

ANÁLISE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, EM
REGIÕES EQUATORIAIS, DURANTE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA
DE 10-11 DE MAIO DE 2024

Éfren Mota de Souza

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Geofísica do Observatório
Nacional, como parte dos requisitos necessários
à obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador(a): Dr. Luiz Carlos de Carvalho
Benyosef

Co-orientador(a): Dr. Edwin Leonardo
Camacho Linares

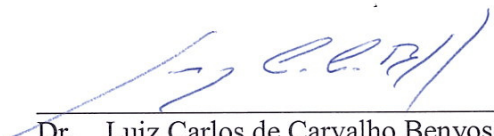
Rio de Janeiro
Outubro de 2025

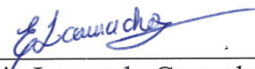
“ANÁLISE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, EM
REGIÕES EQUATORIAIS, DURANTE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE
10-11 DE MAIO DE 2024”

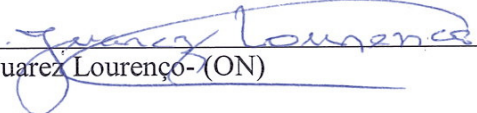
Éfren Mota de Souza

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM GEOFÍSICA.

Aprovada por:


Dr. Luiz Carlos de Carvalho Benyosef- (ON) -
(Orientador)

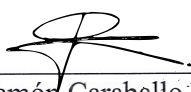

Dr. Edwin Leonardo Camacho Linares- (ON) –
(Coorientador)


Dr. Juarez Lourenço- (ON)

CLEITON DA SILVA
BARBOSA:05919739797

Assinado de forma digital por CLEITON DA SILVA
BARBOSA:05919739797
Dados: 2025.10.17 16:27:07 -03'00'

Dr. Cleiton Barbosa - (INPI)


Dr. Ramón Caraballo - (Universidad da Republica do
Uruguay)

RIO DE JANEIRO – BRASIL

07 DE OUTUBRO DE 2025

Mota de Souza, Éfren

Análise de linhas de transmissão de energia elétrica, em regiões equatoriais, durante a tempestade geomagnética de 10-11 de maio de 2024/Éfren Mota de Souza. – Rio de Janeiro: ON, 2025.

??, 77 p. 29, 7cm.

Orientador(a): Luiz Carlos de Carvalho Benyosef

Co-orientador(a): Edwin Leonardo Camacho Linares

Dissertação (mestrado) – ON/Programa de Pós-graduação em Geofísica, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 69 – 77.

1. Linhas de transmissão de energia.
 2. Correntes Induzidas Geomagneticamente.
 3. Eletrojato Equatorial.
- I. Leonardo Camacho Linares, Edwin. II. Observatório Nacional, Programa de Pós-graduação em Geofísica. III. Título.

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio e à contribuição de muitas pessoas e instituições, a quem registro aqui minha sincera gratidão.

À minha família, pela base sólida, principalmente por parte de minha Mãe, e pelo incentivo constante em todos os momentos desta jornada. O carinho, a compreensão e o apoio incondicional foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço ao Observatório Nacional pelo suporte e pelo ambiente de referência científica proporcionado. O apoio da instituição foi fundamental para o fortalecimento deste trabalho. Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Benyosef, pela confiança, paciência e dedicação durante todo o processo. Sua orientação firme e, ao mesmo tempo, generosa não apenas me conduziu na pesquisa, mas também me inspirou no modo de pensar a ciência. Agradeço também ao meu coorientador, Dr. Edwin Camacho, principalmente pelos ensinamentos na escrita e aplicação de métodos.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional, pelo compartilhamento de conhecimentos, descontrações, pelas discussões enriquecedoras e pelo ambiente de aprendizado que tornou este percurso mais estimulante.

Aos amigos que caminharam ao meu lado durante este mestrado, dividindo dúvidas, conquistas (principalmente nas disciplinas obrigatórias) e momentos de descontração que tornaram o processo mais leve.

À CAPES, pelo apoio financeiro que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização desta pesquisa. Cada gesto de incentivo e colaboração deixou sua marca neste trabalho e na minha formação.

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

ANÁLISE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, EM
REGIÕES EQUATORIAIS, DURANTE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA
DE 10-11 DE MAIO DE 2024

Éfren Mota de Souza

Outubro/2025

As correntes induzidas geomagneticamente (GICs) representam um risco crescente à integridade de sistemas elétricos, especialmente das linhas de transmissão de energia (LTs). Geradas por variações rápidas do campo geomagnético, essas correntes podem penetrar nas redes por meio de pontos neutros aterrados dos transformadores de subestações. Este estudo investiga a relação entre parâmetros elétricos de duas LTs no norte do Brasil, próximas ao equador magnético, e parâmetros magnéticos de observatórios próximos durante a severa tempestade geomagnética de 10–11 de maio de 2024. Adicionalmente, uma análise comparativa, restrita apenas ao procedimento estatístico, foi procedida durante um período geomagneticamente moderado, no dia 24 de março de 2024. Foram analisados dados de corrente e voltagem das LTs, e registros (componente H) magnéticos dos observatórios de Tatuoca (TTB), Kourou (KOU) e São Luís (SLZ), com ênfase na influência do Eletrojato Equatorial (EEJ). A derivada temporal da componente horizontal ($d\mathbf{H}/dt$) foi usada como indicador da intensidade das perturbações geomagnéticas para indução de GICs, e a correlação de Pearson quantificou as relações entre variáveis elétricas e magnéticas.

Os resultados revelaram picos de $d\mathbf{H}/dt$ superiores a 60 nT/min em TTB e SLZ, especialmente no início súbito da tempestade (17:05 UTC), associado à chegada de uma Ejeção de Massa Coronal (Coronal Mass Ejection, CME). KOU, por ser o observatório mais afastado do EEJ, exibiu o menor pico entre todos. Observou-se um aumento de $d\mathbf{H}/dt$ com a proximidade ao equador magnético, evidenciando o papel do EEJ. Um valor liminar para riscos de indução de GICs, de 30 nT/min, foi ultrapassado em mais de uma oportunidade em todos os observatórios magnéticos ao longo do período analisado. As correlações foram fortes a muito fortes ($r > |0.80|$)

durante as fases inicial e principal, e mais fracas e moderadas na fase de recuperação ($|0.39| \leq r \leq |0.55|$), indicando padrões de acordo com a fase da tempestade. A comparação com o período moderado (24 de março de 2024) indicou padrões semelhantes de r entre corrente e componente H ao da fase inicial e principal da tempestade de 10-11 de maio ($r < -0.91$), mas correlações fracas entre componente H e voltagem, assim como uma inversão na sua direção ($-0.10 \leq r \leq -0.16$). Os resultados, ainda que preliminares, ressaltam a importância dos fatores regionais na avaliação dos riscos de GICs e demonstram o potencial da integração entre dados elétricos brutos de LTs e observações geomagnéticas para estratégias preventivas em sistemas de energia.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

ANALYSIS OF ELECTRICAL POWER TRANSMISSION LINES IN
EQUATORIAL REGIONS DURING THE GEOMAGNETIC STORM OF 10-11
MAY 2024

Éfren Mota de Souza

October/2025

Geomagnetically induced currents (GICs) represent an increasing risk to the integrity of electrical power systems, particularly high-voltage transmission lines (TLs). Generated by rapid variations in the geomagnetic field, these currents can penetrate electrical networks through grounded neutral points of substation transformers. This study investigates the relationship between electrical parameters from two TLs in northern Brazil, near the magnetic equator, and magnetic parameters from nearby observatories during the severe geomagnetic storm of 10–11 May 2024. In addition, a comparative analysis, restricted to the statistical procedure, was conducted for a geomagnetically moderate period on 24 March 2024. The analysis included current and voltage data from the TLs and magnetic records (H -component) from the Tatuoca (TTB), Kourou (KOU), and São Luís (SLZ) observatories, with emphasis on the influence of the Equatorial Electrojet (EEJ). The temporal derivative of the horizontal component ($d\mathbf{H}/dt$) was used as an indicator of the intensity of geomagnetic disturbances capable of inducing GICs, while Pearson's correlation coefficient quantified the relationships between electrical and magnetic variables.

The results revealed $d\mathbf{H}/dt$ peaks exceeding 60 nT/min at TTB and SLZ, particularly at the sudden commencement of the storm (17:05 UTC), associated with the arrival of a Coronal Mass Ejection (CME). KOU, being the observatory farthest from the EEJ influence, displayed the lowest peak among all. An increase in $d\mathbf{H}/dt$ with proximity to the magnetic equator was observed, highlighting the role of the EEJ. A threshold value of 30 nT/min (associated with the risk of inducing GICs) was exceeded multiple times at all magnetic observatories during the analyzed period. Correlations were strong to very strong ($r > |0.80|$) during the initial and main phases of the storm, and weaker to moderate during the recovery phase ($|0.39| \leq r \leq$

$|0.55|$), revealing phase-dependent patterns. Comparison with the moderate period (24 March 2024) indicated similar r patterns between current and H -component to those observed during the initial and main storm phases ($r < -0.91$), but weak and inversed correlations between H -component and voltage ($-0.10 \leq r \leq -0.16$). Although preliminary, these results emphasize the importance of regional factors in GIC risk assessment and demonstrate the potential of integrating raw electrical TLs data with geomagnetic observations for preventive strategies in power systems.

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos geral e específicos	4
3	Teoria	5
3.1	O campo magnético da terra	5
3.1.1	Composição	5
3.1.2	Componentes do campo geomagnético	8
3.1.3	Variação do campo geomagnético	10
3.2	Equações de Maxwell	11
3.2.1	Lei de Gauss para o Campo Elétrico	11
3.2.2	Lei de Gauss para o Campo Magnético	12
3.2.3	Lei da Indução de Faraday	12
3.2.4	Lei de Ampère-Maxwell	12
3.2.5	Resumo das Equações de Maxwell no Vácuo:	13
3.3	Ambiente próximo à terra	13
3.3.1	Transientes Interplanetários	15
3.3.2	Sistemas de correntes elétricas	17
3.4	Clima Espacial e seus efeitos	19
3.4.1	Períodos geomagneticamente perturbados	20
3.4.2	Correntes induzidas geomagneticamente	23
3.5	Eletrojato Equatorial	25
3.6	Linhas de transmissão de energia	27
4	Dados	29
4.1	Contextos geomagnéticos	29
4.1.1	Dia Perturbado	29
4.1.2	Dia sem tempestade	30
4.2	Dados Elétricos	31
4.3	Dados magnéticos	32
4.4	Processamento dos dados	34

5	Metodologia	36
5.1	Derivada temporal da componente H	37
5.2	Correlação de Pearson	38
5.2.1	Períodos analisados na correlação de Pearson	39
6	Resultados	45
6.1	Derivada temporal $d\mathbf{H}/dt$	45
6.2	Correlações	46
6.2.1	Primeiro período de análise	47
6.2.2	Segundo período de análise	50
6.2.3	Comparação com período geomagneticamente moderado	54
7	Discussões	58
7.1	Implicações dos Picos de $d\mathbf{H}/dt$	59
7.2	Correspondência entre variáveis magnéticas e elétricas	61
7.2.1	Coefficiente r sob condições geomagnéticas moderada	63
8	Conclusões e Perspectivas	66
	Referências Bibliográficas	69

Lista de Figuras

3.1	Representação das diferentes fontes do campo geomagnético. (KONO, 2010).	6
3.2	Espectro de densidade de energia do campo geomagnético em função do grau harmônico n , obtido a partir de dados do satélite <i>MAGSAT</i> (altitude média de 420 km). As regiões indicam as contribuições do campo do núcleo, do campo crustal e o limite de ruído do sensor. Extraído de CAMPBELL (2003) e suas referências.	8
3.3	Sistema de coordenadas geomagnéticas. (CAMPBELL, 2003).	10
3.4	Exemplo de tempestade geomagnética. (COLLADO-VILLAYERDE et al., 2024).	11
3.5	Magnetosfera terrestre e sua distribuição de plasma. (KANE, 1976).	14
3.6	Configuração da magnetosfera sob pressão do vento solar. (PARKS, 2015).	15
3.7	Representação de uma CME a partir de sua origem até seu choque com a magnetosfera terrestre. (USGS scienc for a changing world). ¹	17
3.8	Sistema de Correntes Magnetosfera-ionsfera. (PITKÄNEN, 2011).	18
3.9	Variação diária do sistema de correntes Sq. (HONORÉ et al., 2017).	19
3.10	Região ativa a qual originou as CMEs que atingiram o campo geomagnético às 1:27 UTC do dia 13 de março de 1989. (BOTELER, 2019).	20
3.11	Ilustração da configuração do processo de reconexão magnética. (SCHE-RER et al., 2005)	21
3.12	Fases de uma tempestade geomagnética. (KASRAN et al., 2018a).	22
3.13	Mecanismo e efeito das GICs em um sistema de energia. (LUNDS-TEDT, 2006).	24
3.14	Eletrojato Equatorial durante o ano de 2024. (Imagem gerada pelo autor)	26
3.15	Malha brasileira de linhas de transmissão de energia elétrica. Desta-que (elipse púrpura) para as utilizadas neste trabalho. (ONS, 2025).	27

4.1	Visualização de painéis que caracterizaram a atividade geomagnética durante a tempestade de 10-11 de maio de 2024, apresentando: (acima) progressão do índice Kp, (abaixo) variação do índice Dst. (Imagem gerada pelo autor).	30
4.2	Visualização de painéis que caracterizaram a atividade geomagnética durante o dia 24 de março de 2024, apresentando: (acima) progressão do índice Kp, (abaixo) variação do índice Dst. As linhas tracejadas verticais em vermelho delimitam o período analisado. (Imagem gerada pelo autor).	31
4.3	Região de estudo compreendendo o setor norte do Brasil. Destaques para as linhas de transmissão, em verde; os observatórios magnéticos de Tatuoca (TTB), Kourou (KOU) e São Luís (SLZ); e o EEJ durante o ano de 2024, em vermelho. (Imagem gerada pelo autor).	33
5.1	Séries temporais da componente horizontal da tempestade geomagnética de 10 a 11 de maio de 2024 para os observatórios magnéticos de TTB, KOU e SLZ. As áreas destacadas correspondem ao primeiro e ao segundo períodos, respectivamente, de análise na etapa de correlação entre os dados magnéticos e elétricos. (Imagem gerada pelo autor).	40
5.2	Séries temporais dos valores de corrente e voltagem, durante os dias 10 e 11 de maio de 2024, das linhas de transmissão de energia TMAT-01 e TMAT-02. As áreas destacadas correspondem ao mesmo período assinalado na Figura 5.1. (Imagem gerada pelo autor).	41
5.3	Intervalo de atividade geomagnética moderada, definido para fins de comparação com o período de tempestade. (Imagem gerada pelo autor).	42
5.4	Intervalo seccionado dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, adotado para fins comparativos com o período de tempestade. (Imagem gerada pelo autor).	43
5.5	Fluxograma metodológico: do acesso às séries (H , corrente/voltagem) e pré-processamento à construção de variáveis; bifurcação em análise estatística e interpretação física, convergindo para conclusões e perspectivas. (Fluxograma gerado pelo autor).	44
6.1	Derivada temporal da componente H do campo geomagnético registrada em cada observatório ao longo dos dias 10 e 11 de maio de 2024. As áreas em destaque referem-se aos mesmos intervalos analisados nas Figuras 5.1 e 5.2. (Imagem gerada pelo autor).	46

- 6.2 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (TTB) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (TTB) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 48
- 6.3 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (KOU) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (KOU) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 49
- 6.4 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (SLZ) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (SLZ) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 50
- 6.5 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (TTB) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (TTB) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 52
- 6.6 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (KOU) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (KOU) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 53
- 6.7 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (SLZ) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (SLZ) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 54
- 6.8 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (TTB) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (TTB) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 55
- 6.9 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (KOU) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (KOU) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 56
- 6.10 Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (SLZ) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (SLZ) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor). 57

Lista de Tabelas

- 3.1 Equações de Maxwell no vácuo em forma diferencial. Adaptado de GRIFFITHS (2023). 13
- 4.1 Informações detalhadas sobre as linhas de transmissão de energia. (Tabela gerada pelo autor). 32
- 4.2 Informações detalhadas sobre os observatórios magnéticos. (Tabela gerada pelo autor). 34
- 7.1 Correlação de Pearson entre grandezas elétricas e a componente H magnética para diferentes observatórios e linhas de transmissão. (Tabela gerada pelo autor). 64

Capítulo 1

Introdução

As redes de transmissão de energia representam um sistema fundamental para o bem-estar e o funcionamento contínuo dos sistemas tecnológicos presentes no cotidiano. No contexto atual da sociedade moderna, a dependência e a confiabilidade desses sistemas têm se tornado, cada vez mais, um fator de vulnerabilidade. A rede elétrica exemplifica uma categoria crescente de sistemas acoplados humano-naturais, caracterizados por processos complexos e interdependentes, essenciais para operações fundamentais. A integração de uma conectividade digital generalizada —incluindo redes de computadores/comunicação e infraestrutura de computação em nuvem —tornou essas interações sistêmicas cada vez mais dinâmicas, capazes de responder e refletir as flutuações ambientais e atividades antropogênicas (CHE-CASTALDO et al., 2021).

Devido às condições intensas no espaço interplanetário provocadas, por exemplo, por Ejeções de Massa Coronal (do inglês, Coronal Mass Ejection, CMEs) e correntes de vento solar de alta velocidade (do inglês, High-Speed Solar Wind Streams, HSSWs), eventos como o colapso do sistema Hydro-Québec no Canadá em 1989 (BOLDUC, 2002; BOTELER 2019) e a tempestade de Halloween na África em outubro de 2003 (THOMSON et al., 2010) demonstram que a estabilidade e a integridade das redes de transmissão de energia não dependem mais apenas de aspectos técnicos, mas também das condições do Clima Espacial.

Durante períodos de perturbação do campo geomagnético (do inglês, Geomagnetic Disturbances, GMDs), o impacto das CMEs na magnetosfera terrestre perturba a alta atmosfera (região onde se originam diversos sistemas de correntes elétricas), provocando variações no campo geomagnético na superfície da Terra. Consequentemente, conforme a lei de indução de Faraday, campos geoeletricos são induzidos no solo, os quais, por sua vez, podem conduzir correntes elétricas por sistemas tecnológicos terrestres em solo, como as redes de transmissão de energia (BOTELER 1994; KASRAN et al. 2018a; PIRJOLA 2000a). Esse fenômeno, conhecido como Correntes Induzidas Geomagneticamente (do inglês, Geomagnetically Induced

Currents, GICs), pode comprometer o funcionamento de transformadores de redes elétricas de alta voltagem por meio de superaquecimento e geração de harmônicos, potencialmente levando a falhas (CHE-CASTALDO et al. 2021; GAUNT e COET-ZEE 2007).

A ocorrência de grandes magnitudes de GICs está tipicamente associada a correntes intensas do Eletrojato Auroral, em regiões de altas latitudes geomagnéticas (WATARI, 2015). Pesquisas sobre GICs voltadas às regiões de baixas e médias latitudes vêm ganhando destaque nas últimas décadas, especialmente na América do Sul (por exemplo, BARBOSA et al. 2014; CARABALLO et al. 2013; ESPINOSA et al. 2023; TRIVEDI et al. 2007). Apesar desse crescimento, ainda assim, há uma carência de estudos que levem em consideração (ou destaquem) a possível influência de outro sistema de correntes, o Eletrojato Equatorial (do inglês, Equatorial Electrojet, EEJ), em eventos de GICs, particularmente em áreas próximas ao equador magnético. Ainda pouco explorado na literatura, esse aspecto é investigado neste trabalho.

Estudos de destaque, como os de CARTER et al. (2015), OLIVEIRA et al. (2018) e SILVA et al. (2024), reforçam as evidências existentes e estimulam novas investigações sobre o tema. Considerando que, em regiões equatoriais, a atuação do EEJ pode alterar significativamente o sinal eletromagnético observado, torna-se relevante ampliar o número de investigações voltadas à compreensão desses fenômenos e de seus impactos sobre sistemas tecnológicos sensíveis, como as redes de transmissão de energia em regiões próximas ao dip equatorial.

