Figura 55 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

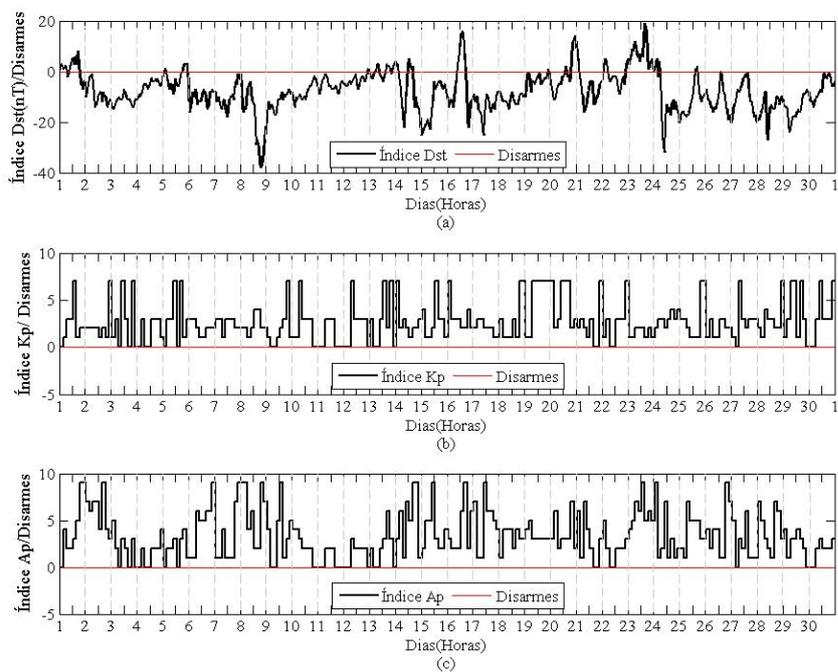


Figura 56 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

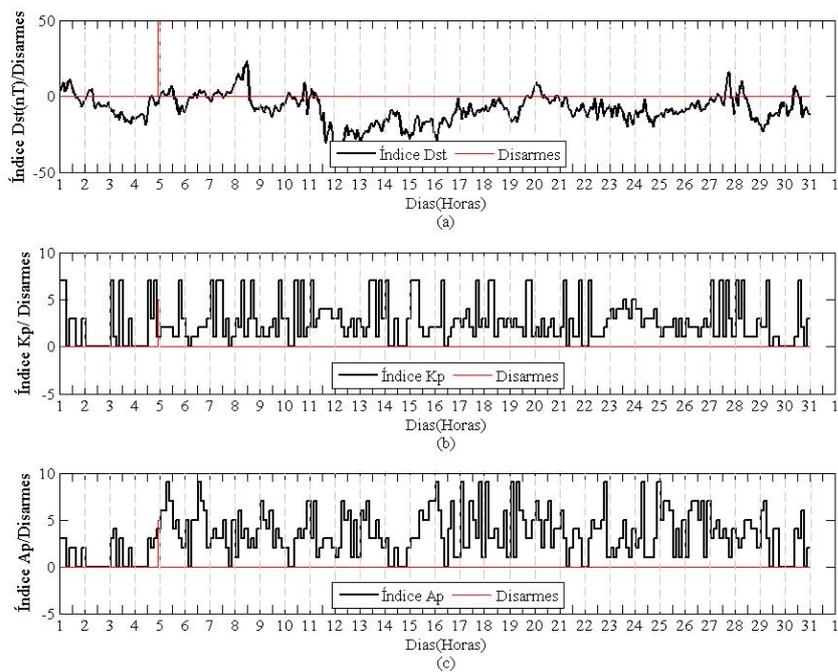


Figura 57 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.

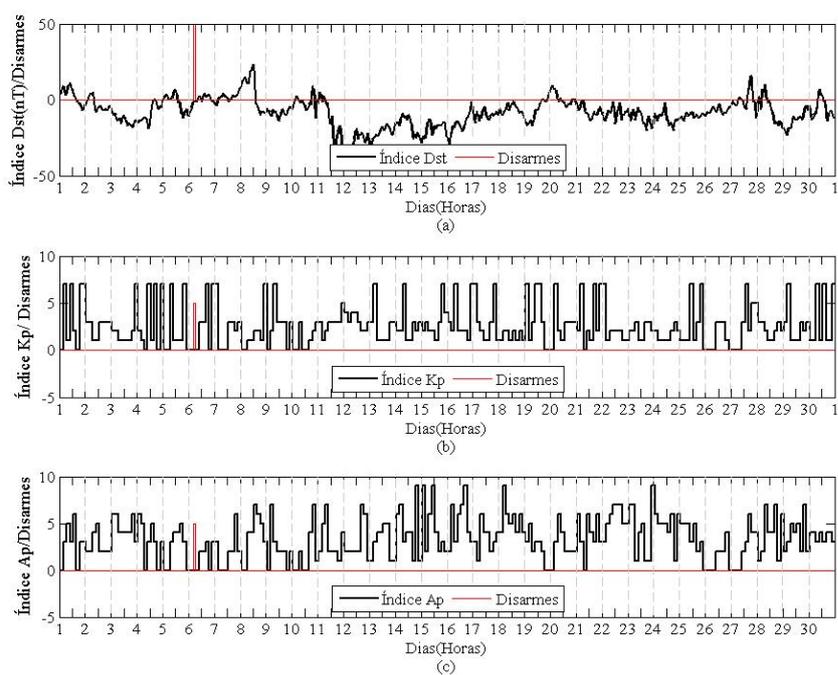
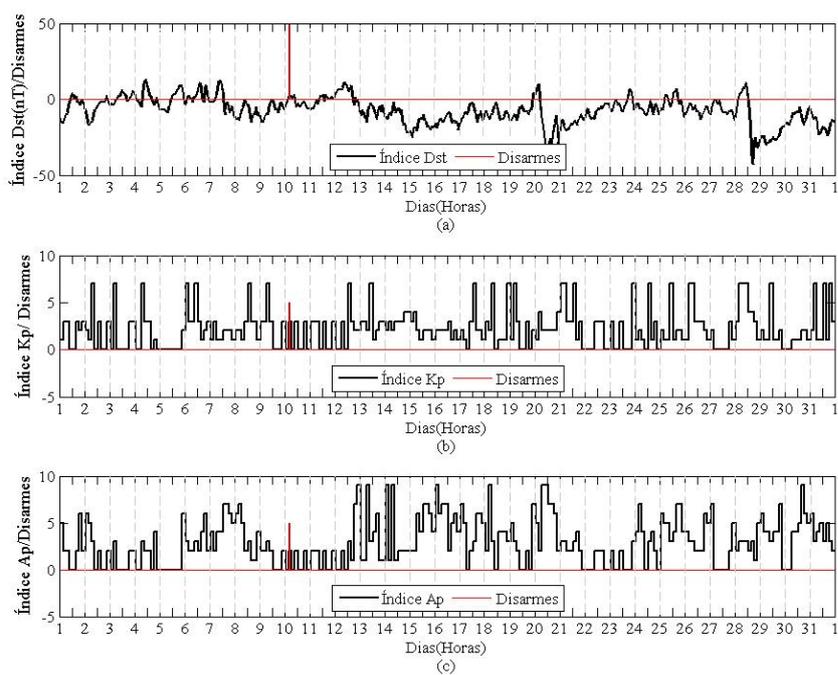


Figura 58 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2010 com o Dst, Kp e Ap.



ANEXO B – Relação dos índices Geomagnéticos e os Desarmes de 2011.

Figura 59 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

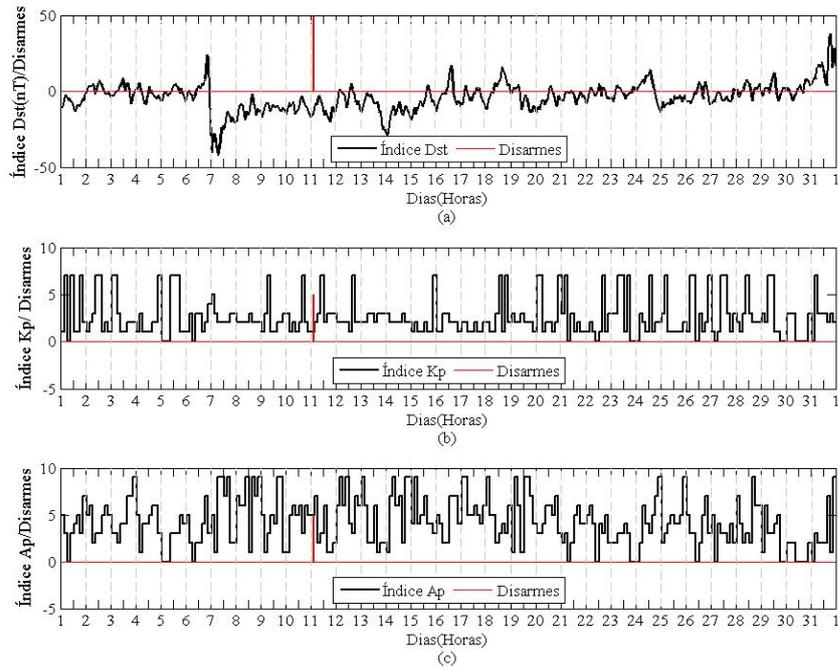


Figura 60 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

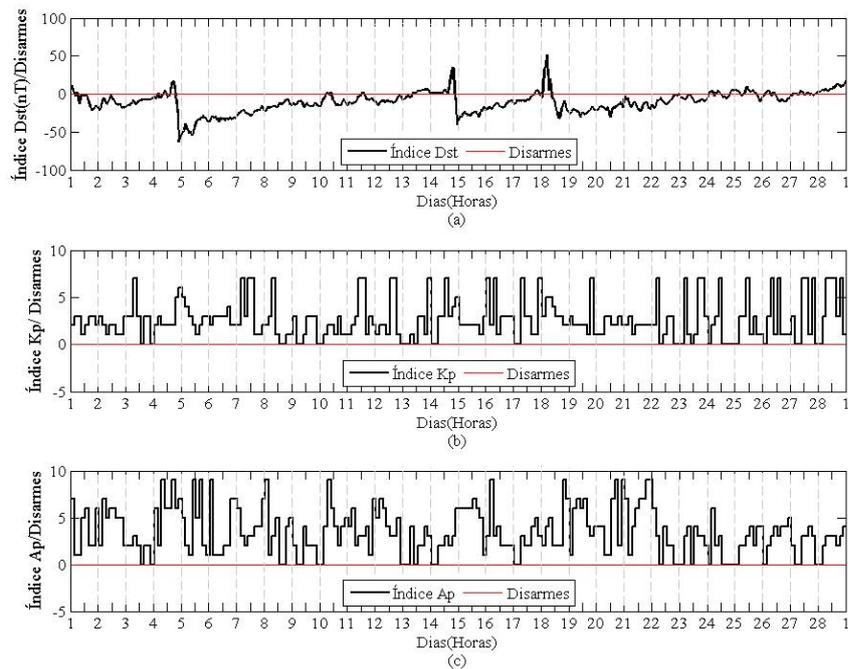


Figura 61 – Relação de desarmes do mês de Março de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

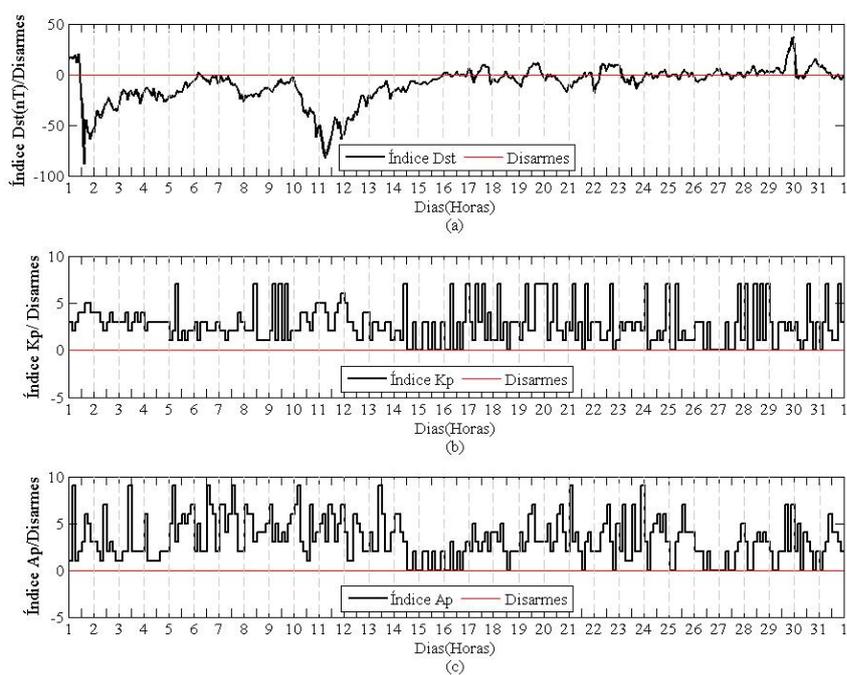


Figura 62 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

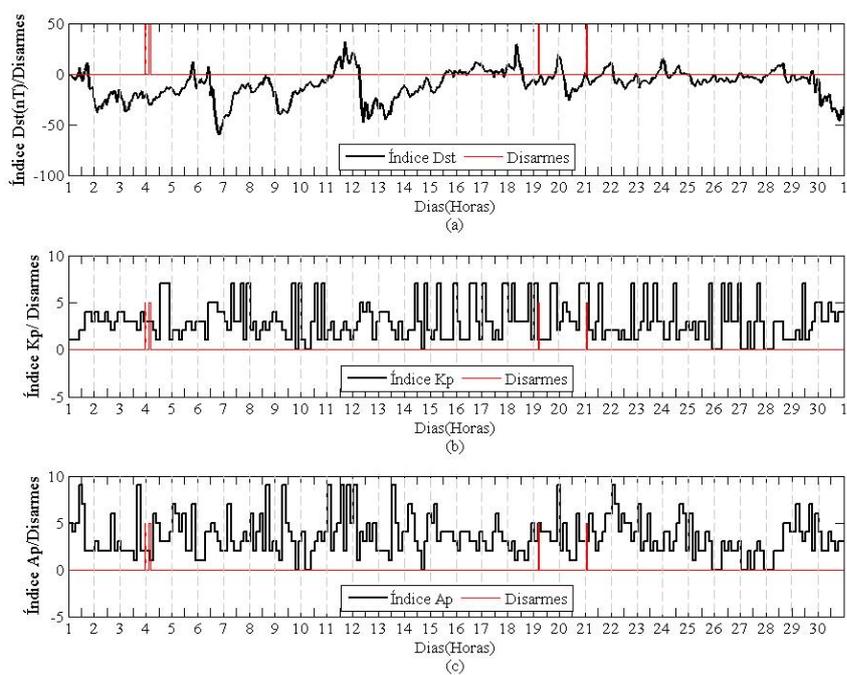


Figura 63 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

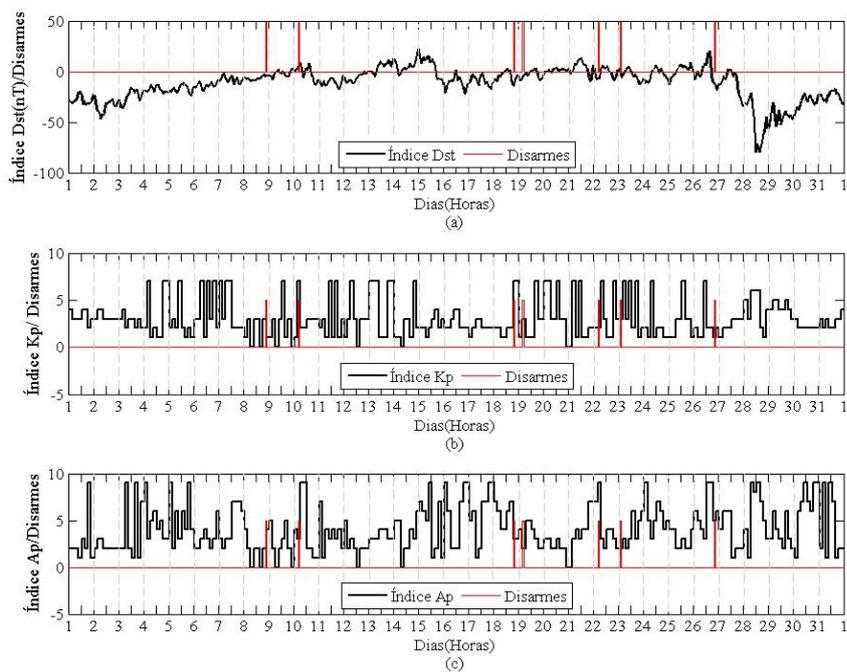


Figura 64 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

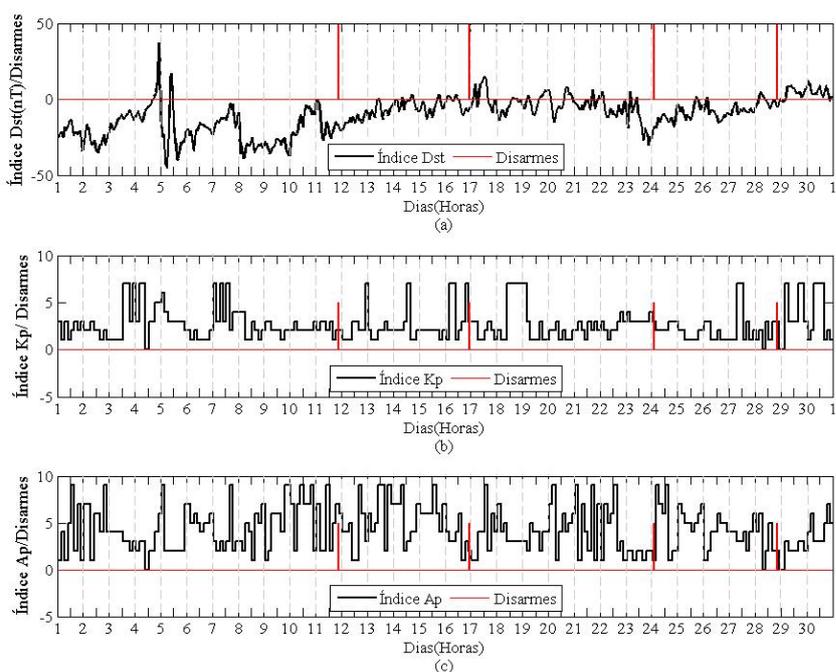


Figura 65 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

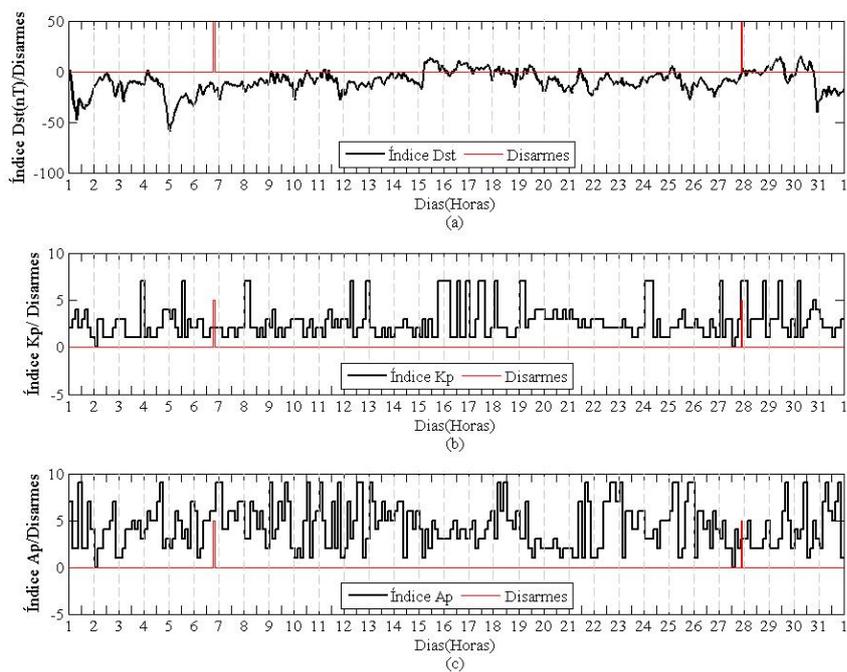


Figura 66 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

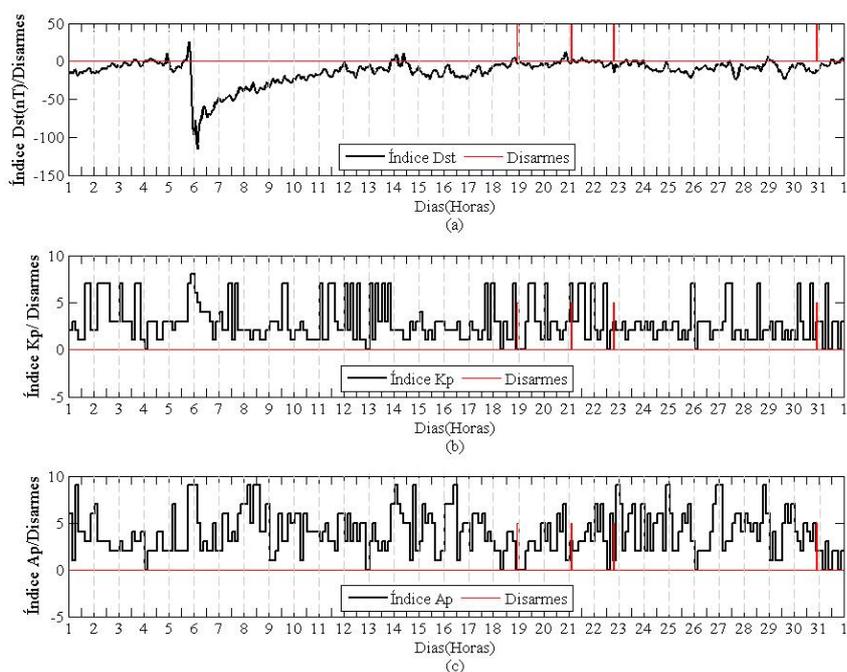


Figura 67 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

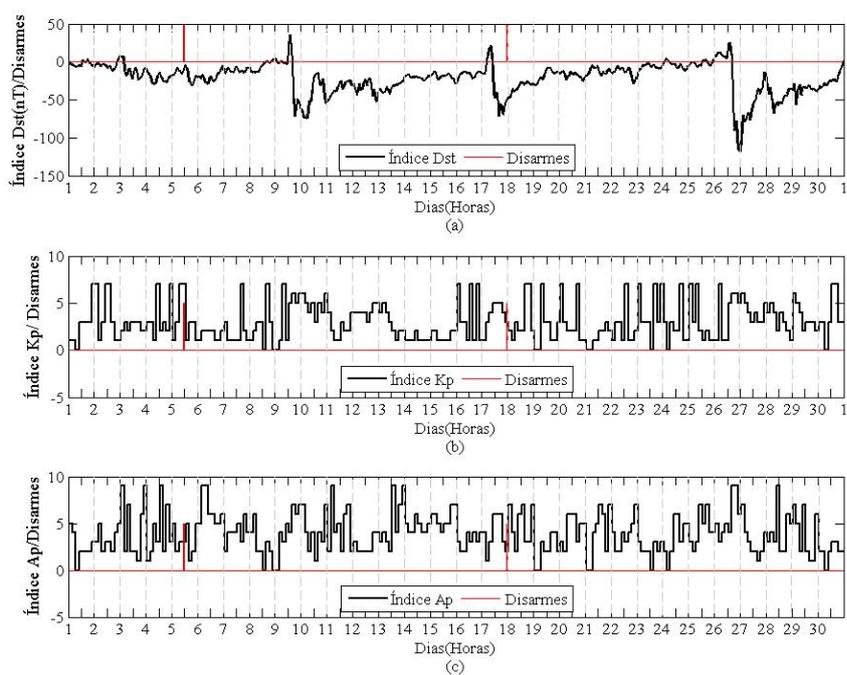


Figura 68 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

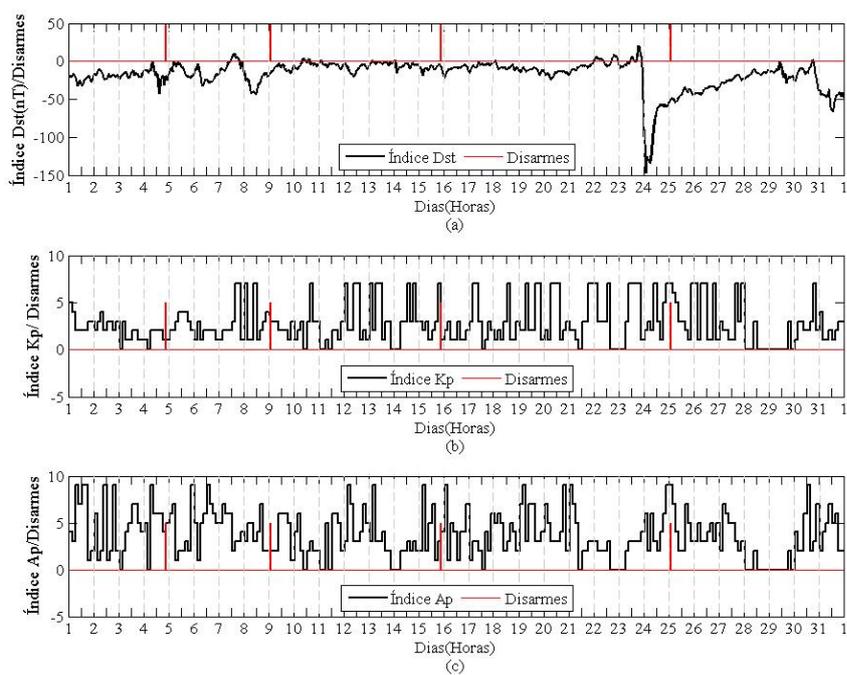


Figura 69 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.

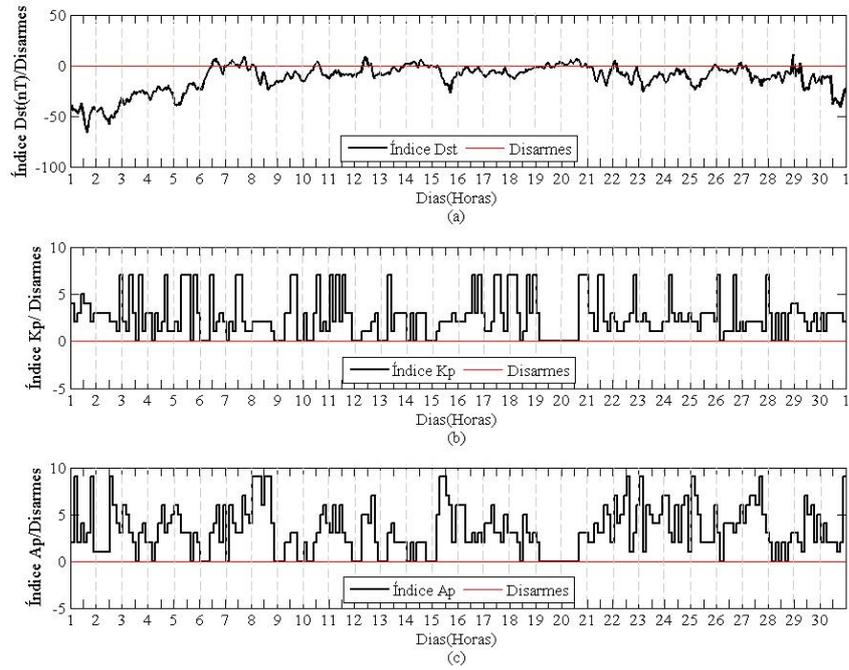
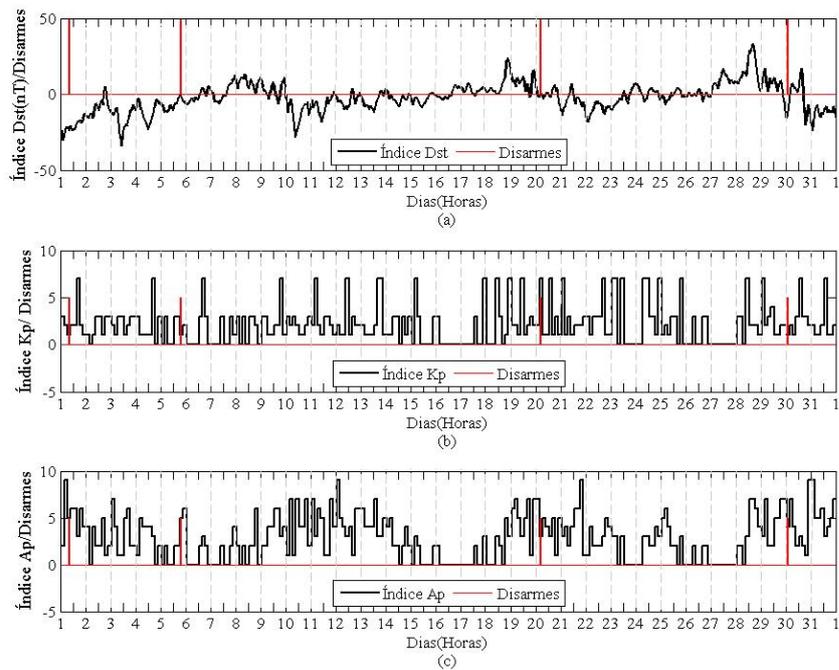


Figura 70 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2011 com o Dst, Kp e Ap.