A presença do EEJ nas imediações do equador magnético introduz uma dinâmica particular, capaz de influenciar de maneira expressiva as variações magnéticas locais, seja durante períodos de tempestade ou calmos e, conseqüentemente, a geração de GICs (hipótese já levantada em trabalhos anteriores, como o de CARTER et al. 2015). Assim, este estudo surge da necessidade de aprofundar a investigação das GICs em linhas de transmissão localizadas em regiões equatoriais, considerando que a maior parte das pesquisas existentes ainda se concentra em latitudes baixas.

Nesse contexto, justifica-se a realização de uma pesquisa que explore a possível associação entre o EEJ e a indução de GICs em linhas de transmissão de energia elétrica. Além disso, este estudo apresenta um diferencial relevante em relação à literatura: a utilização de dados elétricos brutos provenientes de linhas de transmissão localizadas em regiões equatoriais. Trata-se de uma abordagem inédita que permite explorar, de forma direta, possíveis relações entre variações geomagnéticas e parâmetros elétricos em áreas próximas ao equador magnético, um aspecto ainda não abordado pela literatura especializada na ocorrência de GICs.

O principal evento abordado neste estudo (tempestade geomagnética de 10–11 de maio de 2024) foi analisado por meio de duas ferramentas matemáticas: a pri-

meira consistiu no cálculo da derivada temporal da componente horizontal do campo geomagnético, $d\mathbf{H}/dt$, em cada observatório magnético, com o objetivo de avaliar as condições magnéticas nas regiões próximas às linhas de transmissão estudadas. Esse parâmetro, amplamente utilizado na literatura como um indicador de indução de GICs, permite estimar a intensidade e a taxa de variação das flutuações geomagnéticas locais. Os observatórios considerados foram: Tatuoca (TTB), Kourou (KOU) e São Luís (SLZ), todos localizados próximos ao Equador Magnético e às linhas de transmissão analisadas. A segunda ferramenta empregada foi a Correlação de Pearson, aplicada às séries temporais dos parâmetros magnéticos (componente H) e elétricos (corrente e voltagem). As análises foram divididas em dois períodos correspondentes às fases da tempestade ocorrida entre os dias 10 e 11 de maio de 2024. A Correlação de Pearson também foi empregada para um período geomagneticamente moderado (sem tempestade; 24 de março de 2024), a fim de investigar, comparativamente, os valores do coeficiente de correlação de Pearson (r) em diferentes contextos geomagnéticos.

De forma geral, este trabalho busca contribuir para uma abordagem pouco estudada na literatura envolvendo linhas de transmissão de energia; neste caso, em latitudes equatoriais e com voltagem (230 kV) menor em relação a trabalhos anteriores. A utilização de dados brutos das linhas de transmissão pode significar uma nova forma de abordar a ligação de GICs com infraestruturas elétricas, como as linhas de transmissão. Da mesma forma, a caracterização do comportamento da $d\mathbf{H}/dt$ para dados de observatórios magnéticos em baixa e equatorial latitude pode fornecer um vislumbre da interferência do EEJ e como este pode desempenhar um papel importante na amplificação do campo geomagnético regional e, conseqüentemente, na geração de GICs em tais regiões.

A estrutura deste trabalho está dissolvida em 8 capítulos. Após a introdução, o capítulo 2 define os objetivos deste trabalho. O capítulo 3 apresenta a teoria sobre os diversos temas abordados neste trabalho. O capítulo 4 discorre sobre o processamento e o conjunto de dados utilizados nesta pesquisa. No capítulo 5, é apresentada a metodologia empregada para obter a derivada temporal da componente H em cada observatório magnético, bem como o procedimento de correlação de Pearson entre as variáveis analisadas. O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos, incluindo os valores de $d\mathbf{H}/dt$ registrados em cada observatório magnético, juntamente com os coeficientes de correlação de Pearson calculados entre as variáveis. Além disso, neste capítulo, é apresentada a análise da correlação de Pearson para o período de comparação, correspondente às condições sem ocorrência de tempestade geomagnética (período moderado). O capítulo 7 traz a discussão, subdividida em duas subseções, cada uma tratando dos resultados apresentados na seção anterior. Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões e perspectivas inerentes a esta dissertação.

Capítulo 2

Objetivos geral e específicos

Objetivo Geral

- Este estudo tem como objetivo investigar, considerando os pressupostos apontados pelos valores de $d\mathbf{H}/dt$ (derivada da componente H do campo geomagnético) e pela literatura especializada, possíveis relações entre parâmetros elétricos (corrente e voltagem de duas linhas de transmissão de energia) e um parâmetro magnético (a componente H) na região de influência do EEJ, durante a severa tempestade geomagnética de 10 a 11 de maio de 2024.

Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, esta dissertação envolveu o desenvolvimento das seguintes etapas:

- (i) Analisar as séries temporais dos dados elétricos e magnéticos.
- (ii) Seccionar o período de análise das séries temporais com base nos distintos comportamentos observados da componente horizontal (H) da tempestade abordada.
- (iii) Calcular a derivada da componente horizontal H do campo geomagnético.
- (iv) Verificar se os picos da derivada da componente H atingem os valores mínimos indicados pela literatura para a indução de GICs.
- (v) Correlacionar os valores da componente H do campo geomagnético com os dados das linhas de transmissão de energia (corrente e voltagem).
- (vi) Realizar uma análise comparativa entre os resultados das correlações obtidas para o período em questão (10–11 de maio de 2024) e aqueles correspondentes a um intervalo de ocorrência de uma tempestade geomagnética moderada ocorrida no dia 24 de março de 2024.

Capítulo 3

Teoria

3.1 O campo magnético da terra

3.1.1 Composição

O campo magnético da Terra é geralmente definido como o campo magnético produzido por todas as fontes dentro e fora da Terra sólida até a chamada “magnetopausa”, um limite dentro do qual o campo magnético da Terra permanece confinado (KONO, 2010). Essas fontes se diferem em natureza e localização e podem ser classificadas em três constituintes: a componente interna (principal), originada pelo processo de geodínamo no núcleo externo terrestre, e apresenta variações em intensidade e espaço; o campo crustal é gerado por minérios magnéticos acumulados na crosta em baixas profundidades; e a componente externa, produzida por correntes magnetosféricas e ionosféricas (figura 3.1).

O dínamo terrestre é atribuído ao movimento do fluido no núcleo externo da Terra. A componente interna representa cerca de 98% do campo magnético terrestre (CAMPBELL, 2003). Longe da superfície, esse campo comporta-se como um dipolo magnético; porém, próximo à superfície terrestre, a contribuição multipolar torna-se mais significativa. Na superfície, existem áreas de intensificação ou enfraquecimento do campo, conhecidas como anomalias magnéticas. Algumas dessas anomalias são causadas por minérios magnetizados presentes na crosta, enquanto outras estão relacionadas à própria estrutura do campo interno.

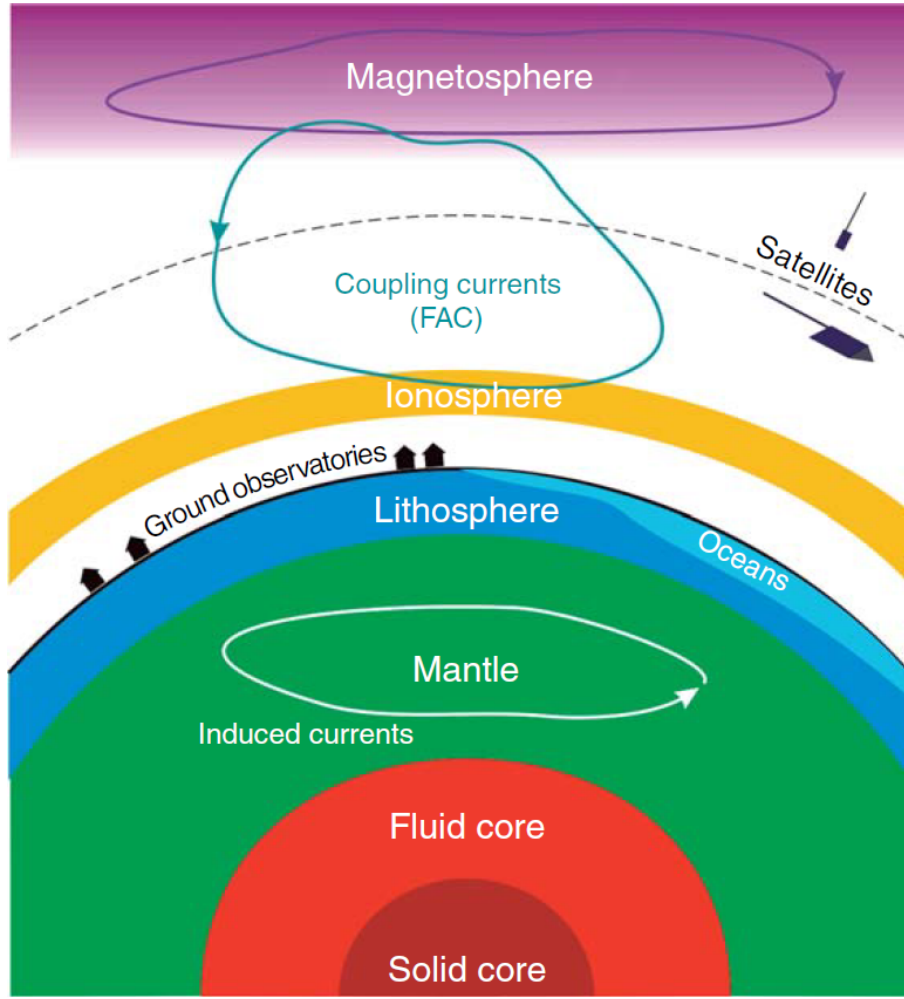


Figura 3.1: Representação das diferentes fontes do campo geomagnético. (KONO, 2010).

Para um campo magnético $\mathbf{B}$ conservativo, existe um potencial Ψ que satisfaz a equação $\mathbf{B} = -\nabla\Psi$. Negligenciando as correntes na interface solo-atmosfera (presumimos que o campo magnético é produzido inteiramente por fontes dentro da Terra), o campo magnético da Terra pode ser representado por:

A solução geral de Ψ em coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) pode ser expressa por uma expansão harmônica esférica:

$$\Psi(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[\left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) + \left(\frac{r}{a} \right)^n (q_n^m \cos m\phi + s_n^m \sin m\phi) \right] P_n^m(\cos \theta), \quad (3.1)$$

em que:

- Ψ é o potencial escalar do campo geomagnético.
- a é o raio médio da Terra.

- r é a distância radial ao ponto de observação.
- θ é a colatitude.
- ϕ é a longitude geográfica.
- n é o grau e m a ordem do harmônico esférico.
- $P_n^m(\cos \theta)$ são as funções associadas de Legendre;
- g_n^m e h_n^m são os coeficientes de Gauss do *campo interno*;
- q_n^m e s_n^m são os coeficientes de Gauss do *campo externo*.

Os termos proporcionais a $(a/r)^{n+1}$ decrescem com a distância e descrevem o campo interno, enquanto aqueles proporcionais a $(r/a)^n$ aumentam com a distância e representam o campo externo. Assim, o potencial do campo magnético externo pode ser escrito como:

$$\Psi_{\text{ext}}(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{r}{a}\right)^n [q_n^m \cos(m\phi) + s_n^m \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta).$$

As variações rápidas do campo geomagnético, tais como os impulsos súbitos (SI), estão associadas a mudanças temporais nos coeficientes q_n^m e s_n^m , que refletem as respostas das correntes magnetosféricas e ionosféricas às variações abruptas do vento solar e do campo interplanetário.

Se o achatamento da Terra puder ser desprezado, os valores na superfície da Terra serão obtidos definindo-se $r = a$ nas expressões acima. A equação (3.1) é uma solução da equação diferencial de Laplace, $\nabla^2 \Psi = 0$, em coordenadas esféricas. Com essa solução é possível fazer as representações aproximadas do campo geomagnético como os obtidos pelo modelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). O IGRF é a descrição matemática convencional do campo magnético principal da Terra e de sua variação secular. É o produto de um esforço colaborativo entre modeladores de campos magnéticos e instituições envolvidas na coleta e divulgação de dados geomagnéticos de satélites, observatórios magnéticos e diferentes pesquisas em todo o mundo. Como o campo da Terra muda, os coeficientes de Gauss dependem do tempo, e o IGRF é atualizado a cada cinco anos (LAUNDAL e RICHMOND, 2017).

A Figura 3.2 apresenta o espectro de energia do campo geomagnético em função do grau harmônico n , obtido a partir de dados do satélite *MAGSAT* a uma altitude média de 420 km. Observa-se que a energia associada ao campo decresce aproximadamente de forma exponencial com o aumento de n , indicando que as componentes de baixa ordem (até $n \approx 13$) são dominadas pelo campo do núcleo, enquanto as

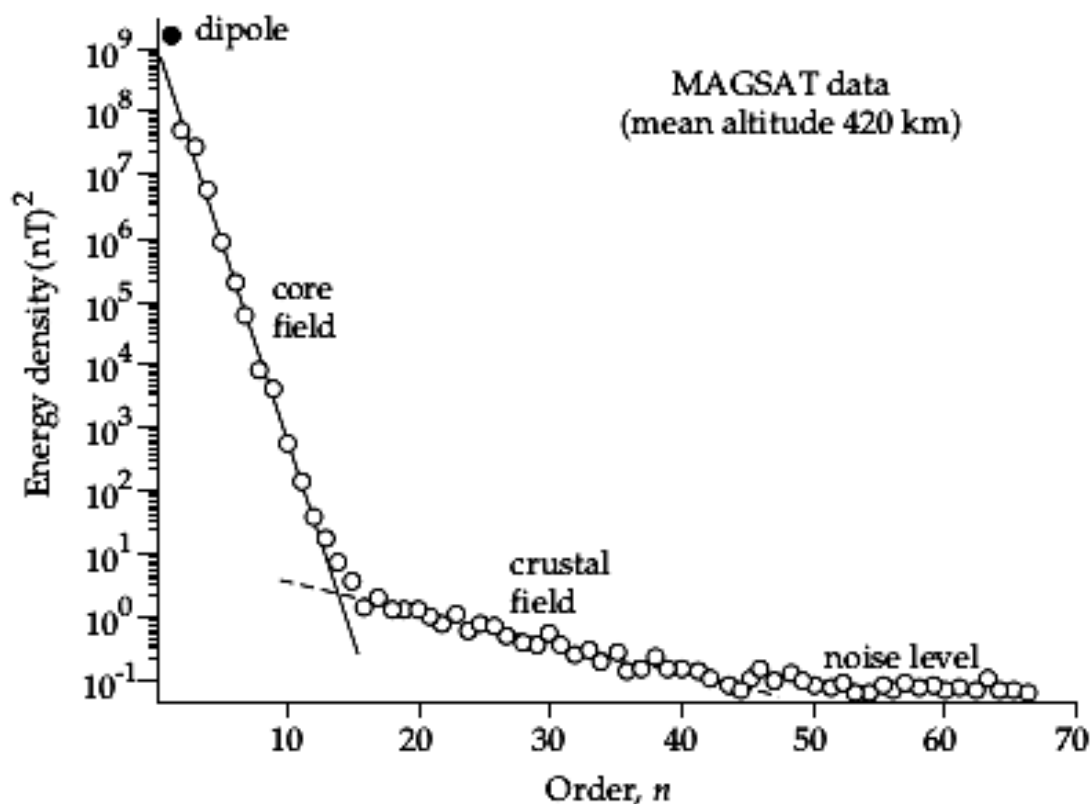


Figura 3.2: Espectro de densidade de energia do campo geomagnético em função do grau harmônico n , obtido a partir de dados do satélite *MAGSAT* (altitude média de 420 km). As regiões indicam as contribuições do campo do núcleo, do campo crustal e o limite de ruído do sensor. Extraído de CAMPBELL (2003) e suas referências.

de alta ordem ($n > 13$) refletem predominantemente o campo crustal. Acima de $n \approx 50$, o sinal torna-se indistinguível do nível de ruído instrumental. A figura é uma representação quantitativa do fato de que o campo da Terra varia em sete ordens de grandeza em energia (de 10^9 até 10^2) quando consideramos todas as suas fontes e escalas espaciais.

O espectro mostra que a maior parte da energia do campo geomagnético está concentrada nos primeiros graus harmônicos, principalmente o termo dipolar ($n = 1$), seguido por componentes quadrupolares e octupolares. Essa estrutura espectral evidencia que o campo do núcleo domina as grandes escalas (baixas ordens), enquanto o campo crustal e as contribuições externas são expressivas apenas em ordens mais elevadas, correspondendo a variações espaciais menores.

3.1.2 Componentes do campo geomagnético

Uma maneira comum de descrever o campo magnético é simplesmente traçar diferentes elementos magnéticos, como a intensidade total ou a inclinação. Os vários elementos usados em tais representações são definidos na Fig. 3.3. As coordenadas

geomagnéticas são amplamente usadas para localizar observatórios magnéticos e no estudo de processos magnetosféricos. O campo magnético terrestre F (conhecido também como Campo Total) é um vetor que pode ser decomposto em três componentes ortogonais (perpendiculares entre si), seguindo um “sistema mão direita” (do inglês, right-hand system, CAMPBELL 2003):

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3.2)$$

$$X = H \cos D \quad , \quad Y = H \sin D.$$

O ângulo que o campo total F faz com o plano horizontal é chamado de inclinação, I (ou dip angle):

$$\frac{Z}{H} = \tan I.$$

- X (Norte Geográfico): Componente horizontal do campo magnético na direção norte geográfica. Positivo quando aponta para o norte.
- Y (Leste Geográfico): Componente horizontal na direção leste geográfico. Positivo quando aponta para o leste.
- Z (Vertical para Baixo): Componente vertical, positivo quando aponta para o centro da Terra.

O campo magnético também pode ser descrito em termos de sistema HDZ (Horizontal, Declinação, Vertical):

- H : Magnitude do campo horizontal ($H = \sqrt{X^2 + Y^2}$).
- D : (Declinação): Ângulo entre o norte geográfico e o norte magnético, medido no sentido horário (positivo para leste):

$$D = \arctan \frac{Y}{X}.$$

- Z : Igual ao sistema XYZ .

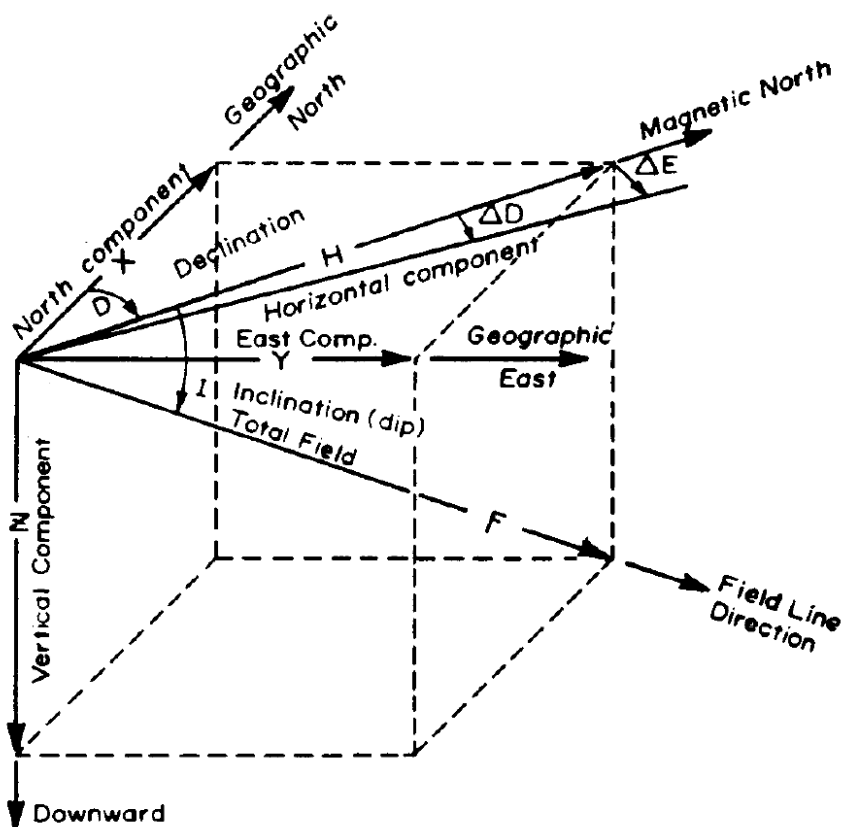


Figura 3.3: Sistema de coordenadas geomagnéticas. (CAMPBELL, 2003).