ANEXO C – Relação dos índices Geomagnéticos e os Desarmes de 2012.

Figura 71 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

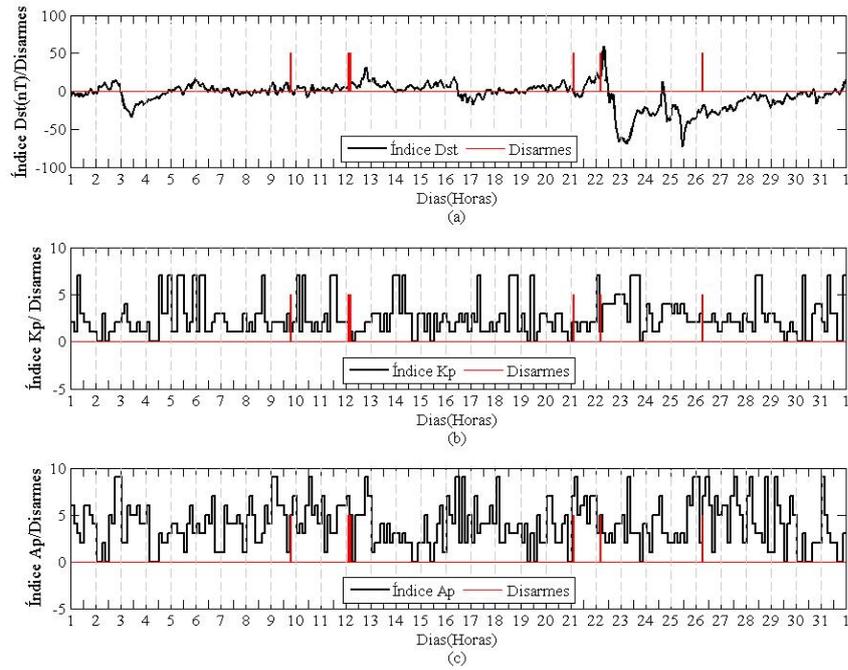


Figura 72 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

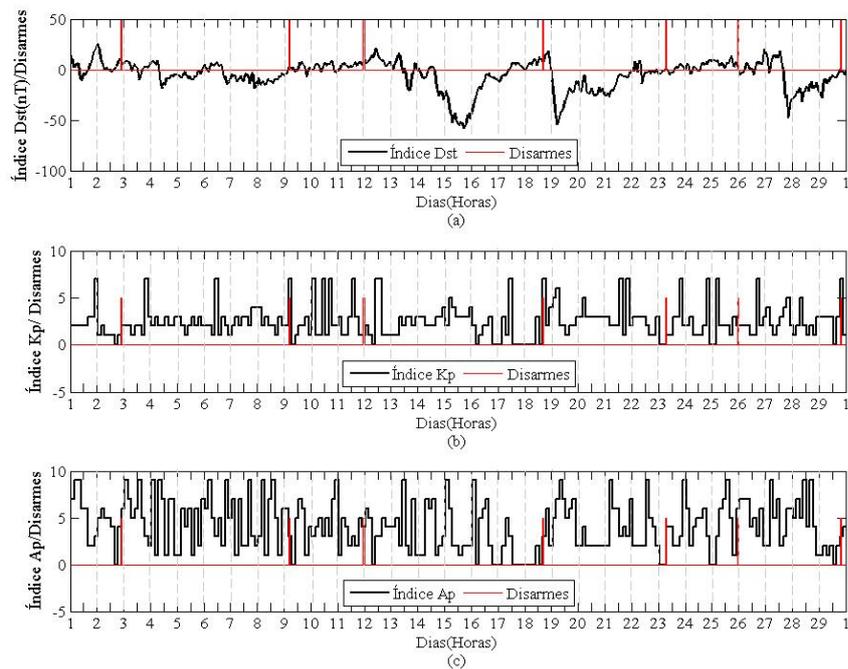


Figura 73 – Relação de desarmes do mês de Março de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

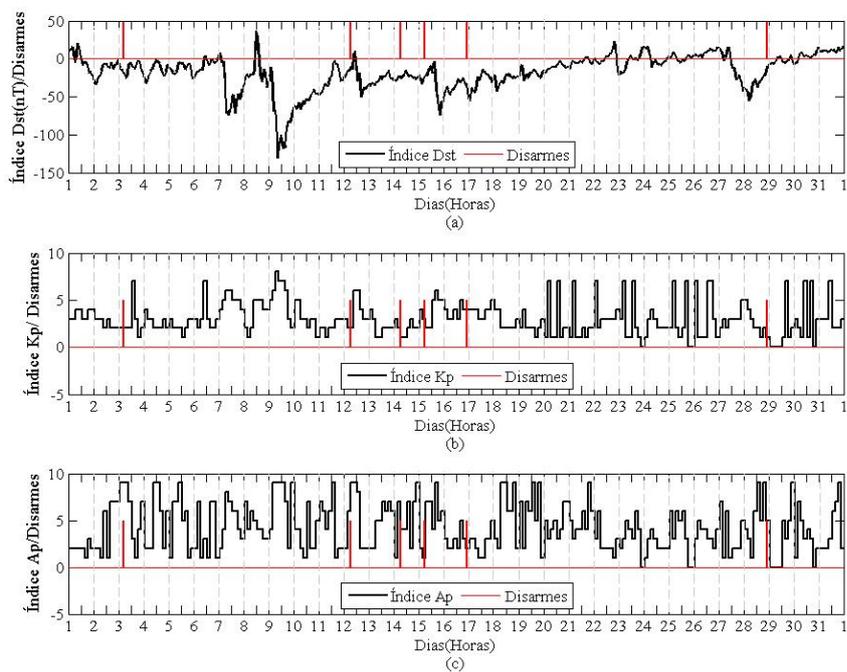


Figura 74 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

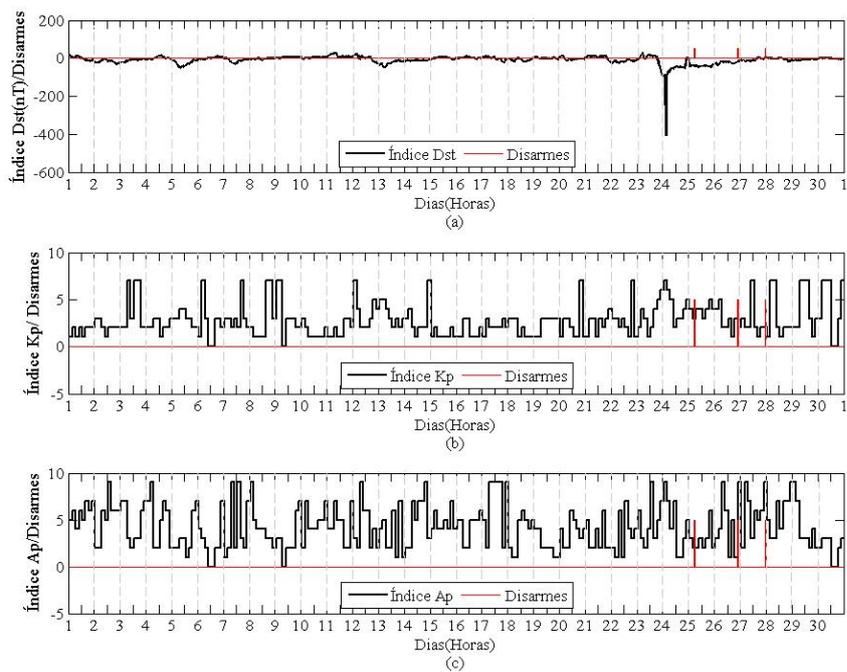


Figura 75 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

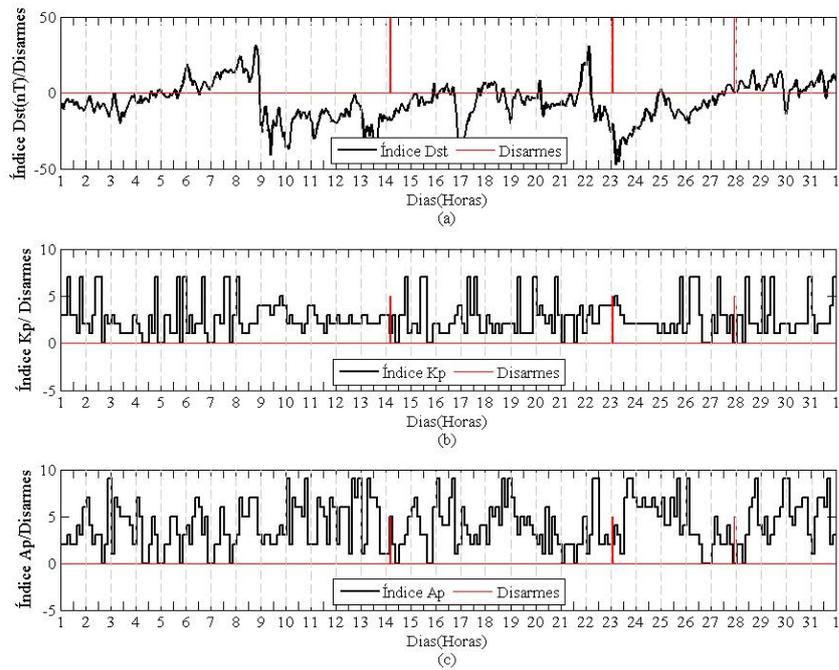


Figura 76 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

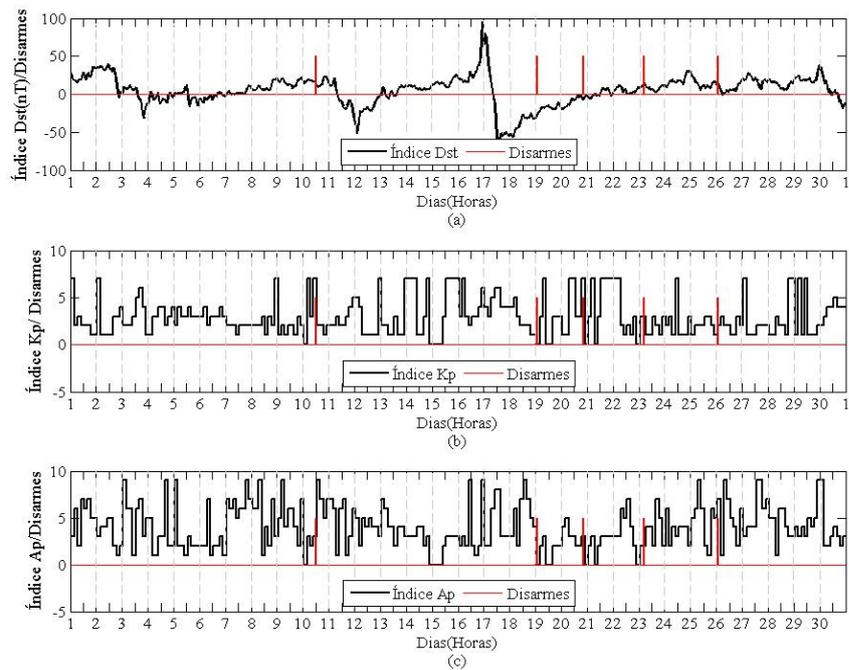


Figura 77 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

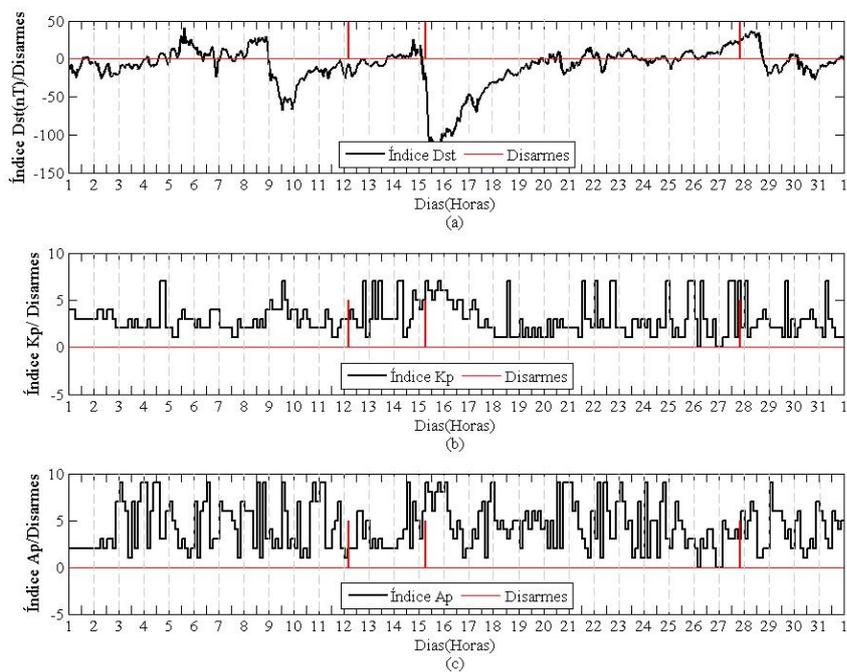


Figura 78 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

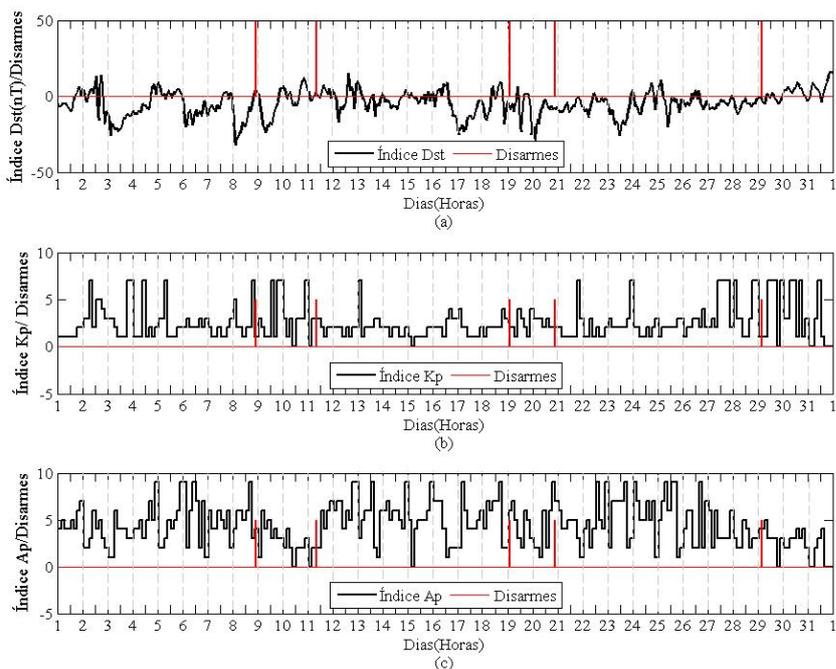


Figura 79 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

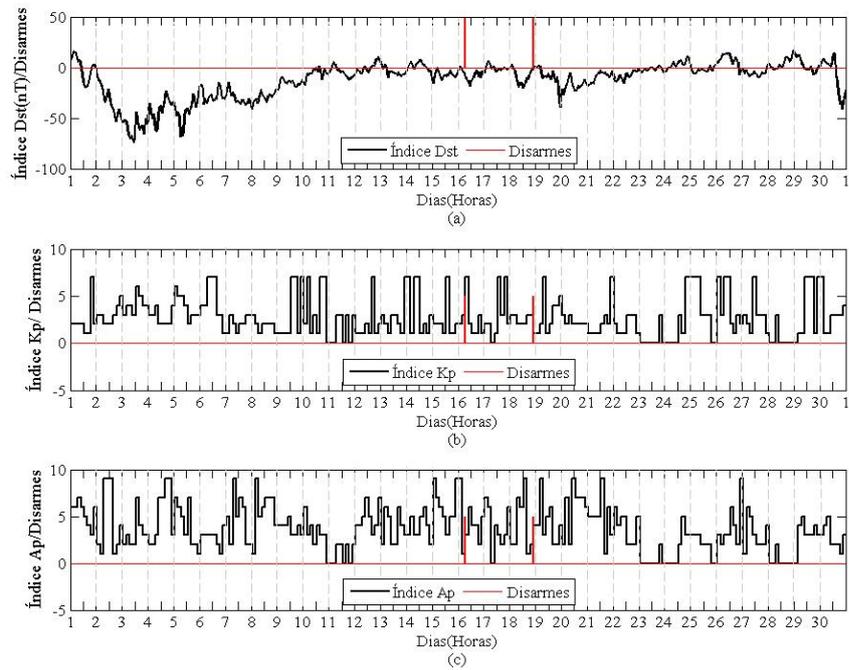


Figura 80 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

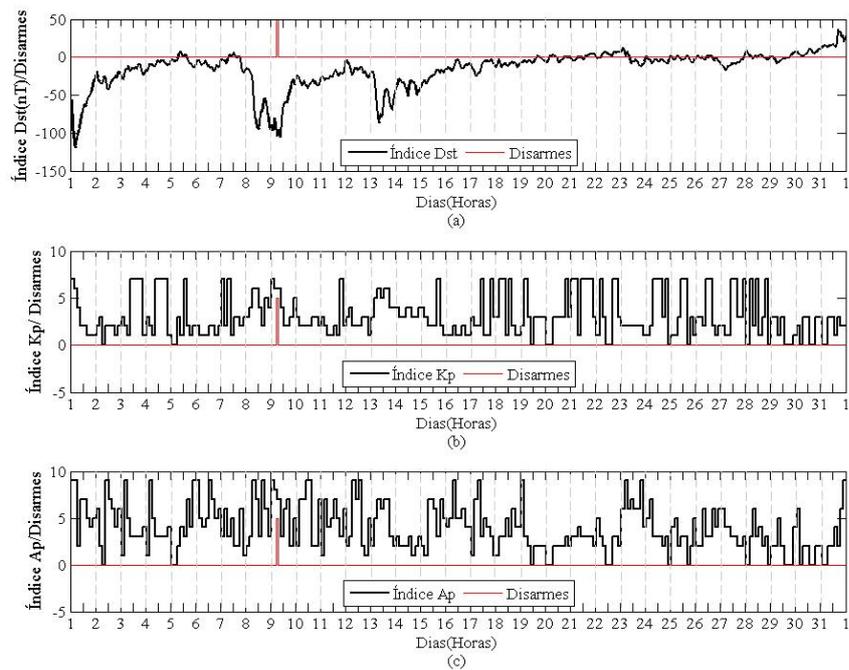


Figura 81 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.

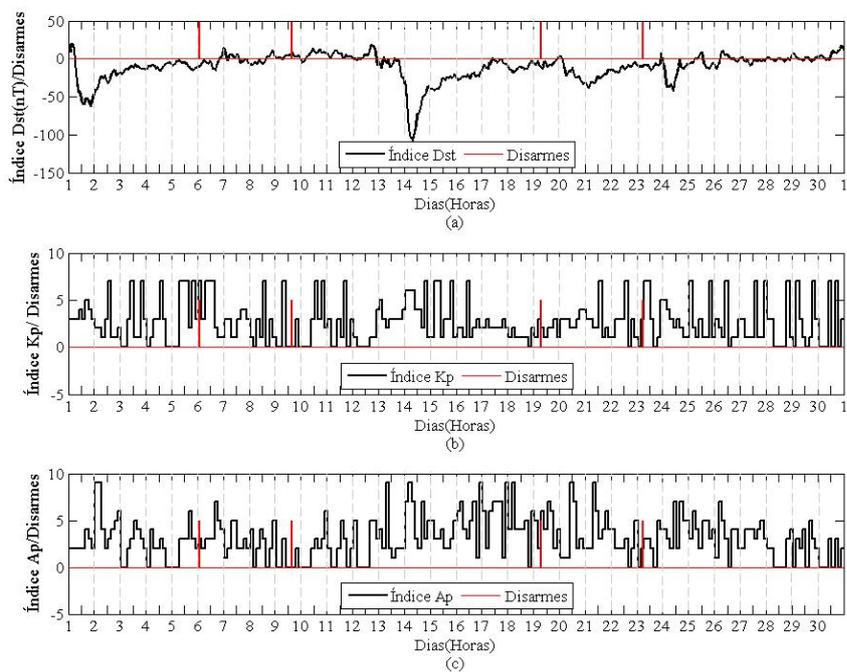
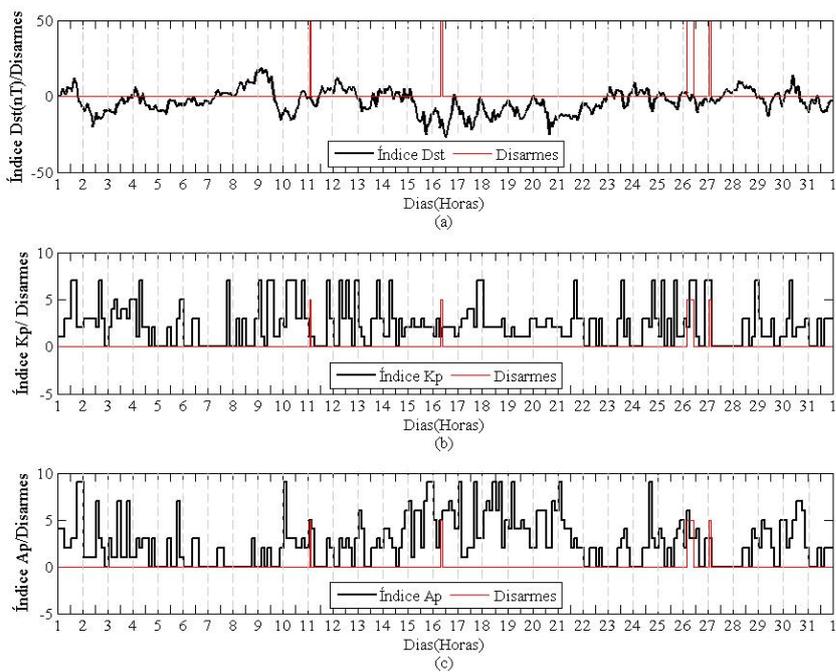


Figura 82 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2012 com o Dst, Kp e Ap.



ANEXO D – Relação dos índices Geomagnéticos e os Desarmes de 2013.

Figura 83 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

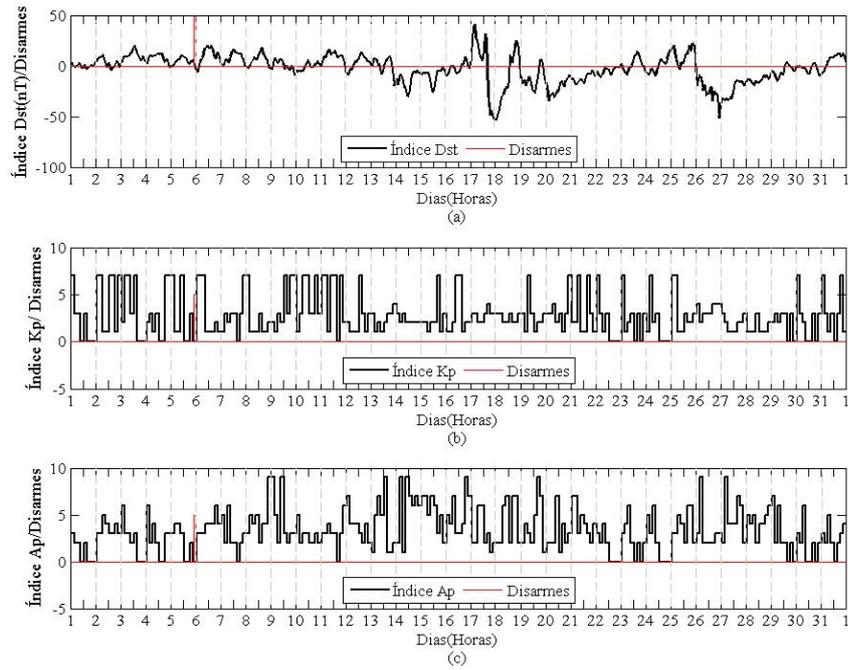


Figura 84 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

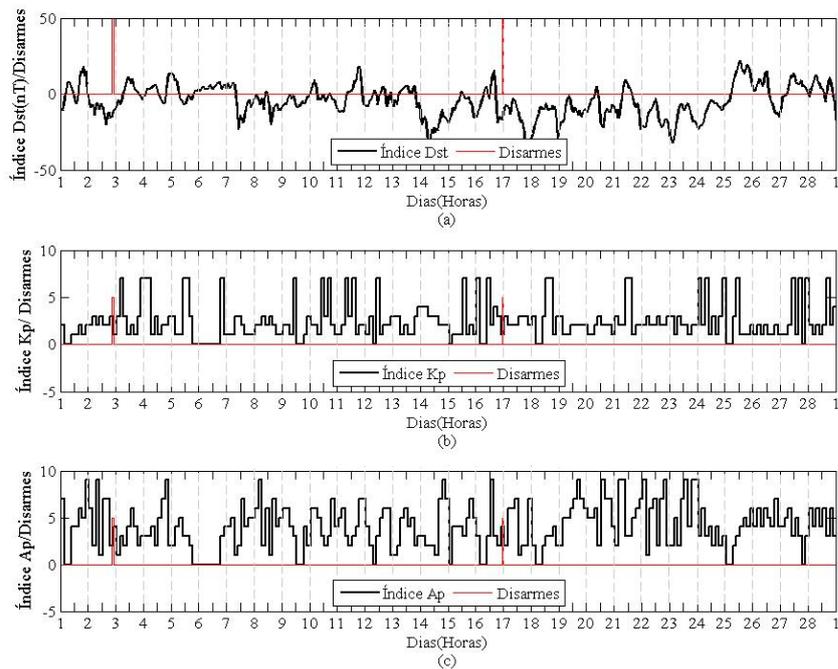


Figura 85 – Relação de desarmes do mês de Março de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