3.1.3 Variação do campo geomagnético

Todos os componentes do campo geomagnético apresentam periodicidades distintas que variam de alguns segundos a vários milhares de anos. Os períodos de até 22 anos geralmente estão ligados a fenômenos solares, enquanto as periodicidades maiores estão relacionadas principalmente à estrutura interna da Terra e à dinâmica de seu núcleo, embora alguns períodos de poucos anos também possam ser de origem interna (KANE, 1976).

O campo geomagnético é dinâmico e parâmetros como sua morfologia e intensidade podem variar de acordo com uma ampla variedade de escalas de tempo. A variação secular é relacionada às variações com periodicidade de décadas a poucas centenas de anos e sua origem está no núcleo externo (campo principal) e, dessa forma, fornece informações importantes sobre a dinâmica do fluido condutor no núcleo da Terra e a respeito da origem do próprio campo.

Outra forma de variação é a de curto prazo, geralmente sua origem é externa à Terra e remonta ao Sol. Na região da atmosfera solar, onde se localiza a cromosfera e a coroa solar, o vento solar é expelido em todas as direções e dá origem à heliosfera. A interação entre o vento solar, que na sua essência é um fluxo de plasma solar com atributos físicos (velocidade, campo magnético, por exemplo), com as partes

mais externas da atmosfera terrestre provoca também as variações irregulares no campo geomagnético, sentidas nas medições na superfície da Terra ou no espaço ao redor do nosso planeta. Tais interações podem ser intensificadas de acordo com a intensidade dos parâmetros do vento solar. Neste cenário, é possível que uma tempestade geomagnética (figura 3.4) seja originada, fazendo com que o campo magnético terrestre sofra variações significativas chamadas de variações irregulares.

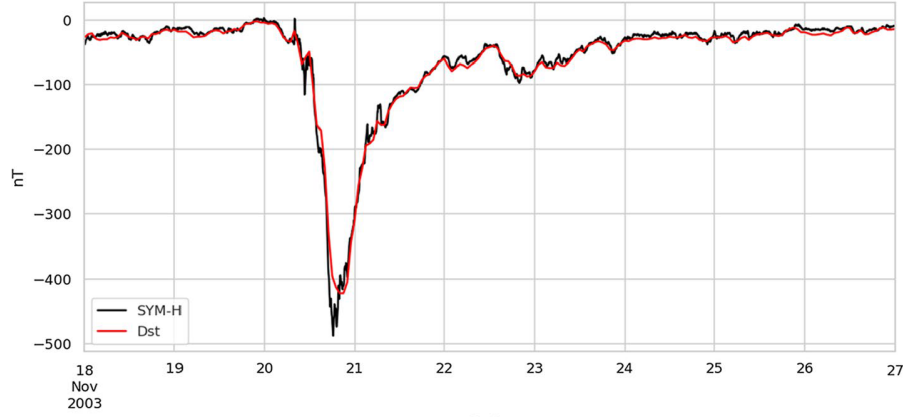


Figura 3.4: Exemplo de tempestade geomagnética. (COLLADO-VILLAYERDE et al., 2024).

3.2 Equações de Maxwell

Considerando que este estudo integra a análise de dados elétricos e magnéticos, é apropriado incluir uma breve descrição matemática dos fundamentos físicos que regem esses fenômenos. As equações de Maxwell constituem o arcabouço teórico fundamental para a compreensão da interação entre campos elétricos e magnéticos em qualquer meio. Matematicamente, têm-se:

3.2.1 Lei de Gauss para o Campo Elétrico

Forma diferencial:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

onde $\vec{E}$ é o vetor intensidade do campo elétrico (em Volts por metro, V/m), ρ é a densidade de carga (coulomb por metro cúbico, C/m³) e ε_0 é a permissividade elétrica (em Faraday por metro, F/m).

Forma integral:

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV$$

Pelo **Teorema da Divergência (Gauss)**:

$$\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_V (\nabla \cdot \vec{E}) dV$$

Logo:

$$\int_V (\nabla \cdot \vec{E}) dV = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV \Rightarrow \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

3.2.2 Lei de Gauss para o Campo Magnético

Forma diferencial:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0,$$

onde $\vec{B}$ é o vetor indução magnética.

Forma integral:

$$\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Aplicando o Teorema da Divergência:

$$\int_V (\nabla \cdot \vec{B}) dV = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Isso expressa a inexistência de monopólos magnéticos.

3.2.3 Lei da Indução de Faraday

Forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Forma integral:

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Pelo **Teorema de Stokes**:

$$\int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \Rightarrow \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

3.2.4 Lei de Ampère-Maxwell

Forma diferencial:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

onde $\vec{J}$ é a densidade de corrente elétrica.

Forma integral (com termo de Maxwell):

$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Aplicando Stokes:

$$\int_S (\nabla \times \vec{B}) \cdot d\vec{A} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \varepsilon_0 \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \Rightarrow \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

3.2.5 Resumo das Equações de Maxwell no Vácuo:

Tabela 3.1: Equações de Maxwell no vácuo em forma diferencial. Adaptado de GRIFFITHS (2023).

Equação	Forma Diferencial
(i) Lei de Gauss (elétrico)	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
(ii) Lei de Gauss (magnético)	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
(iii) Lei de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
(iv) Lei de Ampère-Maxwell	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

3.3 Ambiente próximo à terra

Na cadeia de fenômenos resultantes da interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre, a ionosfera e a magnetosfera exercem papéis fundamentais na formação de diversos ambientes e processos dinâmicos. A magnetosfera é a região de influência do campo magnético planetário. Ela se comporta como uma barreira para o fluxo do vento solar. Como resultado, uma frente de choque contínua e uma cavidade semelhante a uma bolha são formadas quando o vento solar encontra a magnetosfera da Terra (figura 3.5), dando origem a uma ampla variedade de regiões de distribuição de plasma e sistemas de correntes.

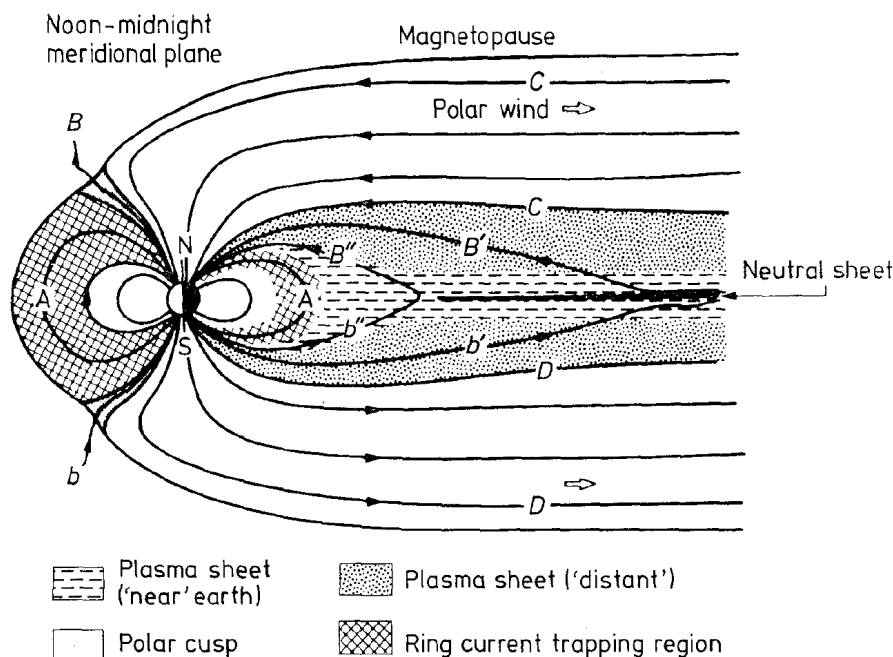


Figura 3.5: Magnetosfera terrestre e sua distribuição de plasma. (KANE, 1976).

Devido à radiação eletromagnética e aos feixes de partículas carregadas provenientes do Sol ou de origem externa ao sistema solar, os gases da alta atmosfera terrestre são ionizados, enquanto processos de recombinação ocorrem simultaneamente. O resultado desse equilíbrio dinâmico é a formação de um plasma altamente ionizado que envolve a Terra, conhecido como ionosfera. Sua abrangência pode ser dividida em camadas que se caracterizam de acordo com propriedades físicas, tal como densidade, condutividade e temperatura, por exemplo. A ionosfera, aproximadamente entre 50 e 1500 km acima da superfície da Terra, é subdividida na camada *D* (50–90 km), camada *E* (90–120 km) e na camada *F* (120–1500 km). Seu limite inferior (camada *D*) está associado à região onde a ionização é causada por radiações mais penetrantes, como raios X e raios cósmicos. Já o limite superior (camada *F*) pode ser considerado como a região de interação entre o campo geomagnético terrestre e o campo magnético interplanetário (IMF). A densidade de elétrons aumenta da camada *D* para a camada *F*, onde normalmente atinge $10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ao meio-dia. As energias dos elétrons estão em torno de alguns *eV* (MERRILL et al., 1998).

Em latitudes baixas e médias, a ionização da atmosfera neutra resulta, principalmente, da interação da radiação ultravioleta com as partículas constituintes da atmosfera, e a fotoionização resultante libera energia na forma de radiação eletromagnética ou calor, promovendo a recombinação. Já em altas latitudes, predomina a precipitação de partículas energéticas, sendo a ionização resultante de colisões entre essas partículas e a atmosfera neutra (SARMIENTO, 2018). Uma das manifestações resultantes dessas interações na forma de radiação é a aurora boreal.

3.3.1 Transientes Interplanetários

Vento solar

O ambiente que se estende do Sol à Terra está longe de ser vazio. A partir do Sol, um montante de partículas, sob a forma corpuscular e radiação, é expelido em todas as direções de forma contínua. A emissão de tais materiais altera o espaço interplanetário, tornando-o mais dinâmico. Tal material é um plasma altamente condutor que é expelido para o espaço interplanetário como resultado da expansão supersônica da coroa solar. Esse plasma é chamado de Vento Solar. Resulta da enorme diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário, sendo empurrado para longe do Sol, apesar da grande atração gravitacional que sofre (COSTA JR. et al., 2011). Ele flui com velocidade supersônica de cerca de 500 km/s e consiste principalmente de elétrons e prótons, com uma mistura de 5% de íons de hélio (KONO, 2010). Com a chegada do vento solar até as delimitações do campo geomagnético, este último é moldado em função dessa interação, criando uma região chamada magnetosfera — parte mais externa do campo geomagnético que deflete o vento solar (figura 3.6). Além disso, o vento solar é responsável pela precipitação de partículas nas regiões polares e por criar cinturões de radiação em regiões da magnetosfera.

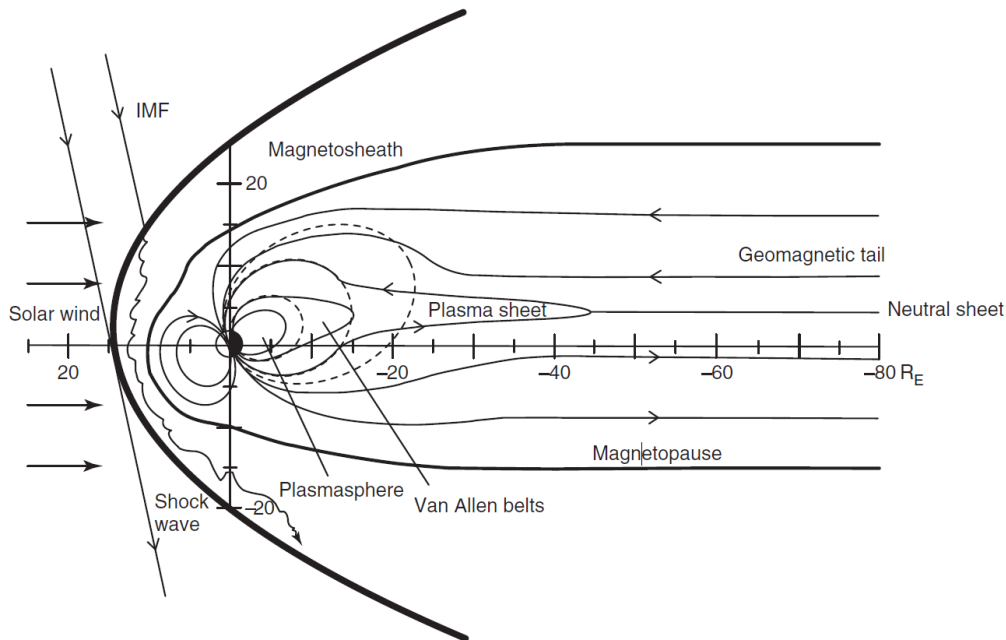


Figura 3.6: Configuração da magnetosfera sob pressão do vento solar. (PARKS, 2015).

Ejeções de Massa Coronal (CME)

Durante a maior parte do tempo, o campo magnético permanece estável, no entanto, quando outro transiente interplanetário de origem solar atinge a magnetosfera terrestre, chamado de Ejeções de Massa Coronal (do inglês, Coronal Mass Ejection, CME), esta sofre severas mudanças em sua intensidade. Essas CMEs remontam à região da atmosfera solar (corona solar) e têm seu número de frequência aumentada durante o período do máximo solar (figura 3.7) assim como os *flares* solares. Este último se origina de violentas erupções ocorridas na superfície solar e consiste na radiação emitida principalmente de regiões ativas solares (associadas com manchas solares) e, quando atinge a Terra, sua interação com a alta atmosfera resulta em aumento da condutividade e, conseqüentemente, da ionização desta região.

Em geral, os *flares* são seguidos por Ejeções de Massa Coronal. As CMEs transportam partículas energéticas que são capazes de danificar os componentes eletrônicos de satélites, prejudicar a saúde dos astronautas ou produzir acúmulo de carga dielétrica dentro de componentes semicondutores. O impacto direto de uma CME na magnetosfera da Terra desencadeia fortes perturbações geomagnéticas que, por sua vez, podem induzir Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs) na infraestrutura condutora na superfície da Terra (CARABALLO, 2016).

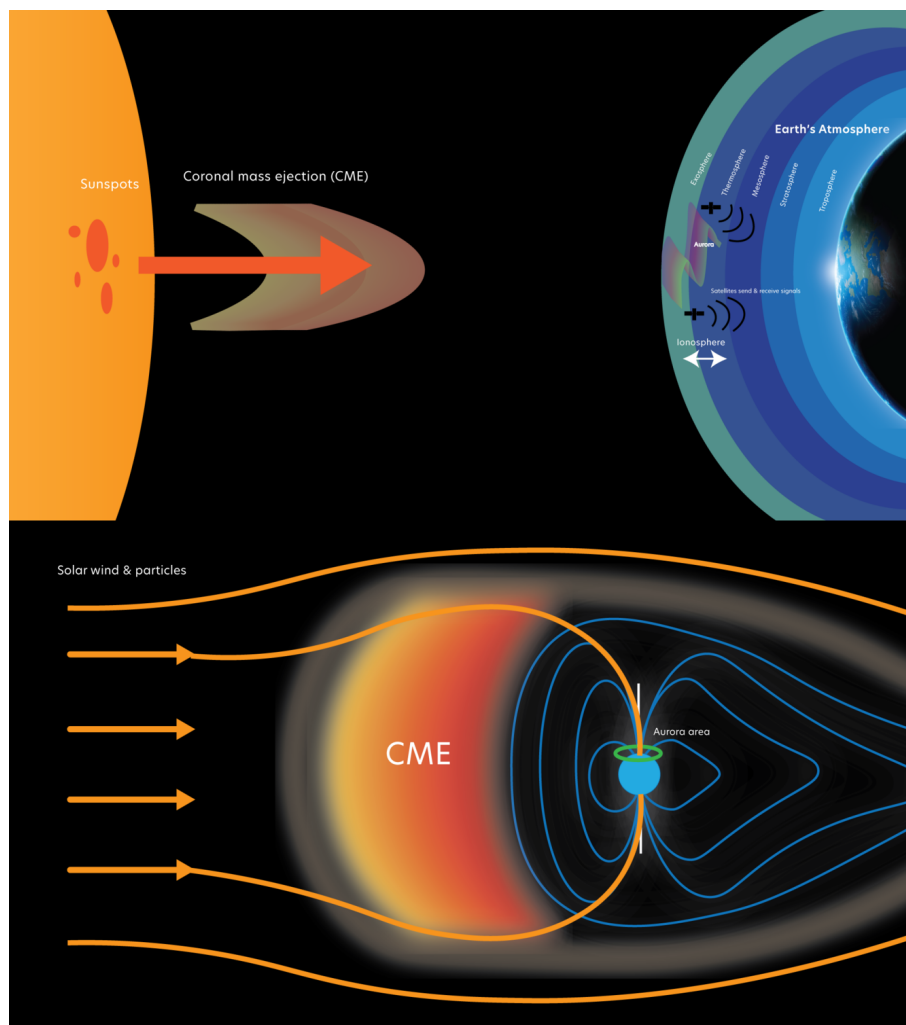


Figura 3.7: Representação de uma CME a partir de sua origem até seu choque com a magnetosfera terrestre. (USGS scienc for a changing world).¹

3.3.2 Sistemas de correntes elétricas

A luz ultravioleta solar que incide sobre a atmosfera da Terra ioniza uma fração da atmosfera neutra. Em altitudes acima de 80 km, as colisões são muito raras para resultar em recombinação rápida e uma porção ionizada permanente chamada Ionosfera é formada (KONO, 2010).

Os plasmas defletidos pela magnetosfera não são estacionários, mas se movem sob a influência de forças externas. Em algumas ocasiões, os íons e os elétrons se movem juntos, como no vento solar. Mas em outras regiões de plasma, os íons e os elétrons geralmente se movem em diferentes trajetórias, criando correntes elétricas. Essas correntes criam campos magnéticos, que distorcem o campo magnético interno da Terra, com maior intensidade em altitudes mais elevadas (KONO, 2010). A

¹www.usgs.gov/media/images/coronal-mass-ejections-cmes-move-surface-sun-towards-earth-through-space

compressão do campo magnético interno no lado diurno está associada ao fluxo de corrente através da superfície da magnetopausa, a corrente da magnetopausa (figura 3.8).

Existem vários sistemas de corrente nas camadas condutoras da ionosfera da Terra, em altitudes de 100 a 150 km. Os mais notáveis são os eletrojetos aurais dentro da aurora oval, as correntes Sq na ionosfera de latitude média diurna e o eletrojeto equatorial próximo ao equador magnético. As correntes alinhadas (do inglês, Field-aligned current, FAC) ao campo conectam as correntes magnetosféricas às que fluem na ionosfera polar (figura 3.8). Essas correntes são majoritariamente transportadas por elétrons e são essenciais para a transferência de energia e momento entre essas regiões e, também, podem exercer influência nas variações magnéticas na superfície da Terra (KONO, 2010).