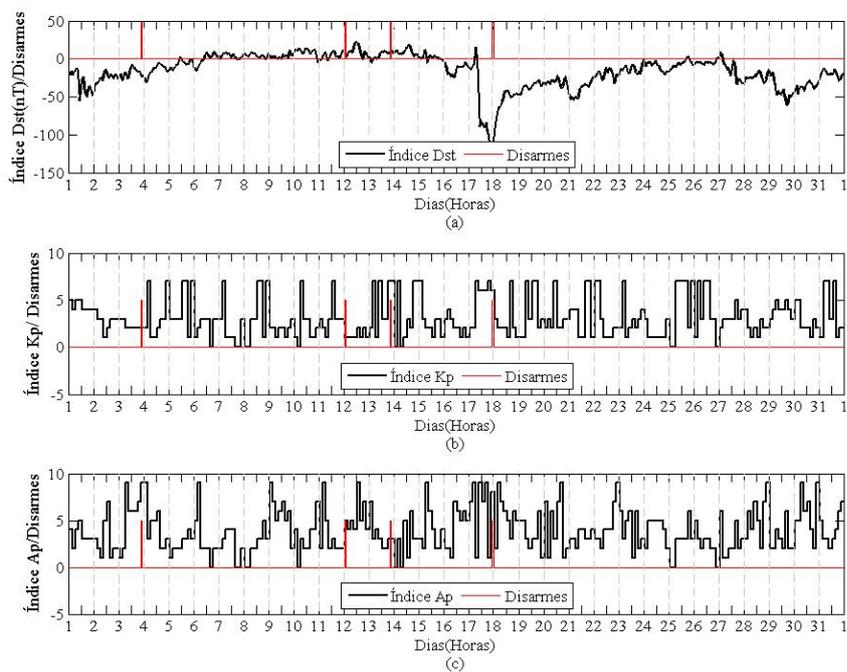


Figura 86 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

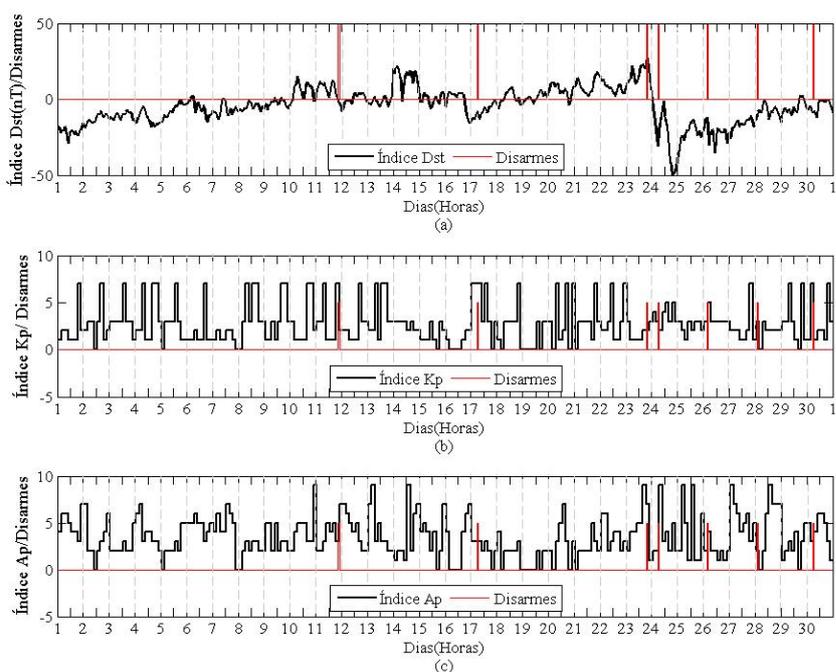


Figura 87 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

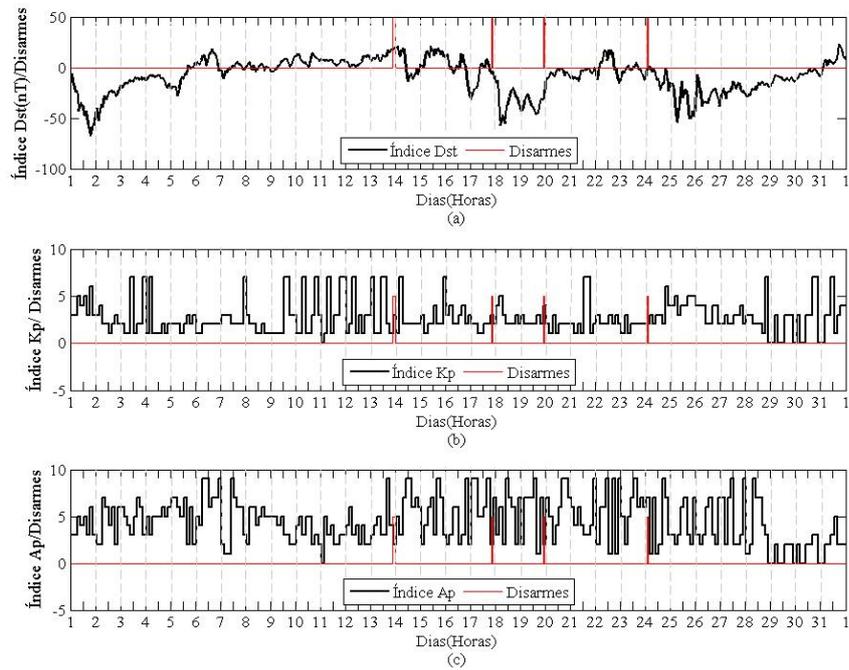


Figura 88 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

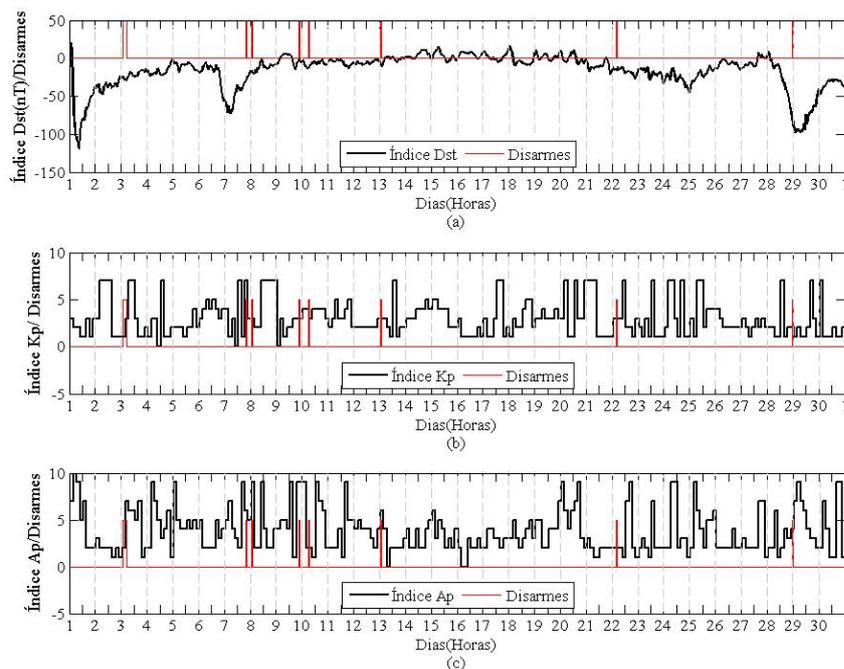


Figura 89 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

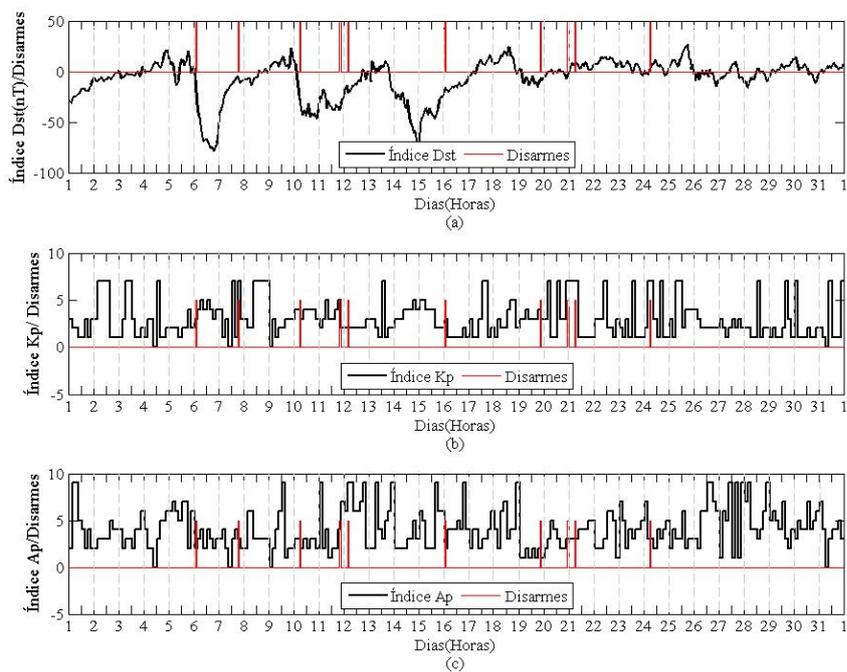


Figura 90 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

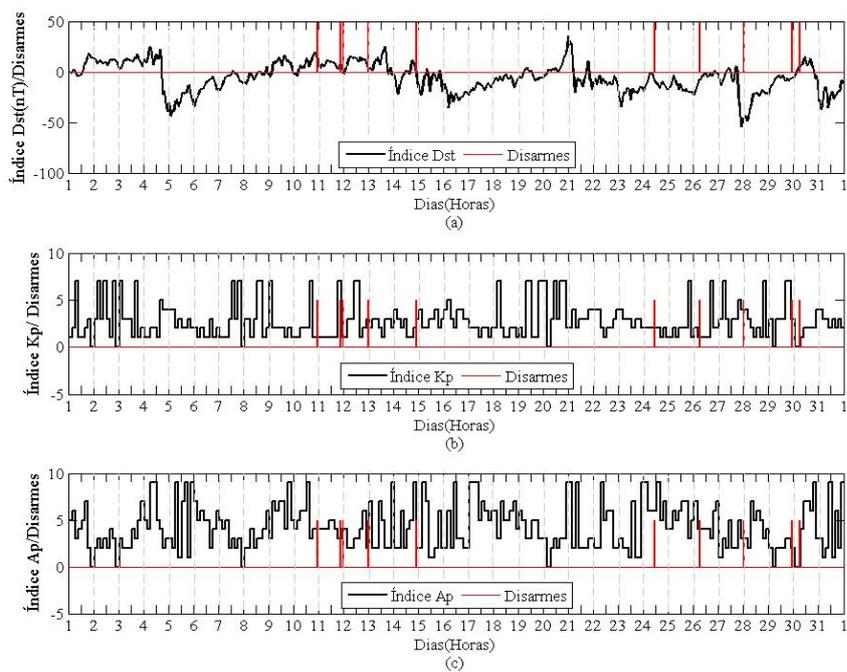


Figura 91 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

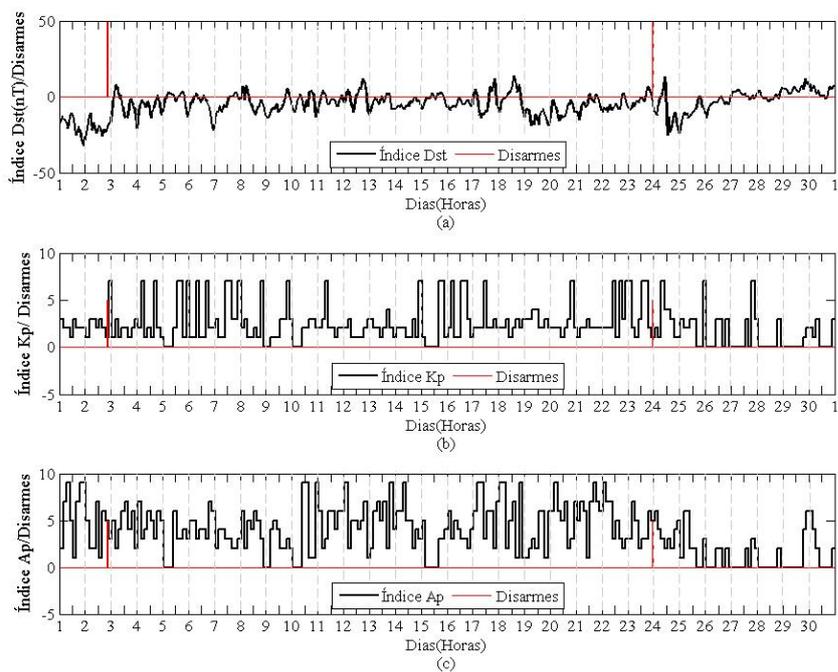


Figura 92 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

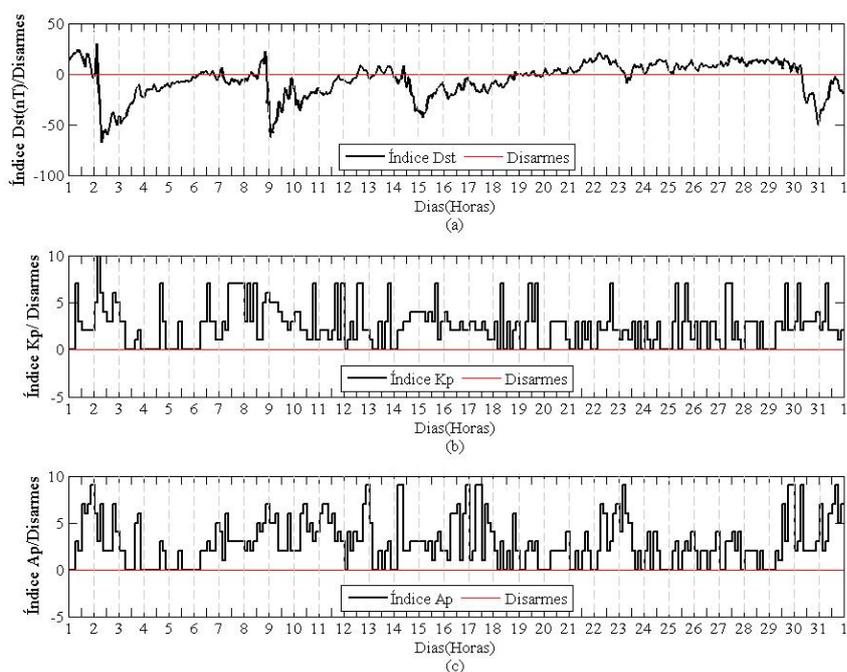


Figura 93 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.

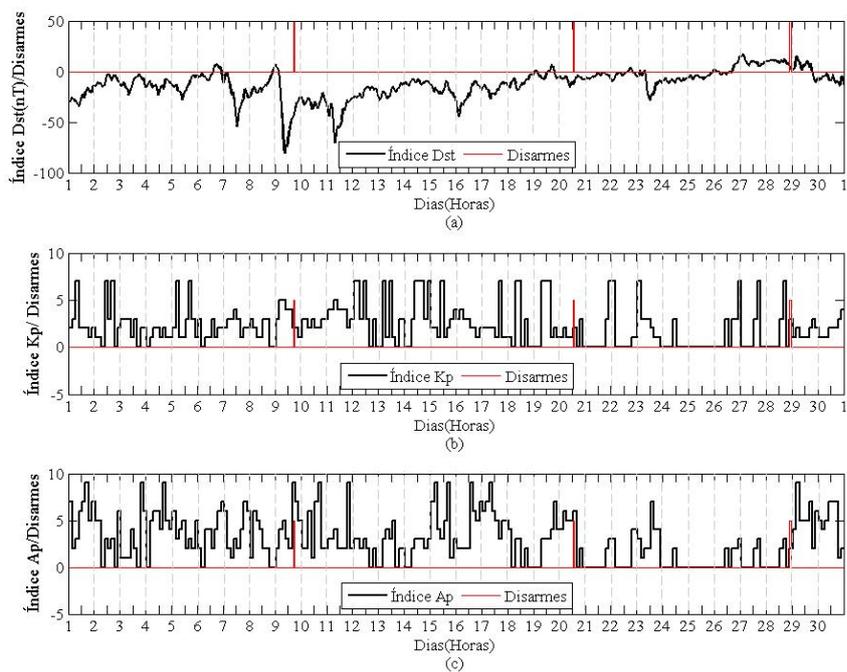
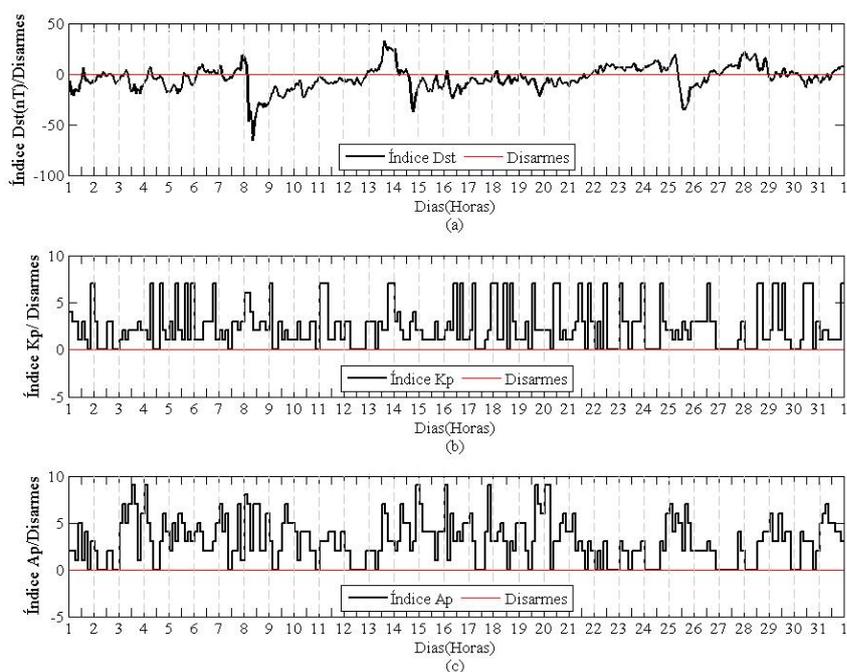


Figura 94 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2013 com o Dst, Kp e Ap.