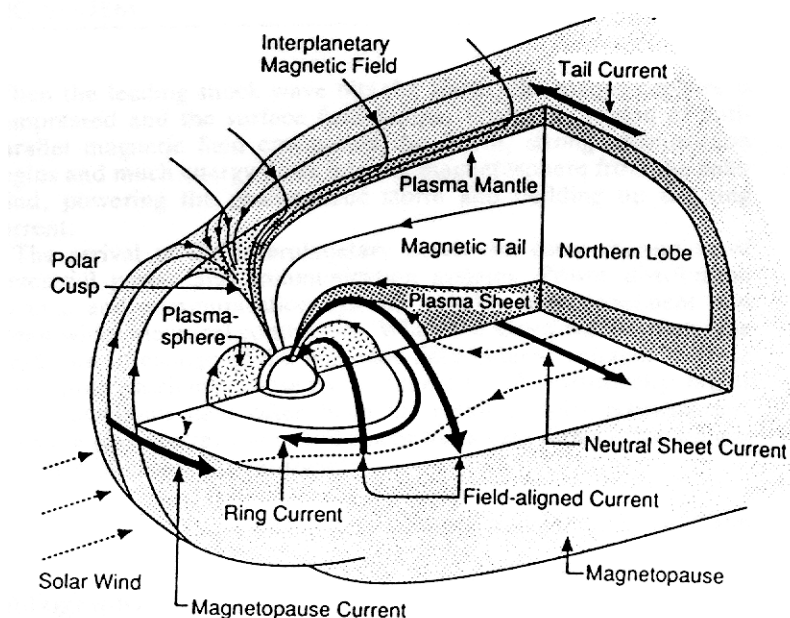


Figura 3.8: Sistema de Correntes Magnetosfera-ionsfera. (PITKÄNEN, 2011).

As correntes ionosféricas são responsáveis pela variação diária regular do campo geomagnético da ordem de algumas dezenas de nano teslas, o que geralmente é chamado de quietude solar (do inglês, Solar quiet, Sq). A Sq é uma variação “solar” porque depende principalmente do horário solar local (figura 3.9). Além disso, a Sq é uma variação “silenciosa” porque é visível somente quando os distúrbios causados pelo vento solar estão ausentes (YAMAZAKI e MAUTE, 2017).

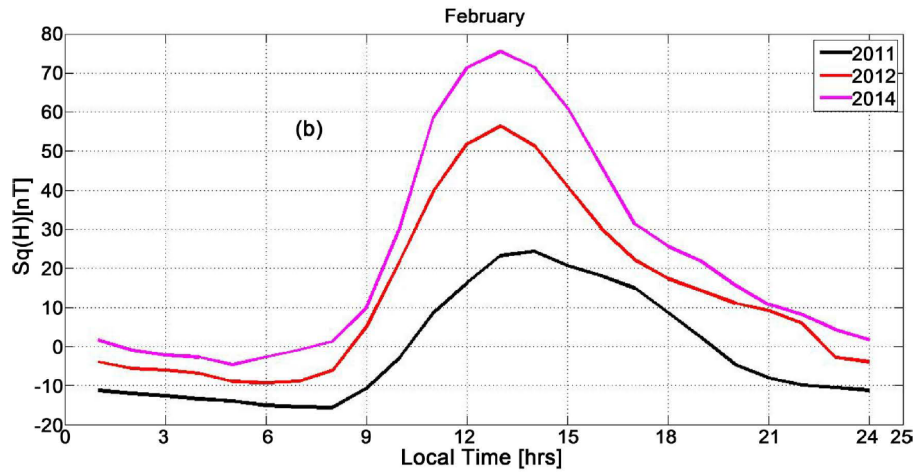


Figura 3.9: Variação diária do sistema de correntes Sq. (HONORÉ et al., 2017).

A condutividade ionosférica zonal efetiva, a chamada condutividade de Cowling, é localmente aprimorada ao longo do equador magnético, o que dá origem à forte corrente zonal do Eletrojato Equatorial. O efeito *Cowling* (COWLING, 1932) é o mecanismo no qual a condutividade de Pedersen é efetivamente aprimorada na presença de limites que restringem as correntes *Hall* e causam um campo elétrico de polarização. Um forte efeito Cowling ocorre no equador magnético, onde o campo geomagnético é horizontal. O efeito é frequentemente mencionado para explicar o eletrojato equatorial (YAMAZAKI e MAUTE, 2017).

3.4 Clima Espacial e seus efeitos

De acordo com a definição de clima espacial da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), os impactos associados a esses fenômenos abrangem múltiplos aspectos da vida cotidiana, desde a segurança das rotas aéreas até a precisão das atividades agrícolas. Ademais, uma ampla gama de fenômenos é impulsionada pela variabilidade solar, que ocorre em escalas temporais que vão de algumas horas a vários anos. Segundo o NOAA², diferentes tipos de clima espacial podem afetar distintos sistemas tecnológicos na Terra. As erupções solares podem produzir intensos raios X que degradam ou bloqueiam ondas de rádio de alta frequência utilizadas em comunicações, durante eventos conhecidos como tempestades de apagão de rádio (Radio Blackout Storms). As partículas energéticas solares (prótons energéticos) podem penetrar os sistemas eletrônicos de satélites e causar falhas elétricas. Essas partículas energéticas também bloqueiam comunicações por rádio em altas latitudes durante tempestades de radiação solar (Solar Radiation Storms). CMEs podem causar tempestades geomagnéticas na Terra e induzir cor-

²<https://www.swpc.noaa.gov/impacts>

rentes adicionais no solo, que podem comprometer o funcionamento de redes de energia elétrica.

O ambiente espacial próximo à Terra, mais precisamente as condições eletromagnéticas, desempenha um papel crucial para diversos sistemas elétricos na superfície e na órbita terrestre. Essa abrangência de impactos começou a ser mais amplamente estudada a partir do ano de 1989, após o apagão ocorrido no sistema hidrelétrico de Québec no Canadá durante a tempestade geomagnética ocorrida no dia 13 de março daquele ano. Entre 6 e 12 de março de 1989, uma série de enormes explosões com ejeção de massa coronal ocorreu na mesma região solar (figura 3.10). A explosão que ocorreu no final do dia 10 de março ejetou um fluxo de partículas (elétrons, prótons e partículas alfa) em direção à Terra, alcançando o planeta cerca de 50 horas depois. Isso desencadeou uma tempestade geomagnética intensa que afetou instalações humanas por um período de aproximadamente 30 horas. Devido à alta resistividade do solo, fez com que produzisse grandes campos elétricos que geraram GICs no sistema de energia de Hydro-Québec, causando saturação do transformador, geração de harmônicos e aumento do consumo de energia reativa pelos transformadores (BOLDUC, 2002). Os impactos e prejuízos alcançados por este evento fizeram com que a comunidade científica e privada olhassem com mais atenção para os fenômenos que transitam no ambiente entre o Sol e a Terra.

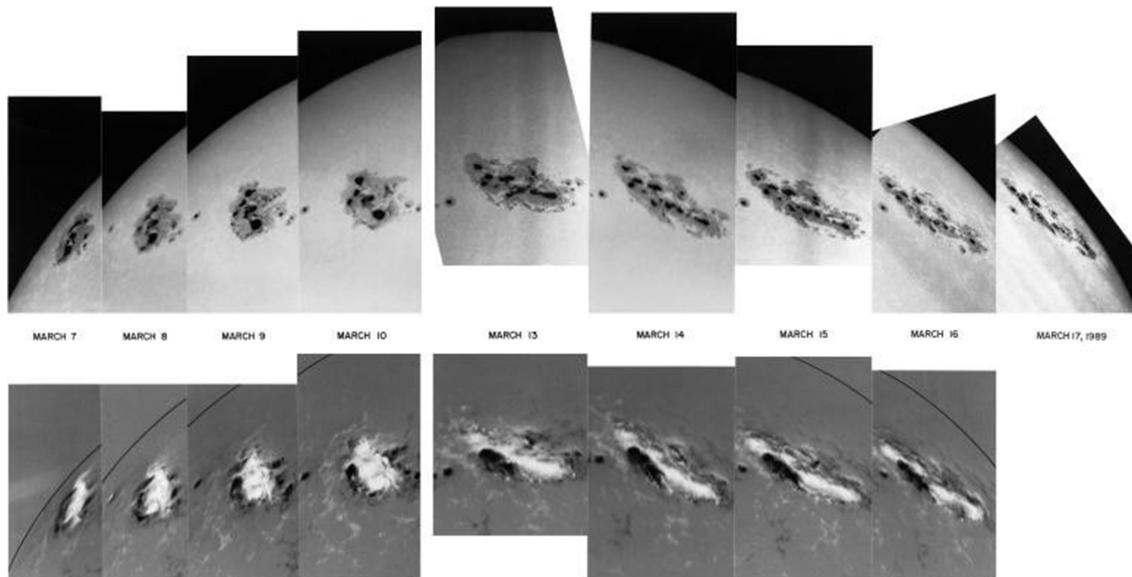


Figura 3.10: Região ativa a qual originou as CMEs que atingiram o campo geomagnético às 1:27 UTC do dia 13 de março de 1989. (BOTELER, 2019).

3.4.1 Períodos geomagneticamente perturbados

Tipicamente, durante os períodos em que o ciclo solar de 11 anos se aproxima do máximo solar, por consequência, há um crescimento dos fenômenos CMEs e *flares*

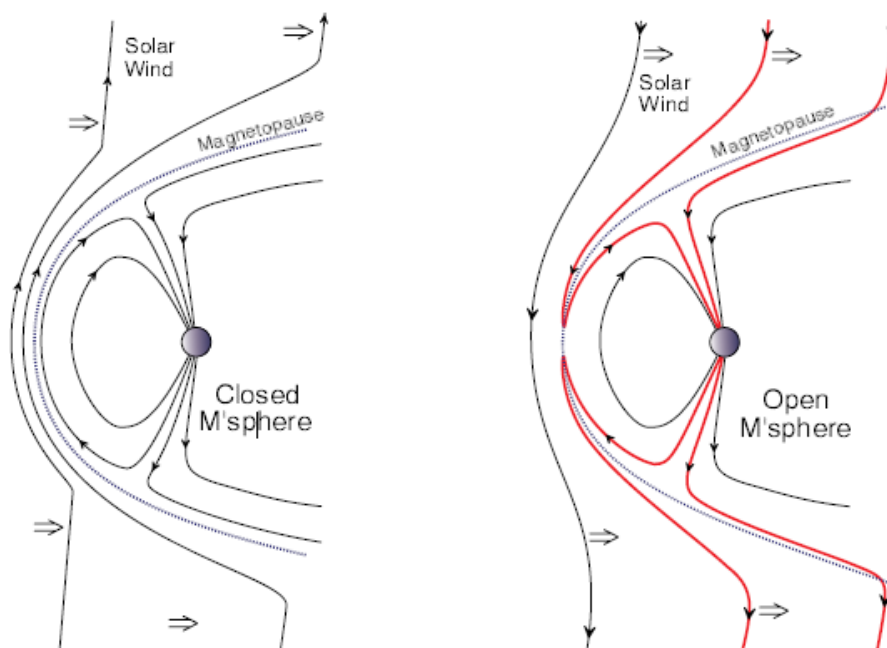


Figura 3.11: Ilustração da configuração do processo de reconexão magnética. (SCHERER et al., 2005)

na atmosfera e superfície solar. Com a chegada desses emaranhados de partículas carregadas à magnetosfera, há uma precipitação dessas partículas na cavidade interna da magnetosfera, intensificando, assim, os sistemas de correntes e perturbando o campo geomagnético na superfície. Essas perturbações são visivelmente sentidas com maior intensidade pela componente H do campo geomagnético, em virtude de estar ligada ao sistema de correntes elétricas do anel acima das regiões equatoriais.

Um dos processos mais importantes para a transferência de massa ou energia para a magnetosfera é a reconexão magnética. Durante os períodos de reconexão magnética do IMF para o sul (B_z), o campo geomagnético fechado se conecta com o campo magnético interplanetário, gerando um fluxo magnético recém-aberto (Fig. 3.11). Ao longo do campo recém-aberto, as partículas podem entrar e sair livremente da magnetosfera (SCHERER et al., 2005). Normalmente, quando a pressão dinâmica do vento solar é fortemente aumentada por muitas horas, esta pode vir a exercer uma considerável compressão de toda a magnetosfera. Adicionalmente, os efeitos de uma CME podem ser amplificados se, além disso, o IMF for muito grande e estiver voltado para o sul. Com tais condições atendidas, a precipitação de partículas na magnetosfera interior acaba que por interagir com a região da ionosfera, intensificando o conteúdo energético das camadas. Como a ionosfera abriga diversos sistemas de corrente, estas podem sofrer amplificações e perturbarem o campo magnético na superfície terrestre.

Em termos quantitativos, uma tempestade geomagnética pode ser observada através da variação do índice Dst (do inglês, Disturbance storm-time). O índice

DST é derivado das escalas horárias da variação magnética horizontal de baixa latitude. Este índice indica o efeito da corrente do anel equatorial de alta altitude, globalmente simétrica, que flui para o oeste e causa a depressão da “fase principal” em todo o mundo no campo da componente H durante grandes tempestades magnéticas (NOAA, 2025)³. Um aumento de $2 \times 10^{13} J$ na energia da corrente do anel corresponde a uma perturbação de 1 nT do campo magnético terrestre. Assim, grandes tempestades magnéticas podem gerar um aumento da energia da corrente do anel em mais de $5 \times 10^{15} J$ e causar uma corrente total de mais de $10^7 A$. Isso corresponde a perturbações de mais de 1% da energia total do campo magnético dipolo. Com uma energia média de 10 keV por partícula, mais de 3×10^{30} partículas são injetadas na corrente do anel nesses momentos (SCHERER et al., 2005).

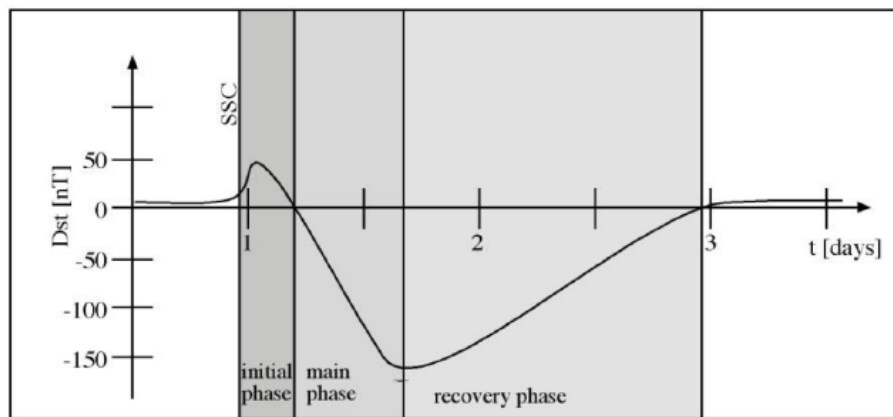


Figura 3.12: Fases de uma tempestade geomagnética. (KASRAN et al., 2018a).

Em regiões de altas latitudes, uma manifestação de períodos geomagnéticos intensos é notada com a aparição de auroras boreais, mas que também podem surgir em latitudes médias e baixas como durante o chamado Evento Carrington (CARRINGTON, 1859) onde a atividade geomagnética foi tão intensa que auroras boreais foram relatadas em latitudes de aproximadamente 18° . Efeitos em sistemas elétricos também foram registrados. O mais notável, em termos de danos estruturais, desses efeitos foram: o colapso dos sistemas de cabos de telégrafos e incêndios provocados pelas auroras boreais (CLIVER e DIETRICH, 2013).

Em geral, uma tempestade geomagnética possui três fases distintas:

- Fase inicial: caracterizada por registrar a chegada de uma estrutura de choque interplanetária (que leva à um SSC, Storm sudden commencement; figura 3.12) contra o campo geomagnético, onde a componente H aumenta sua intensidade instantaneamente.
- Fase principal: esta se caracteriza pela queda acentuada no índice Dst (figura 3.12) para valores abaixo de -50 nT e por campos interplanetários sustentados

³<https://www.ncei.noaa.gov/products/geomagnetic-indices>

em direção ao sul (GONZALEZ *et al.*, 1994). Esta fase pode durar de duas a oito horas.

- Fase de reocupação: nesta fase, o campo geomagnético tende a voltar para seu comportamento normal, isto é, o que tinha antes da tempestade (figura 3.12).

Além disso, uma tempestade pode ser classificada de acordo com sua intensidade, mais precisamente em relação à variação do índice Dst (GONZALEZ *et al.*, 1994):

- Atividade normal (ou calma): $Dst > -30nT$.
- Fraca: $-50nT \leq Dst \leq -30nT$.
- Moderada: $-100nT \leq Dst \leq -50nT$.
- Intensa: $Dst < -100nT$.

Outra ferramenta utilizada globalmente na comunidade do geomagnetismo para indicação de atividade geomagnética é o índice Kp. O Kp é um índice planetário padronizado e estatístico da variação geomagnética em intervalos de 3 horas, criado por BARTELS (1949), onde mede a intensidade da atividade geomagnética em escala global, com valores de 0 (tranquilo) a 9 (tempestade extrema). Ele é obtido a partir de uma rede de observatórios subaurorais distribuídos principalmente no hemisfério norte e em alguns pontos do hemisfério sul, como Amberley e Toolangi, Austrália (ROSTOKER, 1972).

3.4.2 Correntes induzidas geomagneticamente

As Correntes Induzidas Geomagneticamente (GICs) são o final da complicada cadeia de clima espacial que começa no Sol. Elas se referem a correntes acionadas em sistemas tecnológicos, como redes de transmissão de energia elétrica, oleodutos e gasodutos, cabos telefônicos e sistemas ferroviários, pelo campo geoeletrico induzido por um distúrbio ou tempestade geomagnética na superfície da Terra. O princípio físico do fluxo de GIC em um sistema tecnológico pode ser facilmente compreendido com base na lei de indução de Faraday, Eq. (3.3), um campo magnético variável induz correntes em condutores. Para expressar isso de forma mais precisa, a lei de Faraday implica a existência de um campo geoeletrico durante uma variação temporal do campo geomagnético. Esse campo elétrico, então, conduz as correntes em todas as redes tecnológicas. (PIRJOLA, 2000b).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

Os transformadores do sistema de energia são saturados pelas GICs, causando problemas na operação do sistema ou até mesmo danos permanentes. As tubulações podem sofrer com problemas associados à corrosão devido às GICs e às tensões que acompanham a relação entre a tubulação e o solo. Os equipamentos de telecomunicações e ferroviários podem sofrer sobretensões prejudiciais (PIRJOLA, 2002). As GIC são induzidas nas linhas de transmissão e fluem para o solo por meio de transformadores. No momento em que fluem para terra, elas vão para o neutro aterrado de um autotransformador trifásico, onde são divididas igualmente em cada fase do transformador (figura 3.13). Nos transformadores, o campo magnético AC é combinado com um campo magnético extra que satura o núcleo do transformador.

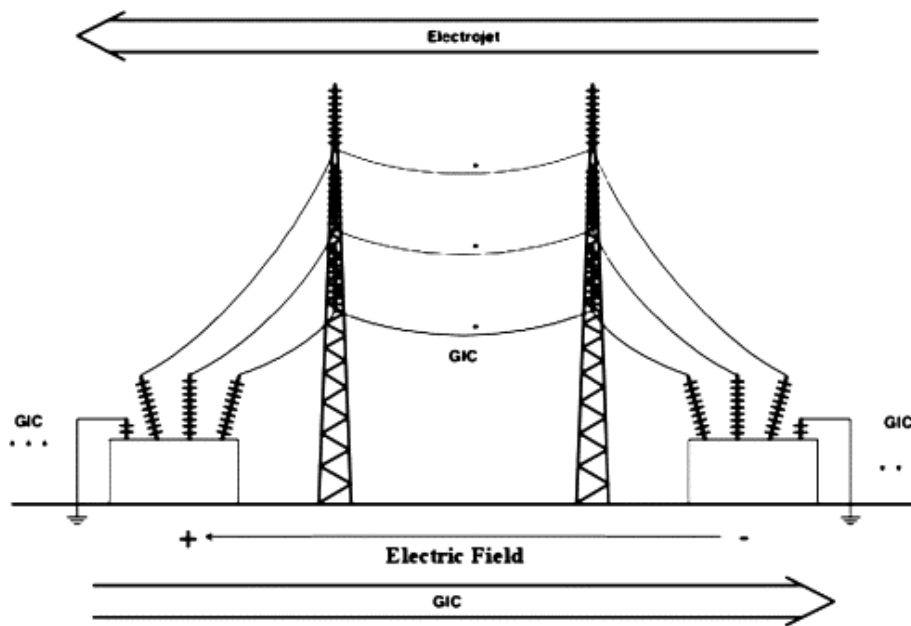


Figura 3.13: Mecanismo e efeito das GICs em um sistema de energia. (LUNDSTEDT, 2006).

Pesquisas com finalidade de caracterizar e prever incidências de GICs são amplamente realizadas ao redor do mundo desde o século XX após o incidente em Québec. Vale destacar os trabalhos realizados na América do Sul, em baixas e médias latitudes. BARBOSA *et al.* (2014) investigaram como tempestades geomagnéticas intensas (7 a 10 de novembro de 2004 e 29 de outubro a 1º de novembro de 2003, "tempestade de Halloween") podem gerar GICs na rede de transmissão de energia elétrica no Brasil usando modelos numéricos que simulam as GICs, baseando-se em diferentes configurações de resistividade do subsolo. CARABALLO *et al.* (2013) analisaram como as GICs afetam a rede de alta tensão do Uruguai onde os parâmetros da rede, como impedâncias de aterramento e resistividade da rede, são estimados para o cálculo da GIC, resultando em GICs com picos de até 15 A. ESPINOSA *et al.* (2023) investigaram como tempestades geomagnéticas causam variações no campo magnético da Terra, induzindo GICs nas redes de energia elétrica do sul do

Brasil. Foi utilizado um modelo tridimensional (3D) da resistividade elétrica da crosta terrestre sob a bacia do Paraná para calcular as componentes do campo geoeletrico durante duas tempestades intensas ocorridas em 2015. Com esses dados, eles simulam a circulação de GICs na rede de transmissão de alta tensão da região, identificando áreas mais vulneráveis e orientando a instalação futura de sensores para monitoramento.

Considerando os riscos que as GICs representam para a integridade dos sistemas de energia na superfície terrestre, torna-se fundamental o aprofundamento de pesquisas que visem compreender esses fenômenos e desenvolver estratégias preventivas, especialmente em cenários caracterizados por alta vulnerabilidade a distúrbios geomagnéticos. O impacto potencial das GICs em transformadores, linhas de transmissão e equipamentos de controle pode comprometer significativamente a estabilidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica, com consequências econômicas e sociais relevantes, principalmente se considerar a dependência atual da sociedade nesses sistemas de energia.

3.5 Eletrojato Equatorial

No equador geomagnético, os vórtices de corrente S_q dos hemisférios sul e norte se tocam e formam uma banda de corrente estendida semelhante a um jato, na camada E da ionosfera, dentro da faixa de $\pm 3^\circ$ do dip equatorial, o Eletrojato Equatorial (do inglês, Equatorial Electrojet, EEJ; figura 3.14). Entretanto, esse EEJ não seria tão forte se fosse formado apenas pela concentração da corrente S_q . A geometria especial do campo magnético no equador, juntamente com a incidência quase perpendicular da radiação solar, causa um aumento equatorial na condutividade efetiva que leva a uma amplificação da corrente do EEJ, o que pode ser observado na variação diária da componente H do campo geomagnético (KONO, 2010).

Os principais efeitos da EEJ incluem a geração de campos elétricos intensos na região do equador, que influenciam o movimento de partículas carregadas na ionosfera, levando à formação de irregularidades de densidade eletrônica, como as irregularidades de densidade de partículas que podem causar fenômenos como a difração de ondas e cintilação de sinais de rádio (FORBES, 1981). Além disso, a EEJ afeta o acoplamento entre as camadas E (o EEJ forma uma corrente elevada na camada E da ionosfera, que produz variações significativas no campo elétrico local) e F da ionosfera, contribuindo para a dinâmica de correntes elétricas e energia eletromagnética na atmosfera superior. Esses efeitos também se manifestam na assinatura magnética observada no solo, influenciando as variações diárias dos sinais magnéticos terrestres (como os encontrados em SILVA *et al.* 2024, por exemplo)

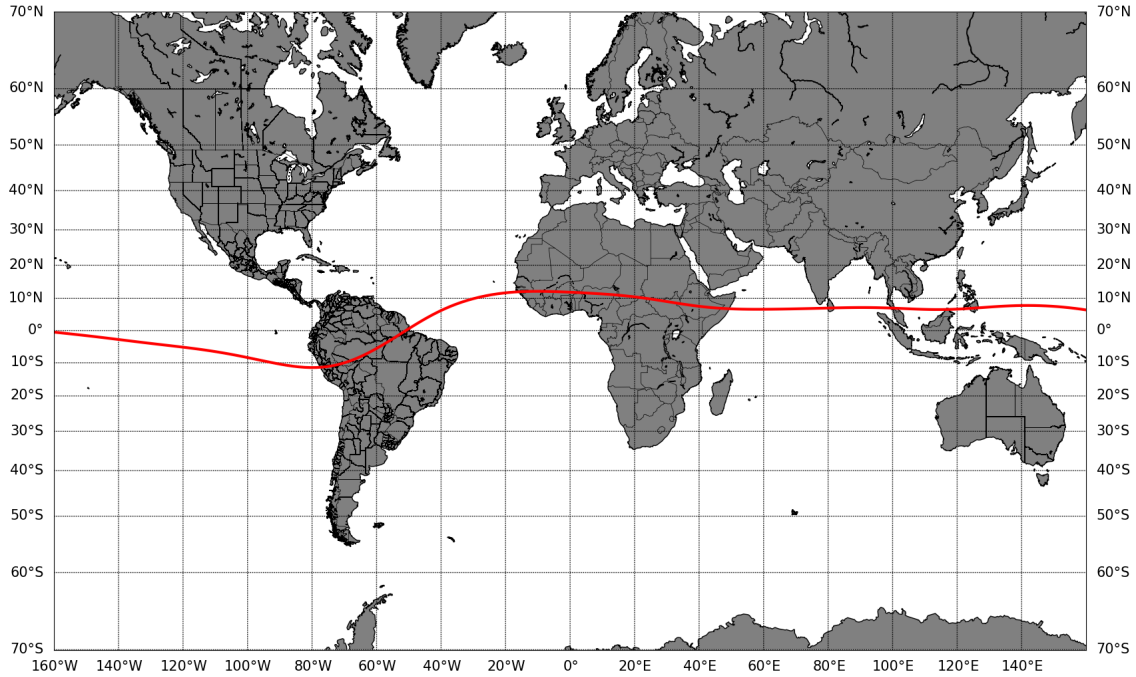


Figura 3.14: Eletrojato Equatorial durante o ano de 2024. (Imagem gerada pelo autor)

Nas últimas décadas, o EEJ tem seu papel atribuído à geração de GICs em regiões de baixa e equatorial latitude. Por exemplo, [CARTER et al. \(2015\)](#), em uma análise de choques interplanetários (Interplanetary shocks), indicou que estes eventos podem amplificar significativamente as variações do campo magnético na região equatorial, especialmente devido ao efeito do EEJ. Essa amplificação ocorre tanto durante períodos geomagneticamente ativos quanto em períodos calmos, o que representa uma mudança de paradigma ao mostrar que GICs potencialmente prejudiciais podem ocorrer mesmo sem tempestades severas. Além disso, a resposta do campo magnético à passagem de choques é mais forte durante o dia, devido à maior atividade do EEJ, aumentando o risco de danos às infraestruturas elétricas na região equatorial.

Pesquisas como a mencionada anteriormente reforçam a importância de se considerar o papel do EEJ nos riscos associados à indução de GICs mesmo em regiões de baixa latitude e próximas ao equador magnético. Áreas que, teoricamente, seriam menos suscetíveis a esses fenômenos. Esses estudos desafiam a percepção tradicional de baixa vulnerabilidade nessas latitudes, evidenciando que, sob determinadas condições geomagnéticas, efeitos significativos também podem ocorrer, exigindo atenção por parte de operadores e planejadores de sistemas elétricos. No contexto deste trabalho, o EEJ é considerado um fator potencialmente decisivo para explicar a amplificação das variações da componente H do campo geomagnético observadas em latitudes próximas ao equador magnético. Essa característica o torna um elemento central na avaliação da suscetibilidade de linhas de transmissão equatoriais à

indução de GICs.

3.6 Linhas de transmissão de energia

Linhas de transmissão de energia são grandes estruturas integradas aos sistemas elétricos, cuja função principal é transportar energia elétrica das usinas geradoras até os respectivos centros de consumo. No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é a entidade responsável por gerenciar a operação do sistema elétrico em âmbito nacional. Essas linhas operam em diferentes níveis de tensão —230, 345, 440, 500, 525, 600, 750 e 800 quilovolts (kV) —distribuídos de forma estratégica conforme as necessidades de transmissão.

Devido à vasta extensão territorial do país, a malha de transmissão forma o Sistema Interligado Nacional (SIN) (ver Figura 3.15), que permite a transferência de energia entre subsistemas, a obtenção de ganhos sinérgicos e a otimização do uso da diversidade hidrológica entre bacias (ONS, 2025).

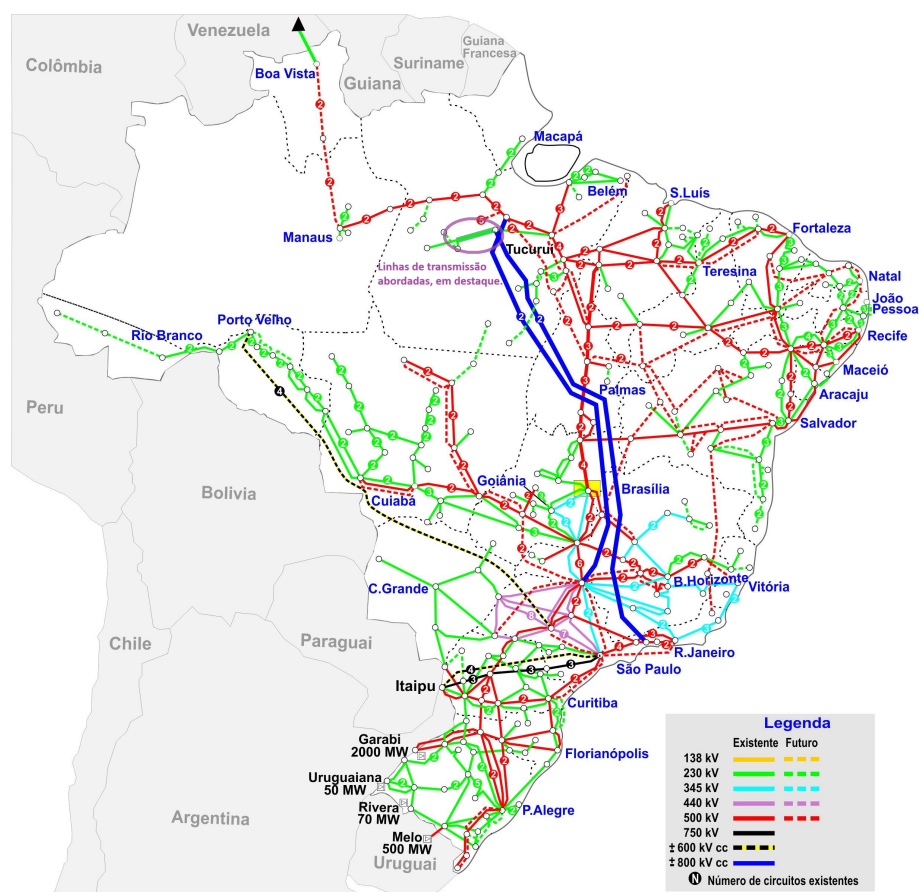


Figura 3.15: Malha brasileira de linhas de transmissão de energia elétrica. Destaque (elipse púrpura) para as utilizadas neste trabalho. (ONS, 2025).

Em função da complexidade da infraestrutura exigida para a instalação e operação dessas linhas, elas estão sujeitas a diversos tipos de incidentes que podem compro-

meter seu funcionamento contínuo. Esses eventos variam desde quedas de árvores sobre as estruturas até fatores de origem geofísica. Este último, em especial, tem despertado crescente interesse tanto na comunidade científica quanto nas empresas responsáveis pela operação do sistema, sendo um dos temas centrais abordados nesta pesquisa.

Capítulo 4

Dados

Neste capítulo, serão apresentados os dados das linhas de transmissão de energia e dos observatórios magnéticos selecionados para a análise. Primeiramente, é apresentado a descrição dos cenários, em termos geomagnéticos, em que esta análise foi realizada.

4.1 Contextos geomagnéticos

Este estudo incorpora dados tanto elétricos quanto magnéticos. Para a análise magnética, foi selecionada a componente horizontal (H) do campo geomagnético, por apresentar, em geral, a maior amplitude e ser particularmente sensível aos efeitos do acoplamento magnetosfera-ionosfera.

4.1.1 Dia Perturbado

A tempestade geomagnética ocorrida durante os dias 10 e 11 de maio de 2024, considerada o evento mais intenso do ciclo solar 25 até então, atingiu um valor mínimo do índice Dst de -412 nT e um índice Kp igual a 9, o máximo valor da escala (Figura 4.1). A tempestade foi desencadeada pelo impacto de uma CME na magnetosfera terrestre às 17:05 UTC do dia 10 de maio, caracterizado por um súbito início de tempestade, SSC. Essa CME teve origem na região ativa solar *AR3664* e alcançou o ponto de Lagrange L1 às 16:34 UTC. Sua chegada foi registrada globalmente por redes de magnetômetros em solo. Uma segunda CME atingiu o ponto L1 às 21:36 UTC e impactou a Terra às 22:21 UTC do mesmo dia (TULASI RAM et al., 2024).

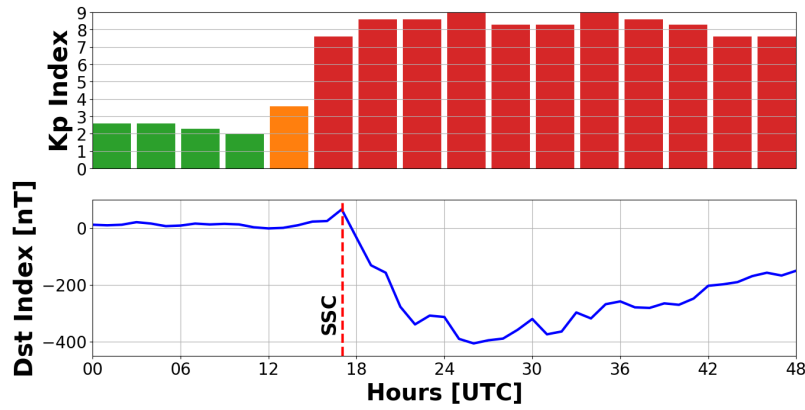


Figura 4.1: Visualização de painéis que caracterizaram a atividade geomagnética durante a tempestade de 10-11 de maio de 2024, apresentando: (acima) progressão do índice Kp, (abaixo) variação do índice Dst. (Imagem gerada pelo autor).

4.1.2 Dia sem tempestade

Para fins comparativos, realizou-se uma análise durante um período geomagneticamente moderado, compreendido entre 03:00 e 12:00 UTC (ou, 00:00 e 9:00 horas no tempo local das linhas de transmissão) do dia 24 de março de 2024.

Este período antecede, de forma quase imediata, o início da tempestade geomagnética ocorrida na referida data (iniciada por uma SSC às 14:34 UTC). Devido à limitação na disponibilidade dos dados elétricos por parte da empresa de energia parceira, dados relativos a períodos geomagneticamente calmos ($Dst > -30$ nT) não estão disponíveis para este trabalho. No entanto, o período abordado, em termos de índices geomagnéticos, pode ser comparado com o de 10–11 de maio de 2024 devido a este último ser classificado como “tempestade intensa”, ou seja, $Dst < -100$ nT. Por outro lado, o período analisado no dia 24 de março de 2024 é classificado como período geomagneticamente moderado devido ao índice Dst variar entre valores no intervalo de -50 nT a -66 nT e o índice Kp entre 3.66 e 4.33 (figura 4.2) durante o intervalo de tempo selecionado. Dessa forma, uma comparação entre os dois períodos pode ser realizada devido à diferença nas condições geomagnéticas serem minimamente razoáveis para tal procedimento.

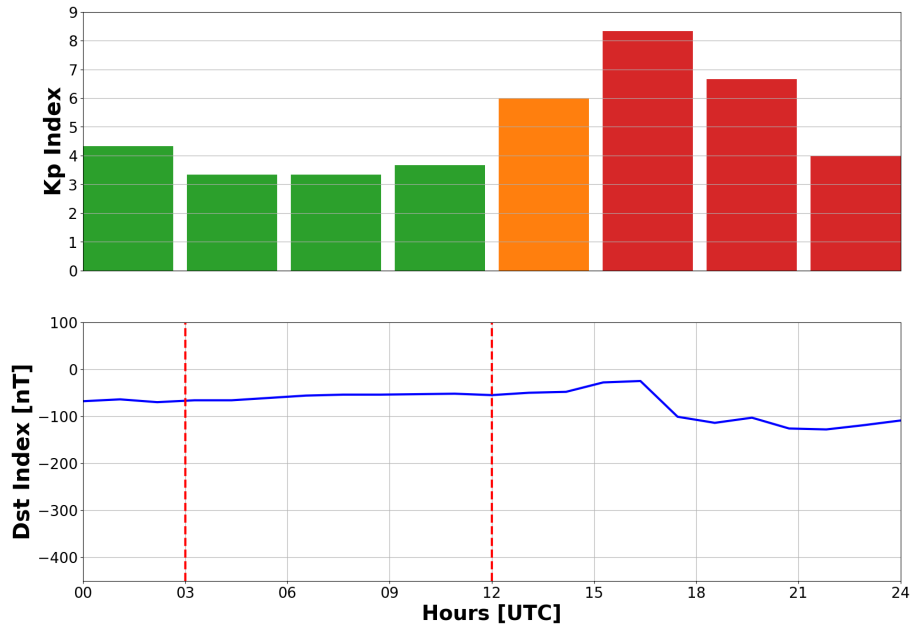


Figura 4.2: Visualização de painéis que caracterizaram a atividade geomagnética durante o dia 24 de março de 2024, apresentando: (acima) progressão do índice Kp, (abaixo) variação do índice Dst. As linhas tracejadas verticais em vermelho delimitam o período analisado. (Imagem gerada pelo autor).

4.2 Dados Elétricos

Como iniciativa, ressalta-se a relevância da obtenção desses dados, considerando a dificuldade de acesso decorrente de sua natureza privada. Tal conquista confere ainda mais valor a este trabalho, uma vez que o uso dessas informações representa um esforço significativo por parte dos autores para viabilizar as análises realizadas neste trabalho.

Os dados elétricos analisados neste estudo consistem em medições de corrente e voltagem provenientes de duas linhas de transmissão (LTs) de energia: Altamira/Transamazônica C1 (TMAT-01) e Altamira/Transamazônica C2 (TMAT-02), ambas localizadas no estado do Pará, região Norte do Brasil (ver Tabela 4.1 e Figura 4.3). Esses conjuntos de dados foram fornecidos pela concessionária regional ELETRONORTE e apresentam uma taxa de amostragem de 5 minutos.

As LTs TMAT-01 e TMAT-02 estão postas em paralelo uma a outra e operam na frequência elétrica de 60 Hz (considerado regime permanente; padrão estabelecido pela legislação brasileira), tendo como tipo de corrente a corrente alternada (CA). Adicionalmente, estas LTs também compartilham, portanto, coordenadas geomagnéticas e geográficas praticamente semelhantes. Cada linha possui aproximadamente 188 km (classificadas como médias) de extensão, com os mesmos pontos de início e término nas mesmas subestações. Ambas operam no mesmo nível de voltagem (230 kV) e estão equipadas com componentes elétricos equivalentes. Entre

esses componentes destacam-se os transformadores de corrente (TCs) e os transformadores de potencial (TPs), responsáveis pela aquisição das medições operacionais utilizadas neste estudo. Estes dispositivos, também, são responsáveis pela adaptação dos níveis de corrente e voltagem, de modo a compatibilizá-los com os parâmetros operacionais exigidos pelos gerenciadores das linhas de transmissão. A Tabela 4.1 apresenta as coordenadas geomagnéticas¹, latitude magnética (Dip), taxa de amostragem e voltagem associadas a cada linha de transmissão.