ANEXO E – Relação dos índices Geomagnéticos e os Desarmes de 2014.

Figura 95 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

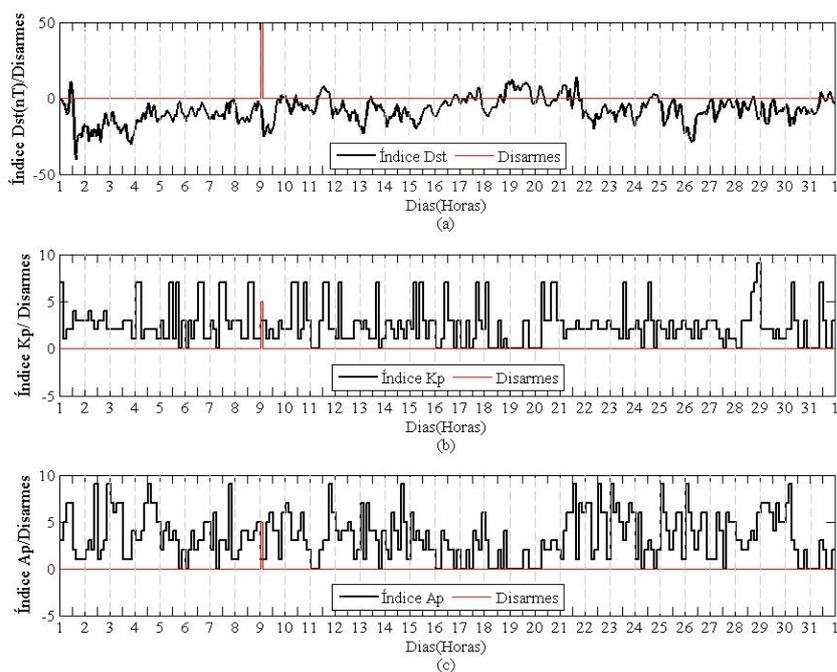


Figura 96 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

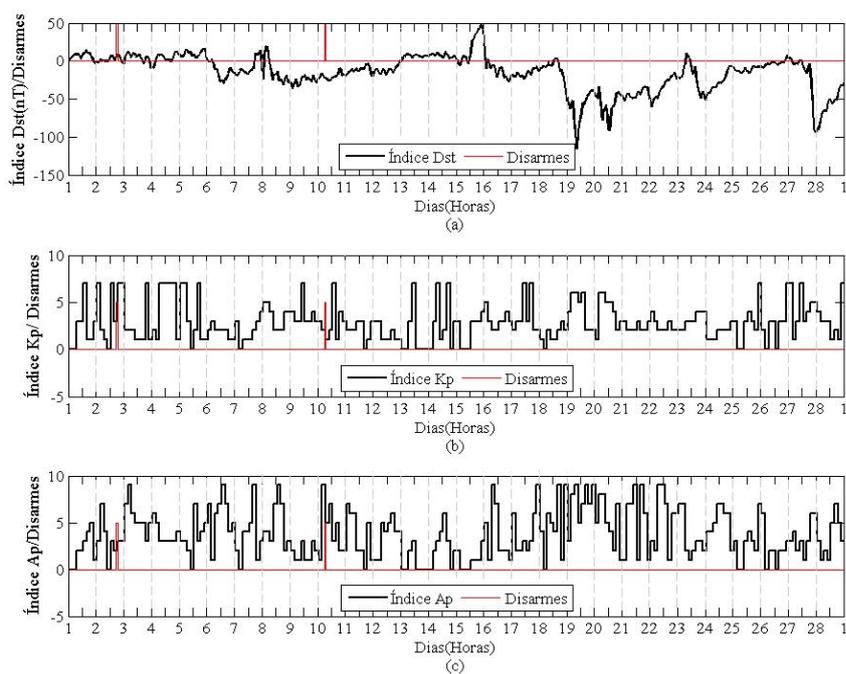


Figura 97 – Relação de desarmes do mês de Março de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

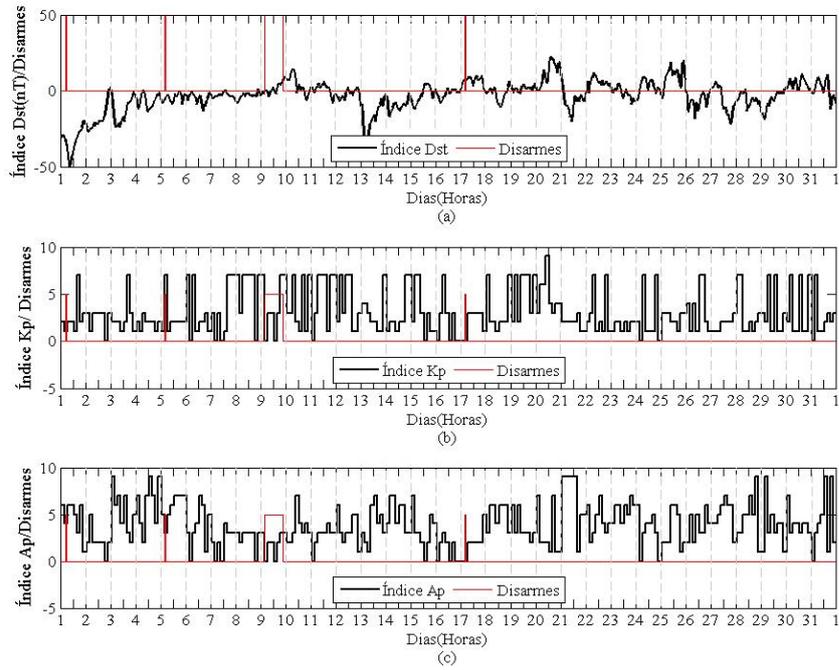


Figura 98 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

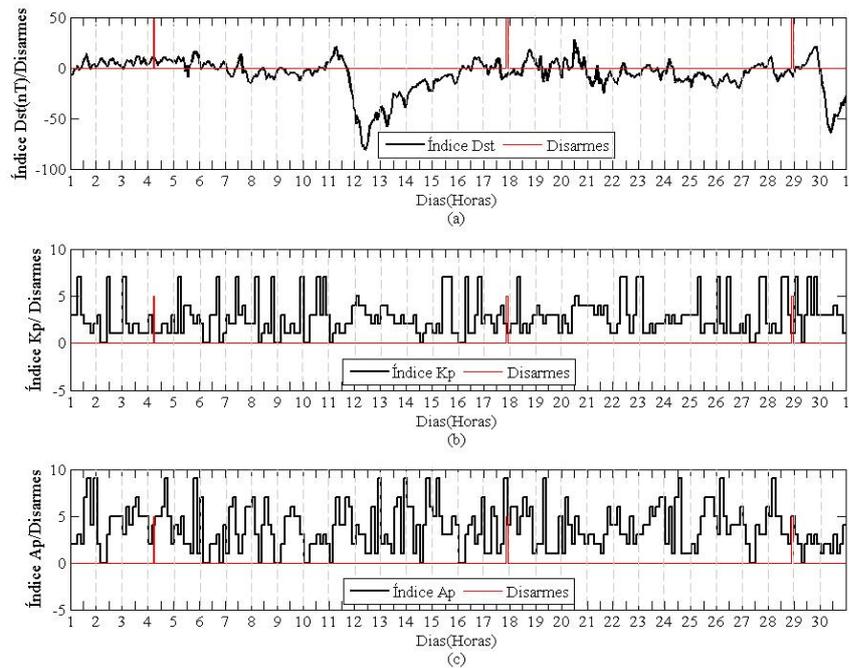


Figura 99 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

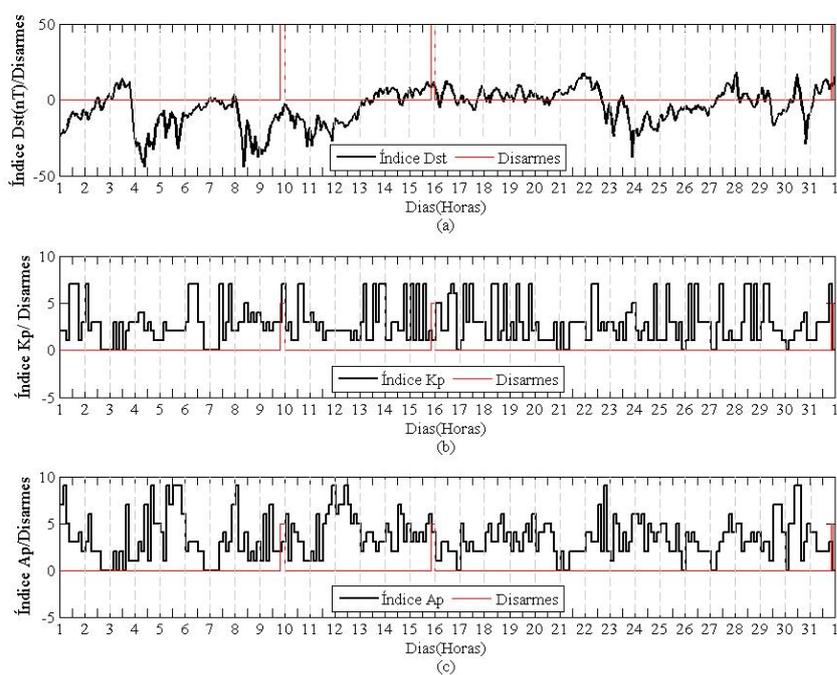


Figura 100 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

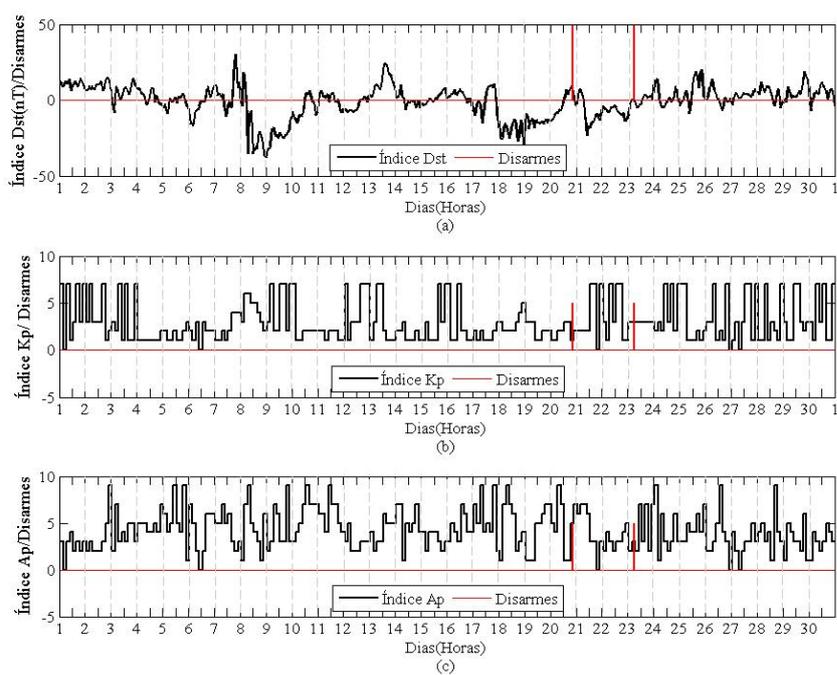


Figura 101 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

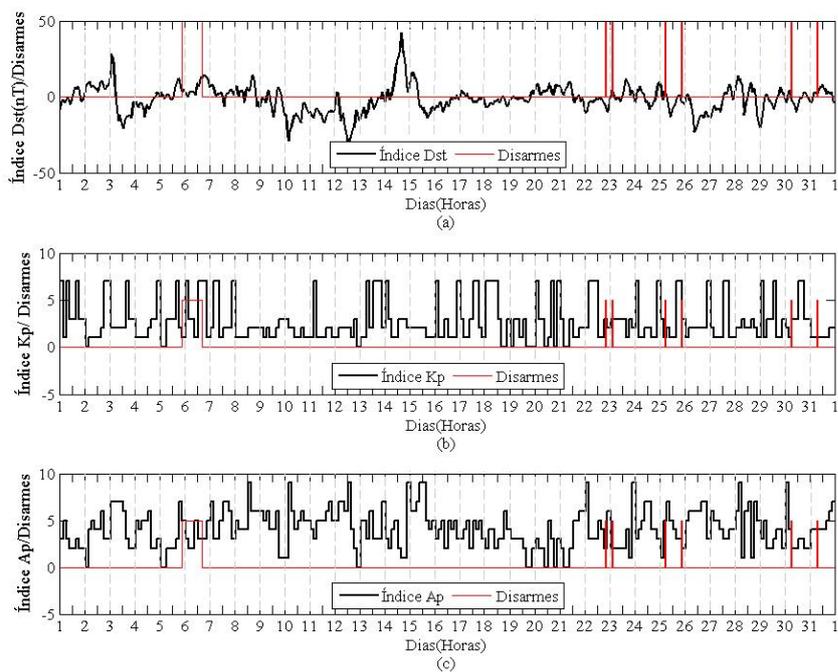


Figura 102 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

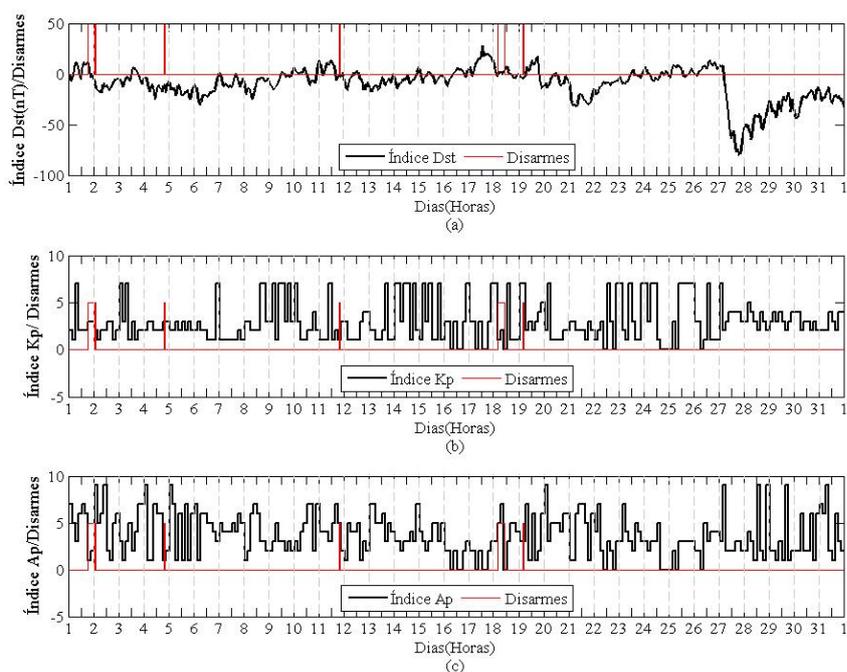


Figura 103 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

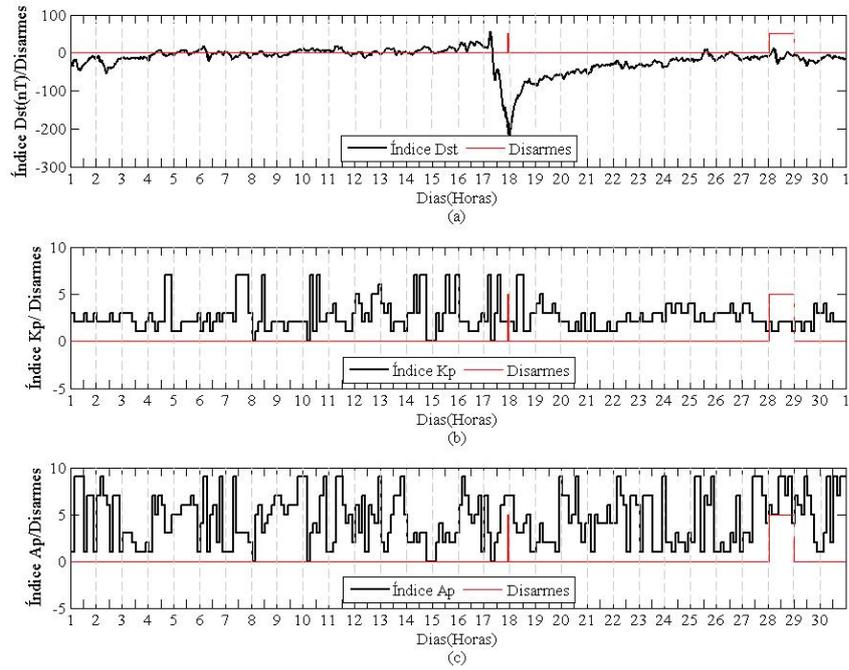


Figura 104 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

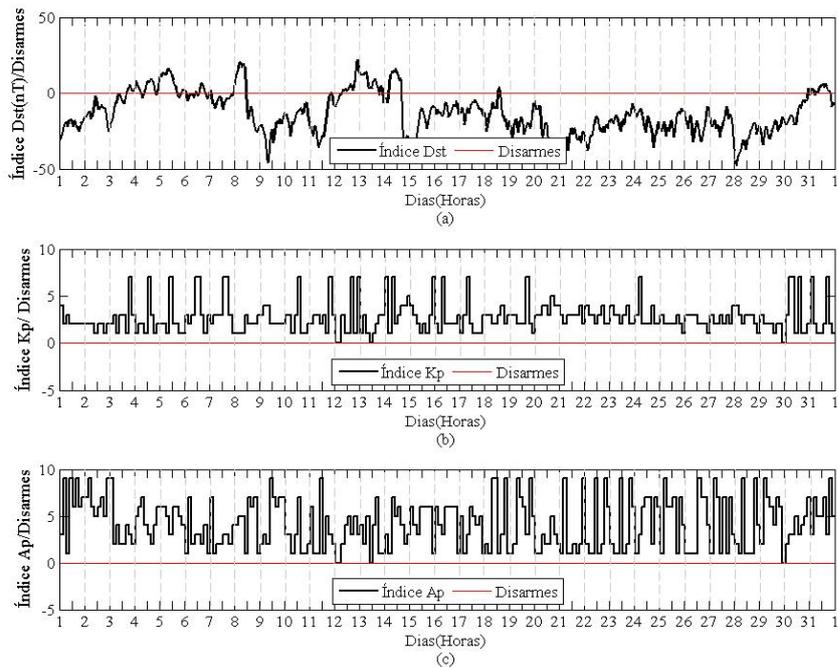


Figura 105 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.

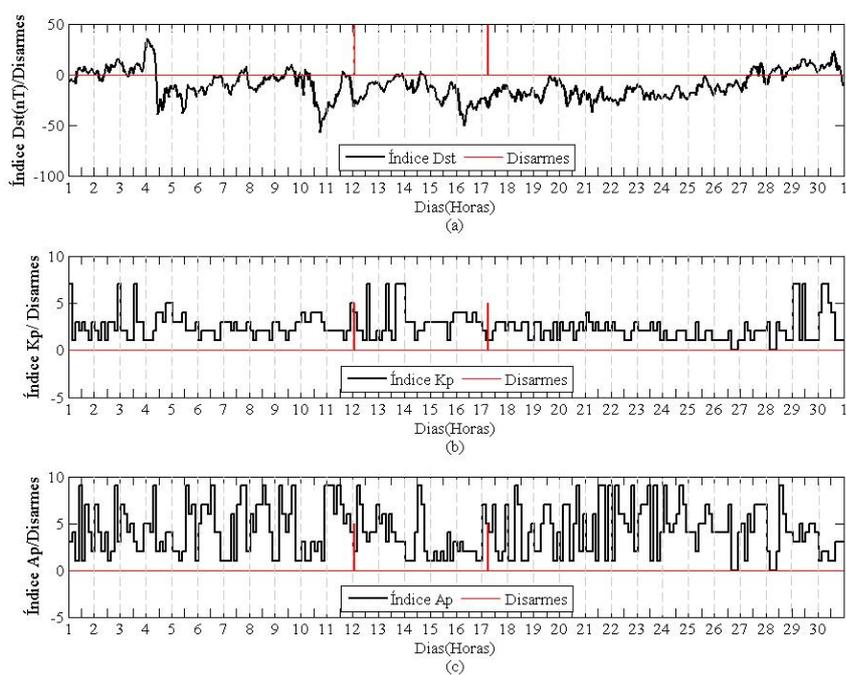
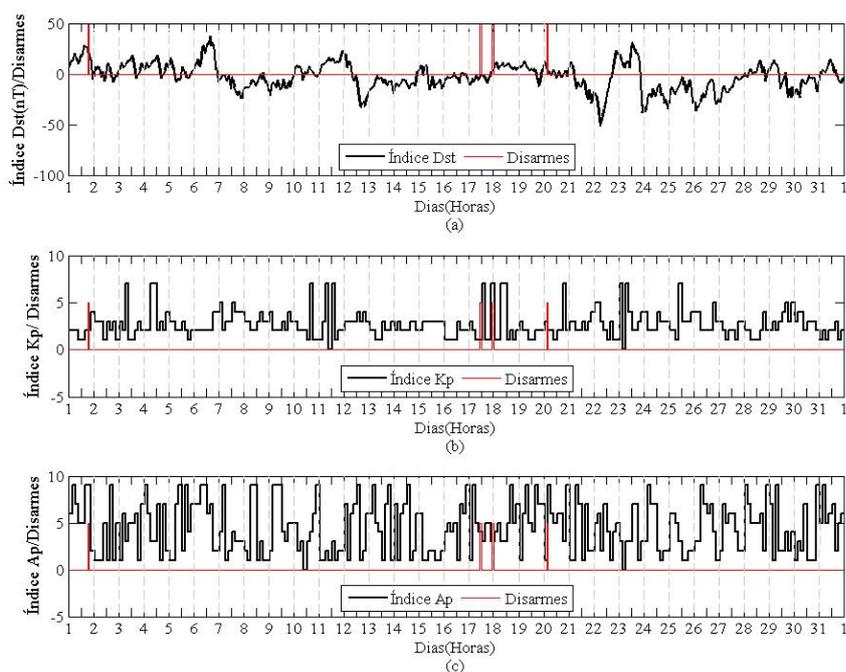


Figura 106 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2014 com o Dst, Kp e Ap.



ANEXO F – Relação dos índices Geomagnéticos e os Desarmes de 2015.

Figura 107 – Relação de desarmes do mês de Janeiro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

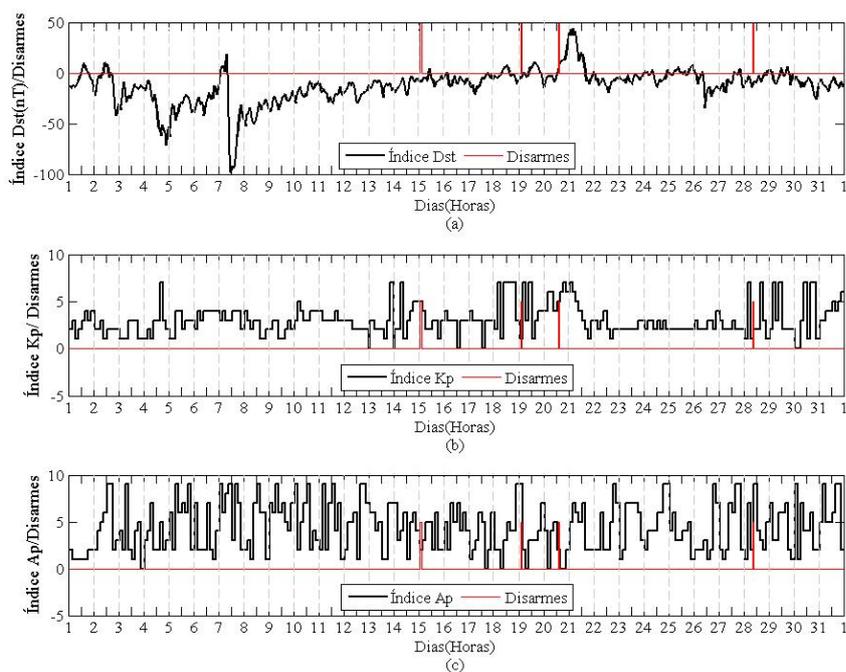


Figura 108 – Relação de desarmes do mês de Fevereiro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

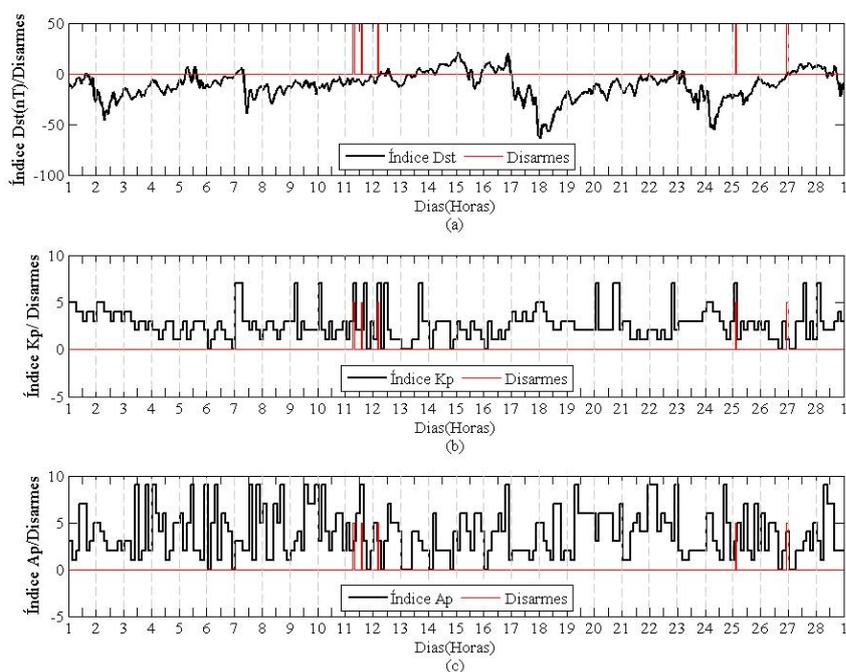


Figura 109 – Relação de desarmes do mês de Março de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

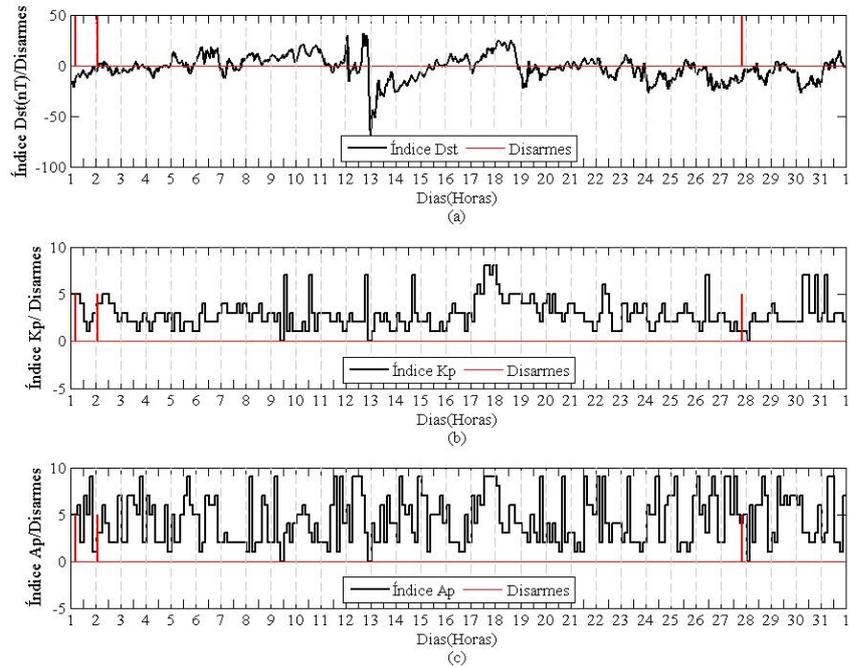


Figura 110 – Relação de desarmes do mês de Abril de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