Linha de transmissão	Código	País/Estado	Lat. Mag. (°N)	Long. Mag. (°L)	Lat. dip (°N)	Voltagem
Altamira/Transamazônica C1	TMAT-01	Brasil/PA	-1.57	19.49	-1.94	230 kV
Altamira/Transamazônica C2	TMAT-02	Brasil/PA	-1.57	19.49	-1.94	230 kV

Tabela 4.1: Informações detalhadas sobre as linhas de transmissão de energia. (Tabela gerada pelo autor).

Uma importante característica das LTs é quanto as suas orientações magnéticas. Segundo TRIVEDI *et al.* (2007), estatisticamente, os campos geoeletricos leste-oeste tendem a ser um pouco maiores do que os campos norte-sul, produzindo, assim, GICs maiores em LTs orientadas leste-oeste. Pela figura 4.3, podemos notar que as linhas estão orientadas, predominantemente, na direção leste-oeste, quase paralelas ao dip equatorial (consequentemente, ao EEJ). Características essas que também justificam a escolha dessas LTs, em especial, como objeto de estudo neste trabalho.

4.3 Dados magnéticos

Os dados magnéticos utilizados foram obtidos a partir de observatórios terrestres selecionados de acordo com a disponibilidade daqueles mais próximos possíveis das linhas de transmissão abordadas neste trabalho, com frequência de amostragem em intervalos de 1 minuto. A Figura 4.3 ilustra a localização geográfica dos observatórios magnéticos utilizados neste estudo: Tatuoca (TTB) e Kourou (KOU), ambos integrantes da iniciativa INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network)². Adicionalmente, foram utilizados dados da estação magnética de São Luís (SLZ), que integra a Rede de Magnetômetros EMBRACE (Embrace MagNet)³, desenvolvida pelo Programa Brasileiro de Estudos e Monitoramento de Clima Espacial, com o objetivo de aprimorar o monitoramento do campo magnético na América do Sul.

A região do estudo compreende a parte norte do país, mais precisamente o estado do Pará (figura 4.3), local onde se encontram as linhas de transmissão de energia (em latitude equatorial). Nessas latitudes, é comum associar perturbações magnéticas

¹https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/coord_calc.html

²<https://intermagnet.org/>

³<https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/en/>

à figura do EEJ (CARTER et al., 2015; SILVA et al., 2024; ZHOU et al., 2018). Dessa forma, a região torna-se bastante atraente para estudos que associem o papel do EEJ com perturbações nas linhas de transmissão de energia locais.

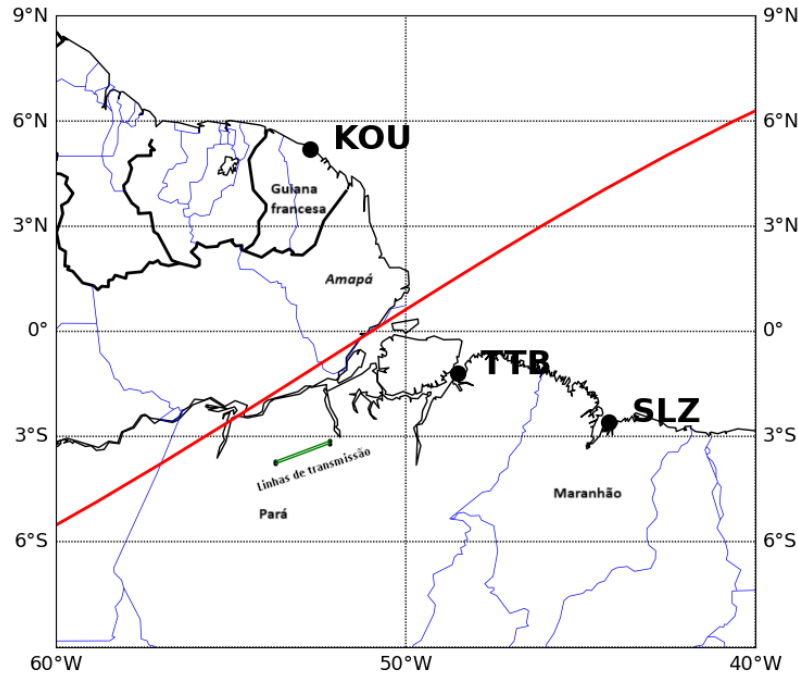


Figura 4.3: Região de estudo compreendendo o setor norte do Brasil. Destaques para as linhas de transmissão, em verde; os observatórios magnéticos de Tatuoca (TTB), Kourou (KOU) e São Luís (SLZ); e o EEJ durante o ano de 2024, em vermelho. (Imagem gerada pelo autor).

Destaca-se que a estação SLZ é, geograficamente, o segundo observatório mais próximo das linhas de transmissão de energia analisadas nesta pesquisa. Para os fins deste estudo, o termo “observatório” será utilizado de forma abrangente para se referir tanto aos observatórios plenamente equipados quanto às estações magnéticas, reconhecendo-se, no entanto, as distinções técnicas existentes entre essas instalações.

Informações detalhadas sobre cada observatório magnético utilizado neste trabalho são apresentadas na tabela 4.2, com as coordenadas geomagnéticas fornecidas no sistema de referência geomagnético, utilizando o modelo IGRF de 13^a geração para o ano de 2024, a fim de oferecer um contexto magnético mais preciso. A seleção desses observatórios considerou, principalmente, a proximidade em relação às linhas de transmissão, visando preservar a similaridade na morfologia e nas variações do campo magnético nas regiões adjacentes às linhas.

Observatório magnético	País	Lat. Mag. (°N)	Long. Mag (°L)	Lat dip (°N)	Distância das linhas
Tatuoca (TTB)	Brasil	-2.13	23.90	-2.62	~460 km
Kourou (KOU)	Guiana Francesa	6.02	22.03	5.87	~925 km
São Luís (SLZ)	Brasil	-5.70	23.33	-6.57	~977 km

Tabela 4.2: Informações detalhadas sobre os observatórios magnéticos. (Tabela gerada pelo autor).

Além disso, para a avaliação das variações da componente H , observatórios localizados dentro do intervalo de $\pm 3^\circ$ da linha do equador magnético, bem como em latitudes baixas (entre 6° e 9° a partir do equador magnético), são considerados ideais quando se leva em conta a influência do EEJ, conforme apontado por SOARES *et al.* (2018). Embora KOU e SLZ estejam mais distantes das linhas de transmissão em comparação a TTB, além de serem os mais próximos das LTs disponíveis para o período considerado, foram incluídos nesta análise para possibilitar uma comparação das dinâmicas das variações geomagnéticas entre observatórios situados em regiões com diferentes distâncias em relação à zona de influência do EEJ durante o período analisado.

Embora os observatórios magnéticos utilizados neste estudo não estejam localizados nas proximidades imediatas das linhas de transmissão, autores anteriores (BARBOSA *et al.*, 2014; TRIVEDI *et al.*, 2007) argumentaram que distâncias razoáveis podem ser consideradas válidas, desde que haja preservação da similaridade no comportamento do campo geomagnético nas regiões analisadas. Como exemplo, BARBOSA *et al.* (2014) utilizaram uma separação de aproximadamente 740 km entre o observatório magnético de Vassouras (VSS) e a linha de transmissão abordada em seu estudo (Itumbiara–São Simão), justificando tal escolha com base na coerência do comportamento regional do campo geomagnético durante eventos de tempestades.

4.4 Processamento dos dados

Esta pesquisa de dissertação adotou a manipulação de dados elétricos e magnéticos. Nesta etapa, foi realizada a implementação dos códigos computacionais responsáveis pelo tratamento e pela análise dos dados sob uso. Para isso, utilizou-se a linguagem Python, por sua ampla aplicação em projetos científicos e pela disponibilidade de bibliotecas específicas para manipulação de dados, como Pandas, NumPy e Matplotlib. Em formato `.csv`, os dados foram tratados com o objetivo de se adequar aos padrões da linguagem de programação em questão (ajustes de pontos, espaços e vírgulas). Esse procedimento é muito importante pois garante a segurança e a integridade estatística dos resultados. Para esclarecer o tratamento aplicado a cada conjunto de dados, propõe-se a seguinte separação:

- Dados elétricos: realizou-se um ajuste no vetor temporal dos dados elétricos,

uma vez que estes foram fornecidos ao autor desta dissertação no horário local de Brasília, que apresenta um deslocamento de 3 horas a menos em relação ao Tempo Universal Coordenado (do inglês, Coordinated Universal Time, UTC). Após a realização desse ajuste, as séries temporais dos valores de corrente e voltagem das linhas de transmissão puderam ser corretamente alinhadas e exibidas. Dessa forma, foi possível realizar a análise integrada dos dados elétricos e magnéticos, a qual será detalhada posteriormente no capítulo de Metodologia.

- Dados magnéticos: estes já são obtidos com alta qualidade e organização. seu fácil acesso possibilita a rápida extração e leitura dos dados. Foram utilizadas duas fontes para a aquisição desses dados: A rede global de observatórios magnéticos, INTERMAGNET; e a rede brasileira de Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial, EMBRACE.

Os dados foram importados em formato `.csv`, por meio do comando `pd.read_csv()`. Aqui, foi necessário elaborar um comando que possibilitasse a leitura específica do dado em questão. Por exemplo, ler apenas a coluna em que estão os valores da componente horizontal (H) do campo geomagnético. Com isso, o custo de tempo e operação computacional tem suas exigências diminuídas. Após isso, o procedimento metodológico é aplicado e posteriormente exibido em figuras com o auxílio do comando `plt.show()` da biblioteca Matplotlib. O rigor dos procedimentos computacionais foi intensificado, com cada etapa do processamento sendo cuidadosamente inspecionada e validada, a fim de garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Capítulo 5

Metodologia

A medição e o monitoramento de correntes induzidas geomagneticamente (GICs) têm sido tradicionalmente conduzidos por meio de diferentes métodos instrumentais e modelagens. Um dos enfoques mais recorrentes na literatura envolve a instalação de sensores do tipo Hall diretamente no ponto neutro aterrado de transformadores de alta voltagem; assim como a instalação de um magnetômetro próximo e longe das linhas de transmissão (forma indireta), permitindo o monitoramento da presença de GICs na rede elétrica (KOEN e GAUNT, 2003; NGWIRA et al., 2013; TRIVEDI et al., 2007). Outra abordagem amplamente empregada baseia-se na modelagem geoeletrica combinada com dados de variação do campo magnético, dB/dt , para estimar campos elétricos induzidos, somando-se à aplicação das leis de Ohm e de Kirchhoff, de forma que já se pressupõe que os campos geoeletricos atuem como uma fonte de força eletromotriz externa na rede de energia (BARBOSA et al., 2014; ESPINOSA et al., 2023; VILJANEN e PIRJOLA, 1994).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma abordagem inédita ao empregar dados reais de corrente e voltagem de linhas de transmissão de energia, contribuindo de forma inovadora para os estudos de GICs em âmbito nacional e internacional. Essa metodologia permite estimar relações entre as variáveis estatisticamente durante eventos geomagnéticos intensos, reduzindo a dependência de modelagens complexas e oferecendo uma alternativa prática aos operadores. A continuidade dessa abordagem mostra-se especialmente relevante, uma vez que os resultados apresentados neste trabalho são preliminares. Assim, investigações futuras poderão proporcionar uma análise mais robusta e conferir maior confiabilidade à aplicação do método, cujo detalhamento é descrito na Seção 5.2. A seguir, é realizada a descrição das duas metodologias adotadas neste trabalho, a começar pela derivada da componente Horizontal do campo geomagnético.

5.1 Derivada temporal da componente H

Durante períodos de intensa atividade geomagnética, distúrbios abruptos nos sistemas de correntes ionosféricas —frequentemente desencadeados por impactos de CMEs na magnetosfera terrestre —podem ser monitorados por meio de medições em solo da variação da componente H em observatórios magnéticos (RUSSELL, 2001).

Para avaliar a amplitude das variações geomagnéticas nas proximidades das LTs, foi calculada a derivada ordinária temporal da componente horizontal do campo geomagnético ($d\mathbf{H}/dt$), conforme expresso na Eq. (5.1). Esse parâmetro é amplamente reconhecido como um indicador indireto para avaliar o potencial de ocorrência de GICs (VILJANEN *et al.*, 2001).

Em regiões de alta latitude, valores de $d\mathbf{H}/dt$ superiores a 30 nT/min podem ser considerados indicativos de possível atividade de GICs (KASRAN *et al.*, 2018b; MOHD ANUAR *et al.*, 2019). No entanto, tais limiares também podem ser alcançados em latitudes mais baixas, dependendo da intensidade das perturbações geomagnéticas. Por exemplo, BARBOSA *et al.* (2014) registraram amplitudes da componente X do campo geomagnético (onde, $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$) superiores a 40 nT/min no observatório magnético de Vassouras, em latitude média, durante a tempestade geomagnética de 7 a 10 de novembro de 2004 ($Dst \sim -370$ nT). Considerando que GICs com altas amplitudes estão, geralmente, correlacionados com altos valores de $d\mathbf{H}/dt$, a quantificação desse parâmetro em regiões de baixa latitude torna-se especialmente relevante. Embora grandes valores de $d\mathbf{H}/dt$ sejam mais frequentemente observados em altas latitudes, principalmente associados a correntes ionosféricas relacionadas à aurora e a subtempestades, sua ocorrência próxima ao equador magnético merece atenção especial, em razão da possível modulação dessas variações pelo EEJ.

$$\frac{dH}{dt}(t) \approx \frac{H(t + \Delta t) - H(t - \Delta t)}{2 \Delta t} \quad (5.1)$$

onde $\Delta t = 1$ minuto de taxa de amostragem.

Estudos recentes (CARTER *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2024) destacam o papel significativo do EEJ na modulação das variações do campo magnético em latitudes baixas e equatoriais. Esses achados levantam questões importantes quanto à suscetibilidade de linhas de transmissão de energia à geração de GICs em regiões próximas ao equador magnético (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Portanto, com base nos pressupostos estabelecidos por pesquisas anteriores, este trabalho utilizou essa ferramenta para estimar as induções de GICs nas regiões abrangidas pelos observatórios magnéticos considerados.

5.2 Correlação de Pearson

Para quantificar associações entre as variáveis elétricas e magnéticas, adotou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), uma ferramenta estatística amplamente empregada em diversas áreas do conhecimento devido à sua simplicidade operacional e aplicabilidade em dados temporais. Essa técnica permite avaliar a existência de relações lineares entre duas variáveis e tem sido utilizada na área de Clima Espacial, como por exemplo, na associação entre parâmetros do vento solar (ex.: pressão dinâmica) e a variação magnética na superfície terrestre (SILVA *et al.*, 2024), ou entre parâmetros solares e índices geomagnéticos (MITEVA *et al.*, 2023).

Neste trabalho, a correlação de Pearson foi utilizada conforme definido na Eq. (5.2), com o objetivo de mensurar o grau de associação linear entre os dados magnéticos e elétricos. A componente H do campo geomagnético foi considerada como a variável x , enquanto os parâmetros elétricos das LTs, corrente ou voltagem, foram tratados como a variável y . Essa atribuição é arbitrária, uma vez que o coeficiente de Pearson é simétrico.

O coeficiente r obtido varia entre -1 e 1, onde valores próximos de ± 1 indicam correlação linear perfeita, e valores próximos de 0 apontam ausência de relação linear (DUARTE *et al.*, 2019; SCHOBER *et al.*, 2018). Assim, a análise realizada permite identificar padrões estatísticos relevantes entre os sinais magnéticos e elétricos e, dessa forma, possibilitar a identificação de possíveis correspondências entre as séries temporais analisadas. A utilização desse método estatístico, neste trabalho, consiste, também, em contribuir para reforçar os pressupostos sobre a ocorrência de GICs em cenários caracterizados por elevados valores de $d\mathbf{H}dt$. A correlação de Pearson é a covariância (σ_{xy}) dividida pelo produto dos desvios padrão ($\sigma_x\sigma_y$) das variáveis x e y (WILCOX, 2003). Em definição, temos:

$$r_{x,y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.2)$$

As análises de correlação foram realizadas em dois intervalos distintos da tempestade geomagnética de 10–11 de maio de 2024:

- Fases inicial e principal: Este período corresponde ao primeiro intervalo destacado nas Figuras 5.1 e 5.2 (em amarelo). Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados separadamente entre os dados magnéticos (componente H) e cada parâmetro elétrico (corrente e voltagem), abrangendo o intervalo desde a SSC, em 10 de maio às 17:05 UTC, até o momento em que a

componente H do campo geomagnético atingiu seu valor mínimo, 10 de maio às 22:55 UTC.

- Fase de recuperação: Esta corresponde ao segundo período analisado nas Figuras 5.1 e 5.2 (em laranja claro). O mesmo procedimento descrito acima foi aplicado durante a fase de recuperação da tempestade, compreendendo o intervalo de 10 de maio às 23:00 UTC até 11 de maio às 23:55 UTC.

É importante observar que, para cada um dos períodos analisados, foram realizados dois procedimentos de correlação distintos para cada linha de transmissão: uma correlacionando a corrente com a componente H e outra correlacionando a voltagem com a componente H . Para as séries temporais dos dados elétricos (Figura 5.2), os períodos analisados correspondem àqueles das séries temporais da tempestade geomagnética apresentadas na Figura 5.1, com intervalos idênticos destacados.

O mesmo procedimento descrito acima é realizado na análise envolvendo o período que escolhemos para fazer a comparação (período geomagneticamente moderado, 24 de março de 2024) entre os valores de r obtidos (capítulo 6.2.3), com a exceção de que nesta etapa posterior não há períodos seccionados dentro do intervalo analisado.

Cabe ressaltar que o coeficiente de correlação de Pearson r indica apenas o grau de associação linear entre duas variáveis, não estabelecendo relações de causalidade direta. Assim, ainda que valores elevados de r possam sugerir forte dependência estatística entre parâmetros magnéticos e elétricos, esses resultados devem ser interpretados como indícios preliminares, necessitando de análises complementares para confirmação.

5.2.1 Períodos analisados na correlação de Pearson

Ressalta-se, neste ponto, que a taxa de amostragem dos dados elétricos (5 minutos) pode suavizar variações rápidas das grandezas Voltagem e Corrente, limitando a detecção de oscilações de curta duração. Essa restrição deve ser considerada na interpretação dos resultados.