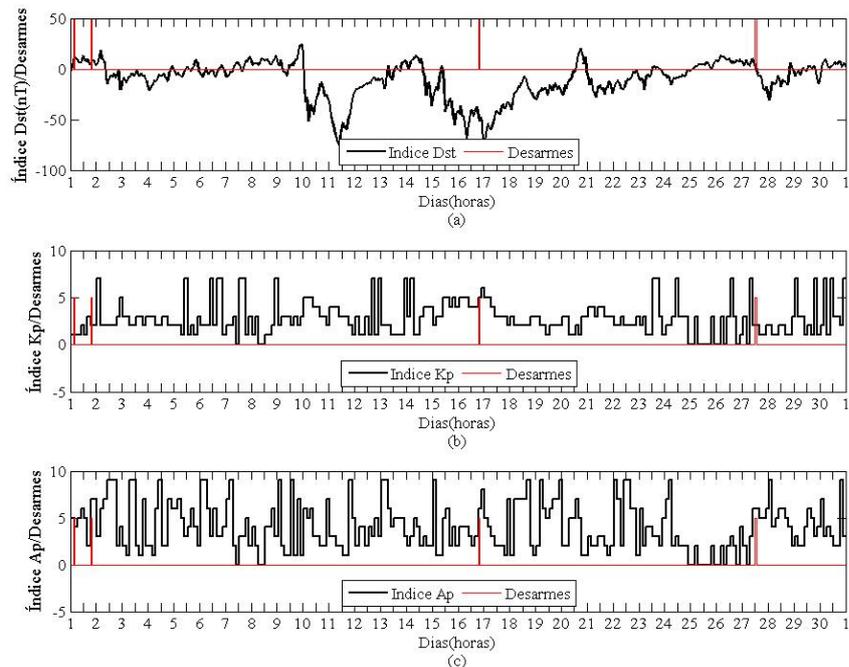


Figura 111 – Relação de desarmes do mês de Maio de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

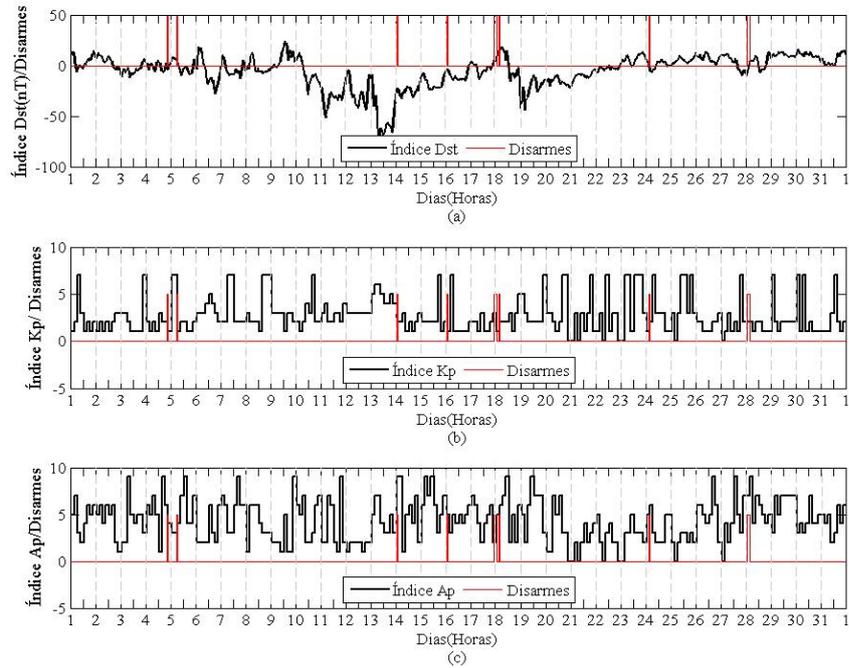


Figura 112 – Relação de desarmes do mês de Junho de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

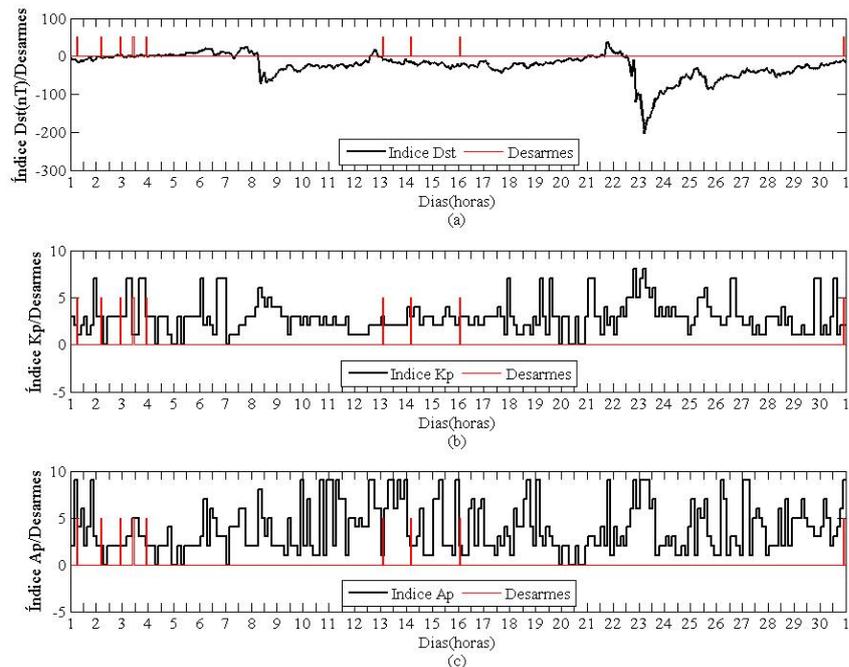


Figura 113 – Relação de desarmes do mês de Julho de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

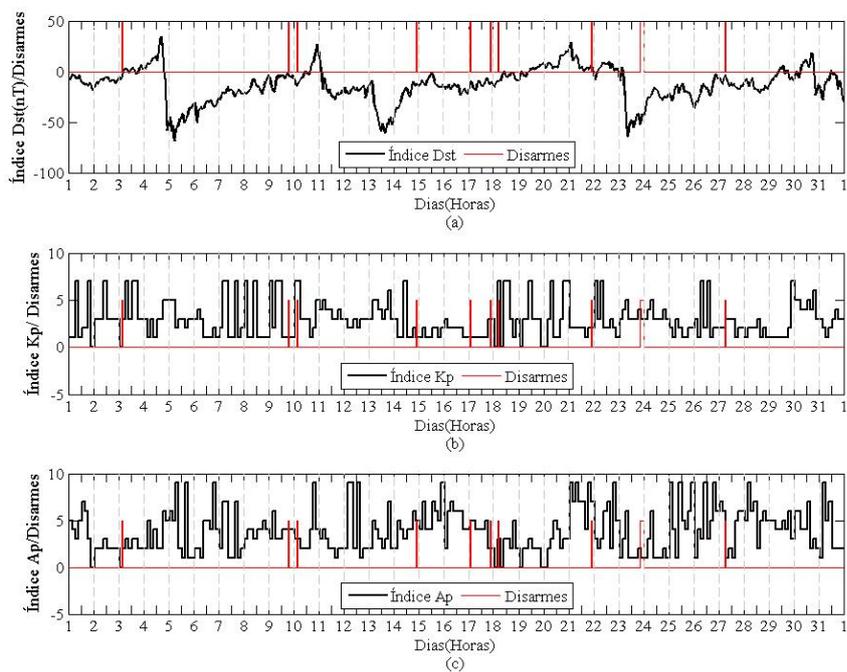


Figura 114 – Relação de desarmes do mês de Agosto de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

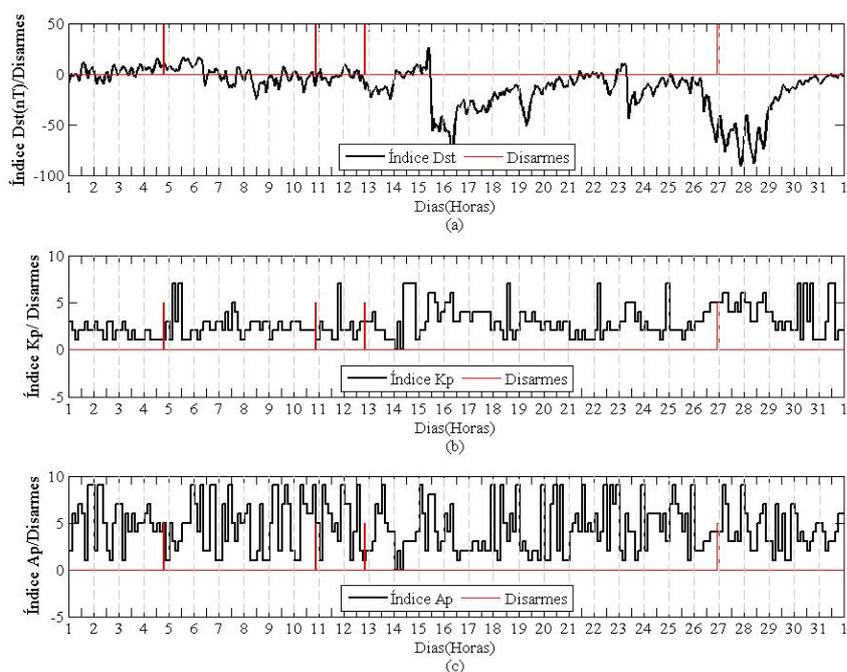


Figura 115 – Relação de desarmes do mês de Setembro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

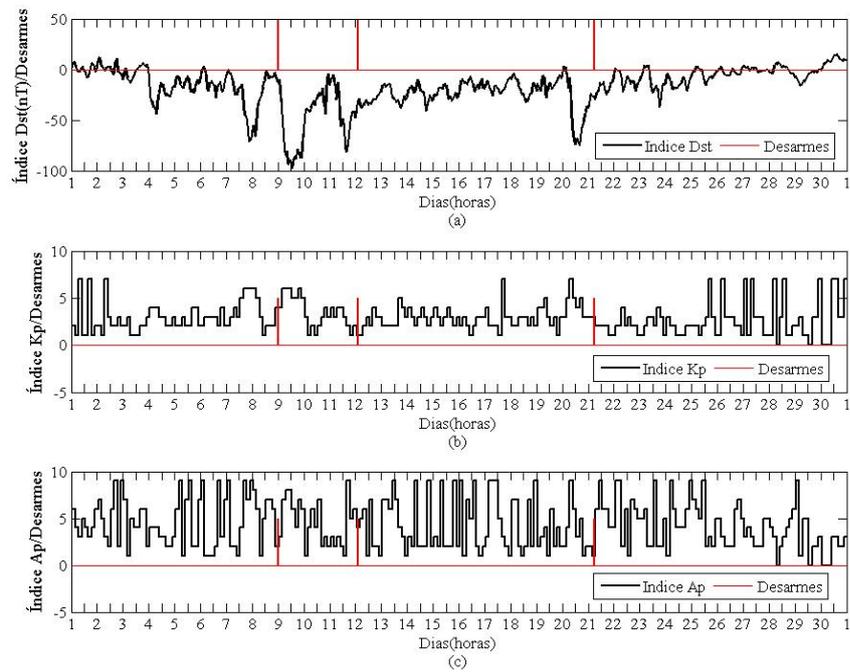


Figura 116 – Relação de desarmes do mês de Outubro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

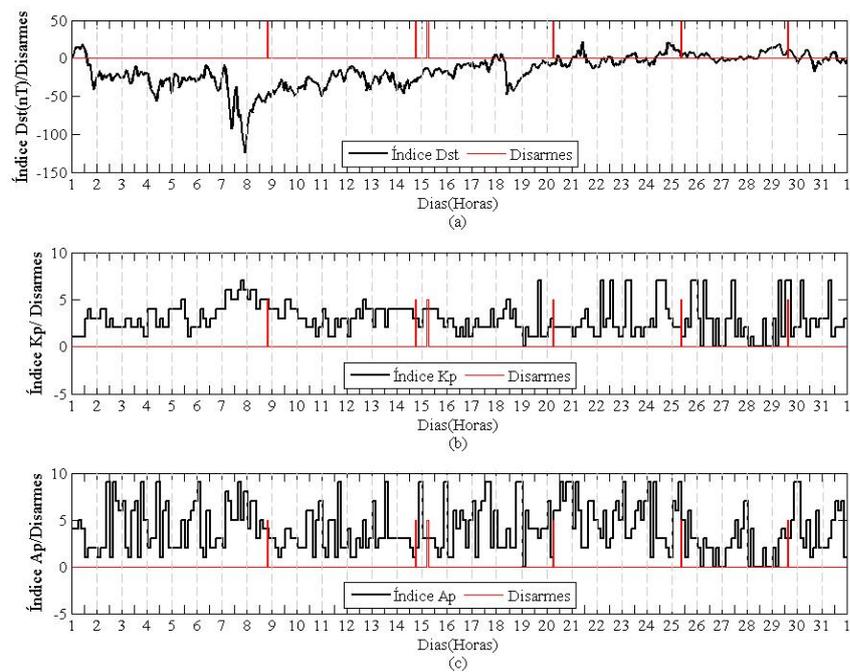


Figura 117 – Relação de desarmes do mês de Novembro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

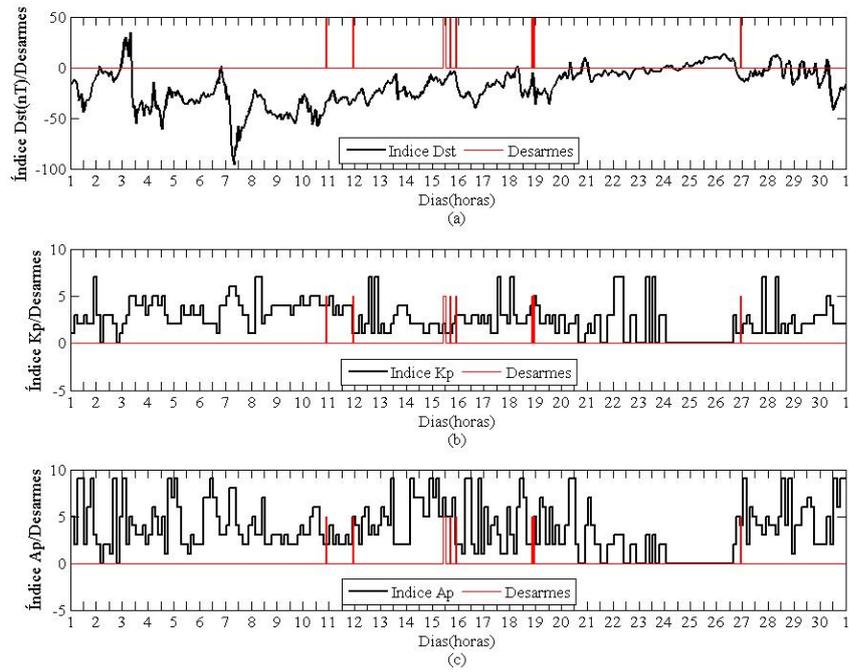


Figura 118 – Relação de desarmes do mês de Dezembro de 2015 com o Dst, Kp e Ap.