Período com tempestade (10–11 de maio de 2024)

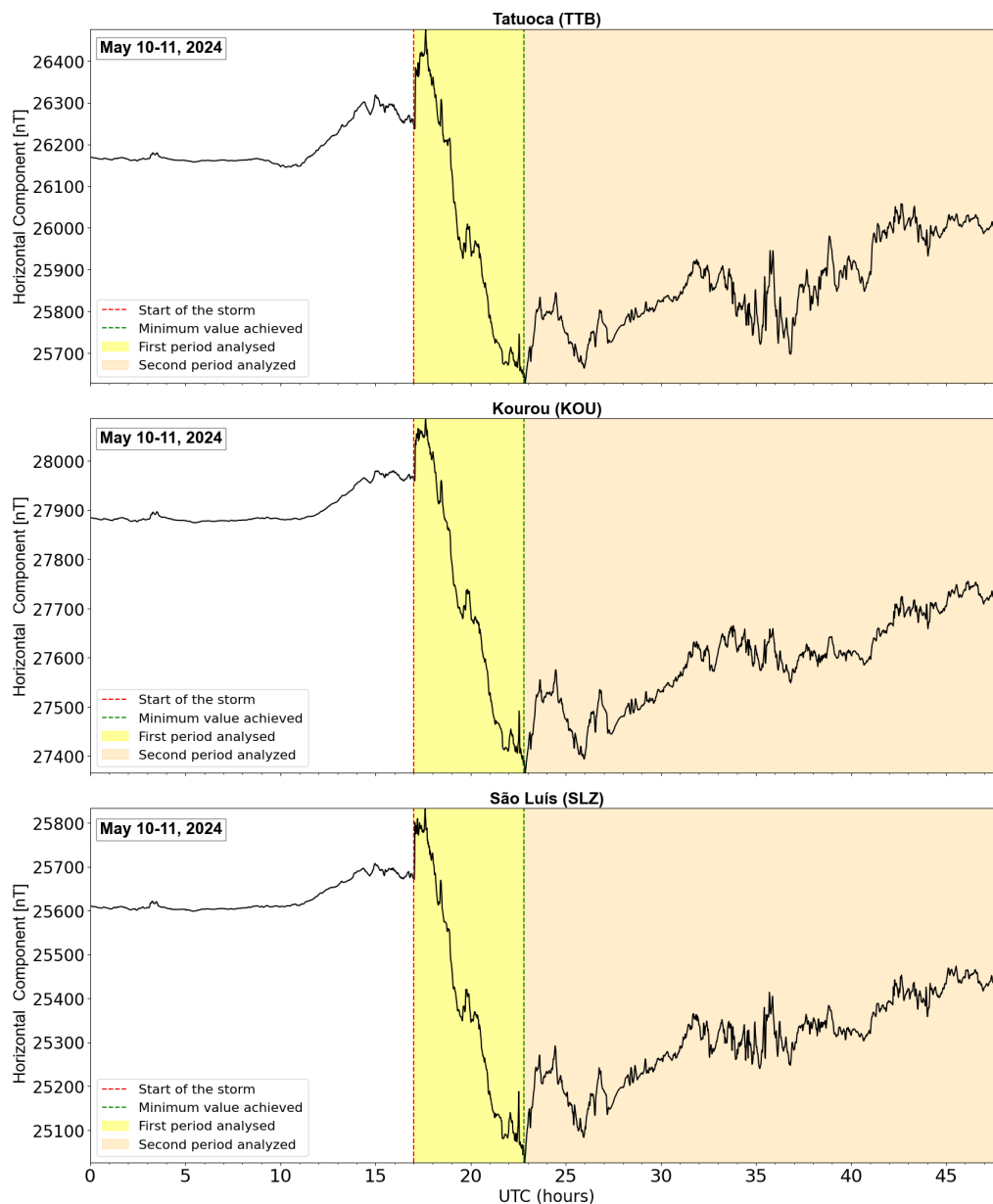


Figura 5.1: Séries temporais da componente horizontal da tempestade geomagnética de 10 a 11 de maio de 2024 para os observatórios magnéticos de TTB, KOU e SLZ. As áreas destacadas correspondem ao primeiro e ao segundo períodos, respectivamente, de análise na etapa de correlação entre os dados magnéticos e elétricos. (Imagem gerada pelo autor).

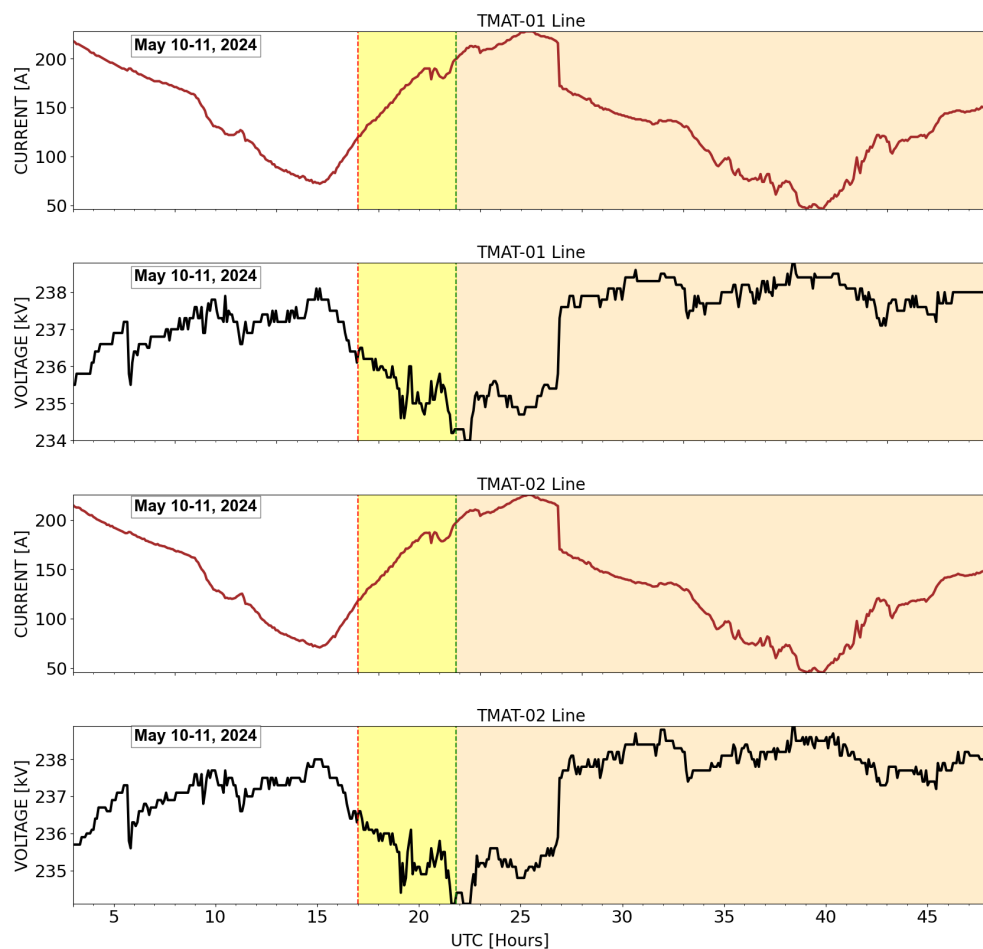


Figura 5.2: Séries temporais dos valores de corrente e tensão, durante os dias 10 e 11 de maio de 2024, das linhas de transmissão de energia TMAT-01 e TMAT-02. As áreas destacadas correspondem ao mesmo período assinalado na Figura 5.1. (Imagem gerada pelo autor).

Período geomagneticamente moderado (24 de março de 2024)

A série temporal para o período sem tempestade, o qual será analisado para fins comparativos, é apresentada na figura 5.3 a seguir:

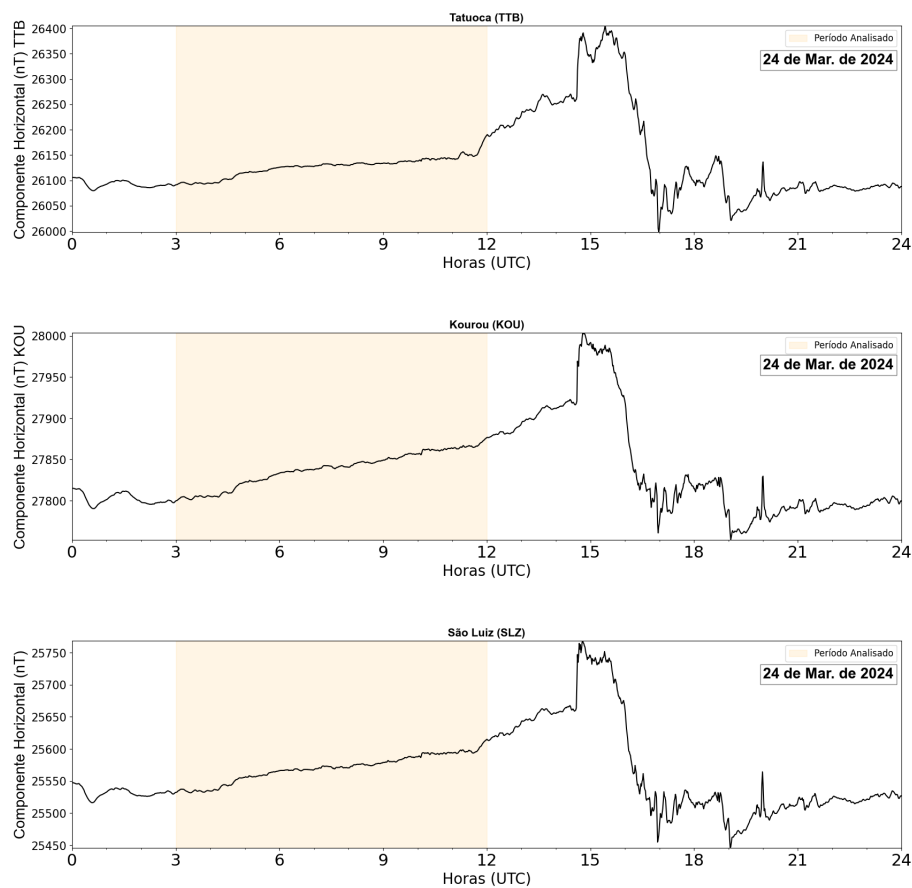


Figura 5.3: Intervalo de atividade geomagnética moderada, definido para fins de comparação com o período de tempestade. (Imagem gerada pelo autor).

Da mesma maneira, a série temporal dos valores de corrente e voltagem que foi utilizada no período comparativo, sem tempestade, é apresentada na figura a seguir:

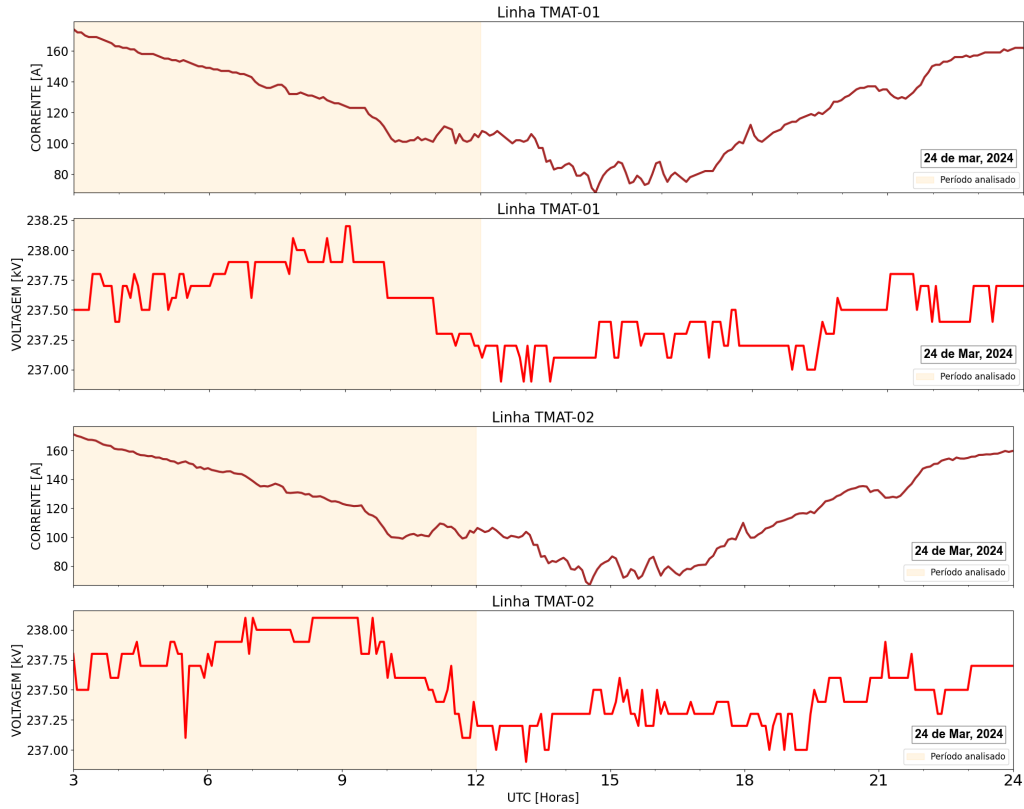


Figura 5.4: Intervalo seccionado dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, adotado para fins comparativos com o período de tempestade. (Imagem gerada pelo autor).

Para facilitar a compreensão da sequência de etapas empregadas neste estudo, elaborou-se o fluxograma 5.5. Nele, observa-se o percurso desde a aquisição dos dados magnéticos e elétricos até o pré-processamento necessário para sincronização temporal e reamostragem. Em seguida, destacam-se a construção das variáveis de interesse, com o cálculo de $d\mathbf{H}/dt$, e a etapa de visualização e síntese das séries e das correlações.

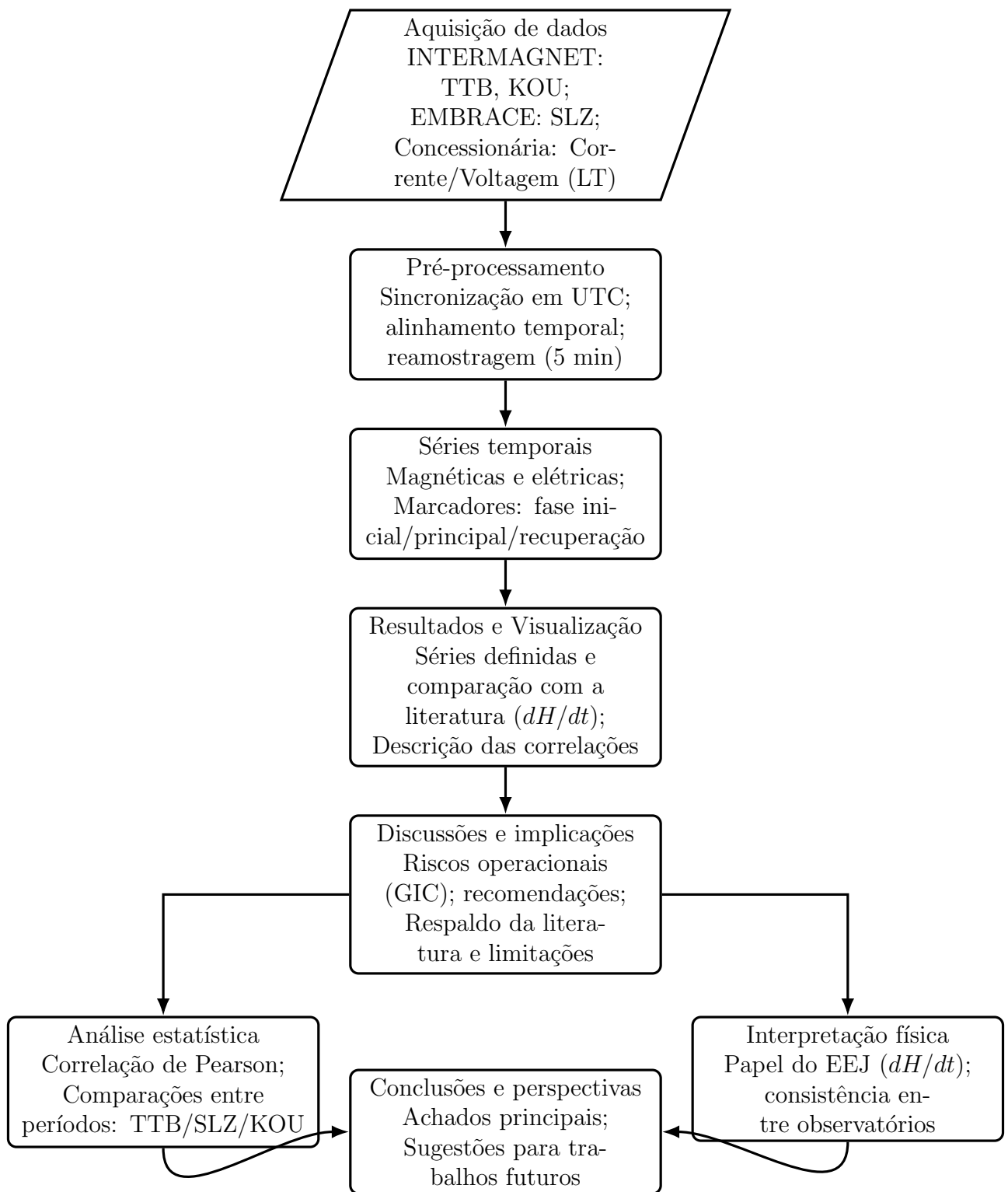


Figura 5.5: Fluxograma metodológico: do acesso às séries (H , corrente/voltagem) e pré-processamento à construção de variáveis; bifurcação em análise estatística e interpretação física, convergindo para conclusões e perspectivas. (Fluxograma gerado pelo autor).

Capítulo 6

Resultados

6.1 Derivada temporal $d\mathbf{H}/dt$

Para identificar possíveis ocorrências de GICs, adotou-se um valor liminar de 30 nT/min para a derivada temporal da componente horizontal do campo geomagnético, ($d\mathbf{H}/dt$), conforme sugerido em prévias pesquisas (KASRAN et al., 2018b; MOHD ANUAR et al., 2019). Todos os observatórios registraram um pico característico de $d\mathbf{H}/dt$ coincidente com o SSC às 17:05 UTC do dia 10 de maio, desencadeado pela chegada da primeira CME à Terra. Especificamente, observou-se que os observatórios de TTB e SLZ (os mais próximos do EEJ) registraram amplitudes superiores a 65 nT/min (figura 6.1, subfiguras superior e inferior, respectivamente), enquanto KOU (mais distante do EEJ) apresentou uma amplitude máxima inferior a 40 nT/min (figura 6.1, subfigura central). Apesar das diferenças de amplitude, todas as estações magnéticas exibiram padrões temporais semelhantes.

Diante dessas observações, e considerando o uso estabelecido de $d\mathbf{H}/dt$ como um indicador (proxy) para atividade de GICs, é razoável inferir a indução de GICs durante o período analisado. Essa inferência é reforçada por estudos que indicam que valores de $d\mathbf{H}/dt$ superiores a 30 nT/min estão associados ao aumento da atividade de GICs, mesmo em baixas latitudes (KASRAN et al., 2018b; MOHD ANUAR et al., 2019).

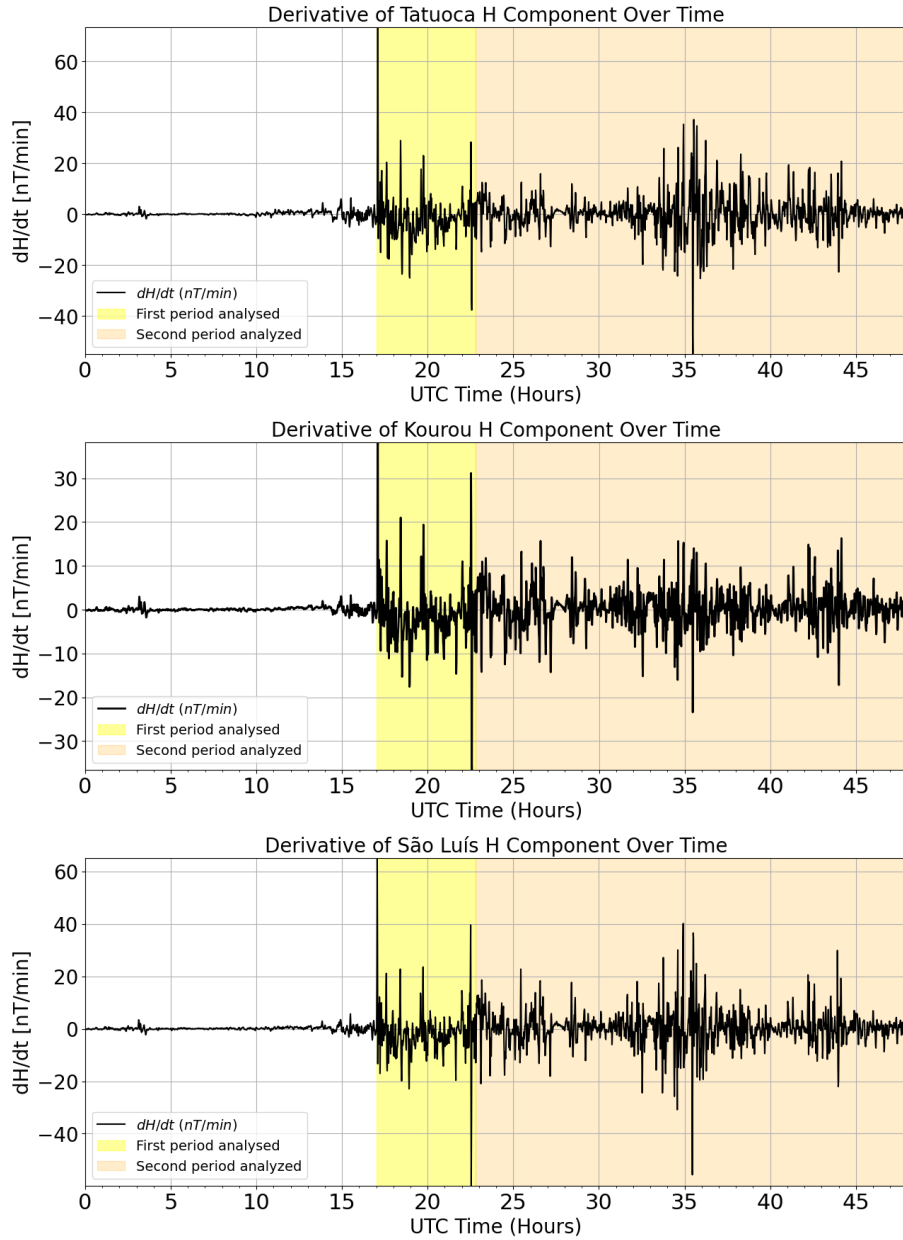


Figura 6.1: Derivada temporal da componente H do campo geomagnético registrada em cada observatório ao longo dos dias 10 e 11 de maio de 2024. As áreas em destaque referem-se aos mesmos intervalos analisados nas Figuras 5.1 e 5.2. (Imagem gerada pelo autor).

6.2 Correlações

Conforme mencionado anteriormente, os dados elétricos foram obtidos em intervalos de 5 minutos. Portanto, a série temporal da componente H foi reamostrada para a mesma resolução de 5 minutos, a fim de garantir consistência nesta etapa da análise.

6.2.1 Primeiro período de análise

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi calculado para dois intervalos distintos. O primeiro corresponde ao início da tempestade geomagnética, às 17:05 UTC, abrangendo integralmente as fases inicial e principal, e se estendendo até o início da fase de recuperação (instante em que o valor de H chega ao seu mínimo). Esse intervalo termina às 22:55 UTC do dia 10 de maio. Os resultados da correlação para esse primeiro período são apresentados nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4, correspondentes aos observatórios de TTB, KOU e SLZ, respectivamente.

Todos os coeficientes de correlação de Pearson (r) foram interpretados de acordo com a classificação de intensidade proposta por SCHÖBER *et al.* (2018). Entre as correlações mais fortes, os valores de r entre a componente H e a corrente variaram de -0.95 (figuras 6.3A/C e 6.4A/C) a -0.94 (figuras 6.2A e 6.2C), indicando uma correlação negativa muito forte. Notavelmente, as correlações entre a componente H e a corrente para os observatórios magnéticos de SLZ e KOU atingiram valores máximos idênticos de $r = -0.95$. Em contraste, as correlações entre a componente H e a voltagem, embora com sinal oposto, também apresentaram correlações fortes, com valores positivos de r variando entre 0.82 a 0.84. A mais forte dessas correlações foi observada no observatório de SLZ, com $r = 0.84$ (Figura 6.4D), indicando uma forte correlação positiva entre a voltagem e a componente H do campo geomagnético.

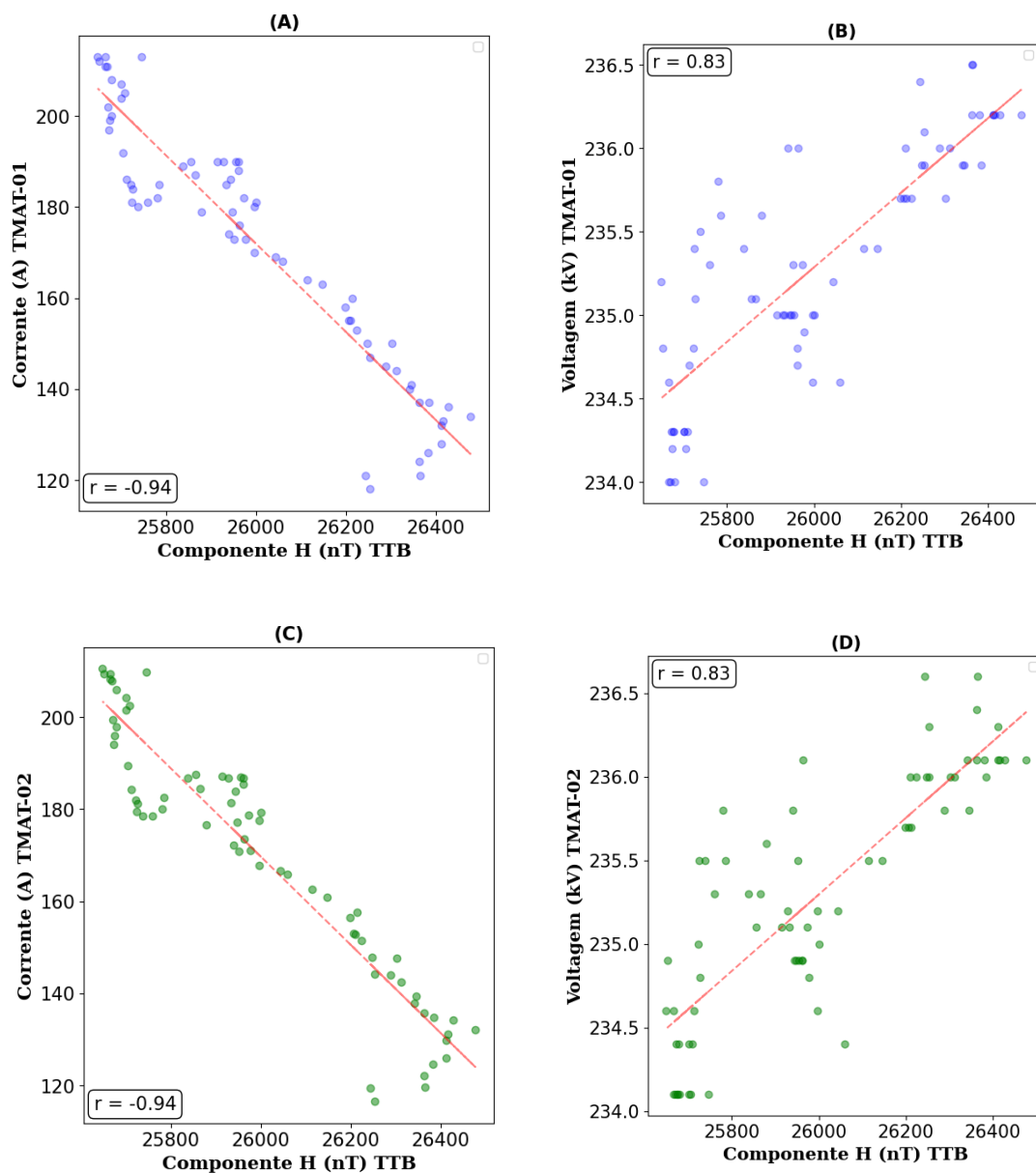


Figura 6.2: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (TTB) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (TTB) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

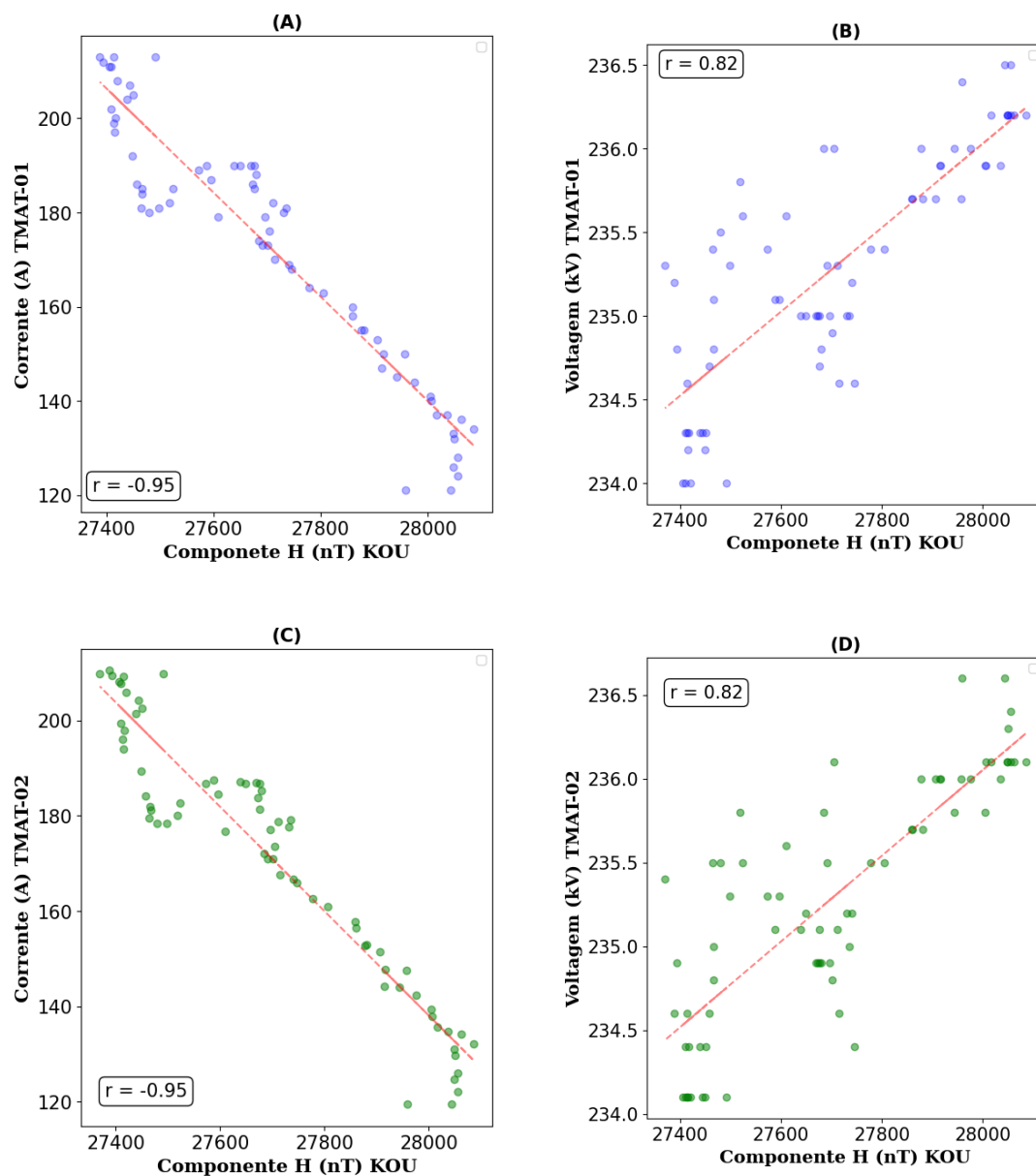


Figura 6.3: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (KOU) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (KOU) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

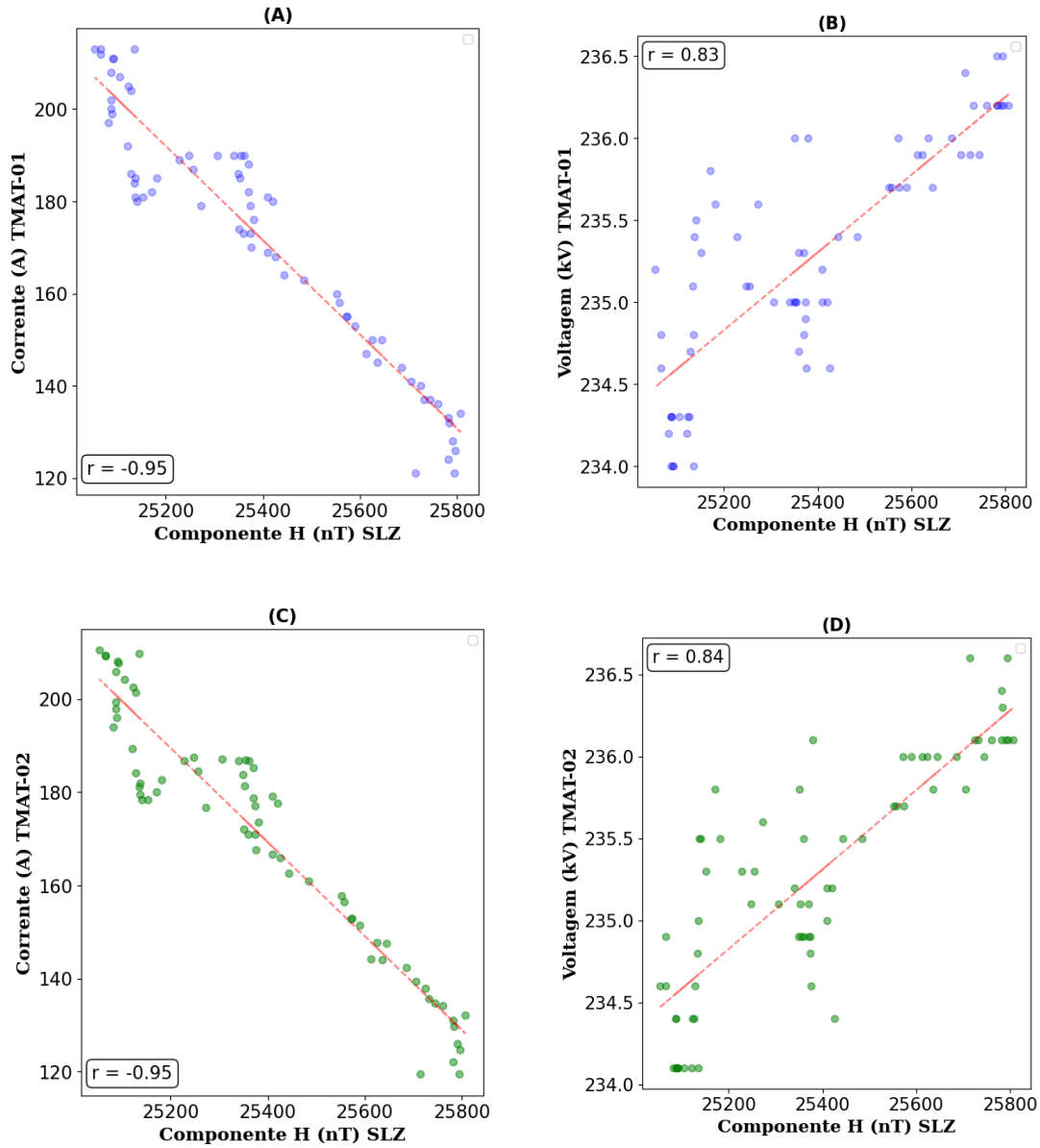


Figura 6.4: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (SLZ) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (SLZ) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

6.2.2 Segundo período de análise

O segundo período de análise corresponde integralmente à fase de recuperação da tempestade geomagnética, estendendo-se das 23:00 UTC de 10 de maio até as 23:55 UTC de 11 de maio. Os resultados da correlação para esse intervalo são apresentados nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7, correspondentes, respectivamente, aos observatórios de TTB, KOU e SLZ. Em comparação com o primeiro período de análise, os valores do coeficiente de correlação de Pearson (r) durante a fase de recuperação apresen-

taram uma queda significativa, indicando associações estatísticas mais fracas. De acordo com a classificação proposta por SCHÖBER *et al.* (2018), as correlações correspondem ao intervalo de fracas ($r = 0.10$ – 0.39) e moderadas ($r = 0.40$ – 0.69).

A correlação mais forte entre a componente H e a corrente foi observada no observatório de SLZ, onde ambas as LTs apresentaram correlações negativas moderadas de $r = -0.55$ (Figuras 6.7A e 6.7C). Em contraste, a correlação mais fraca foi registrada entre a componente H , em TTB, e a corrente medida na linha TMat-01, com $r = -0.39$ (Figura 6.5A), sendo classificada como fraca. No que diz respeito à relação entre a componente H e a voltagem, a maior correlação positiva também foi observada no observatório de SLZ, para a linha TMat-01, com $r = 0.55$ (Figura 6.7B), indicando uma associação positiva moderada. A menor correlação de voltagem foi registrada em TTB, para a linha TMat-02, com $r = 0.43$ (Figura 6.5D), valor que ainda se enquadra na faixa de correlação moderada.

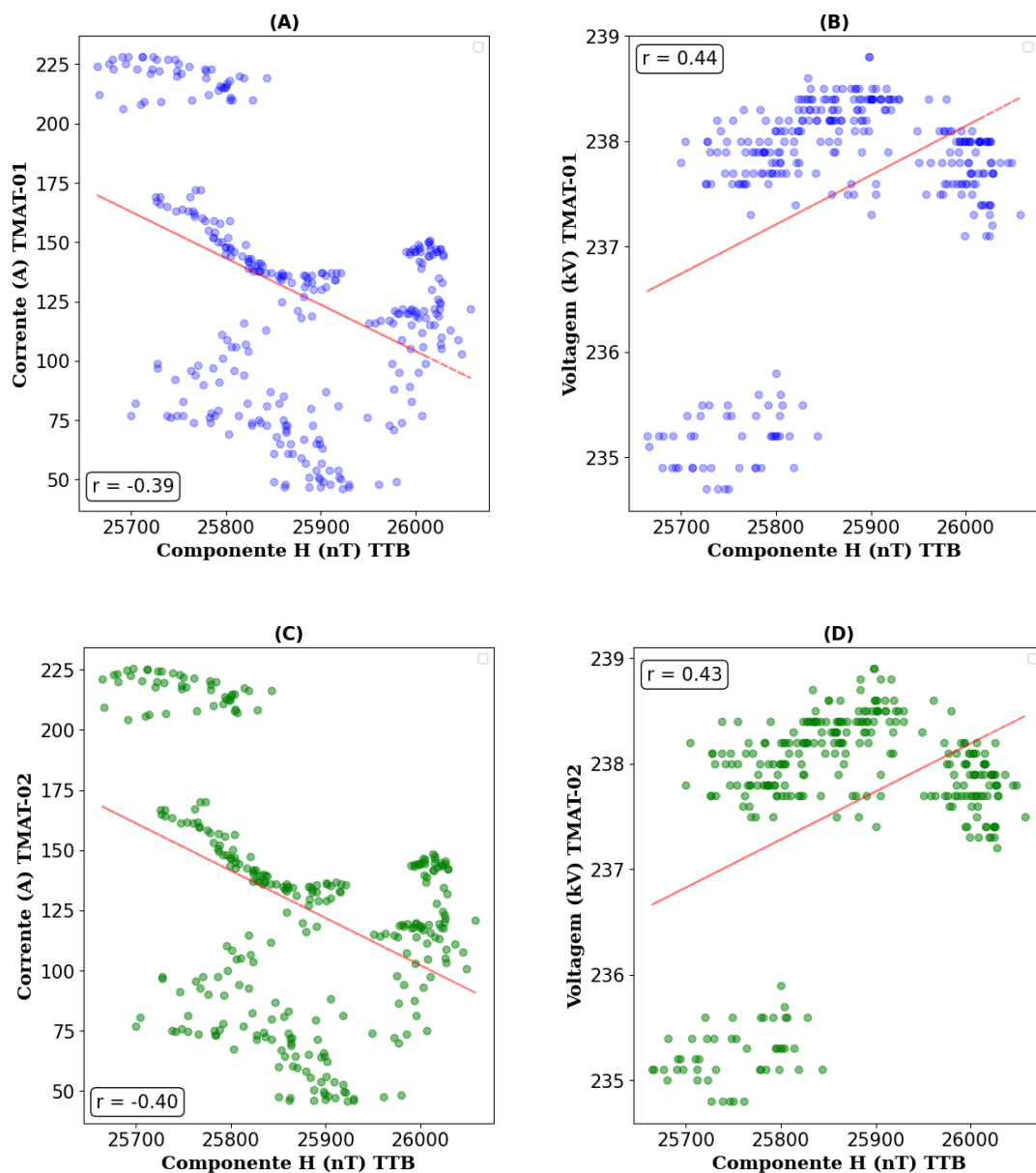


Figura 6.5: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (TTB) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (TTB) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

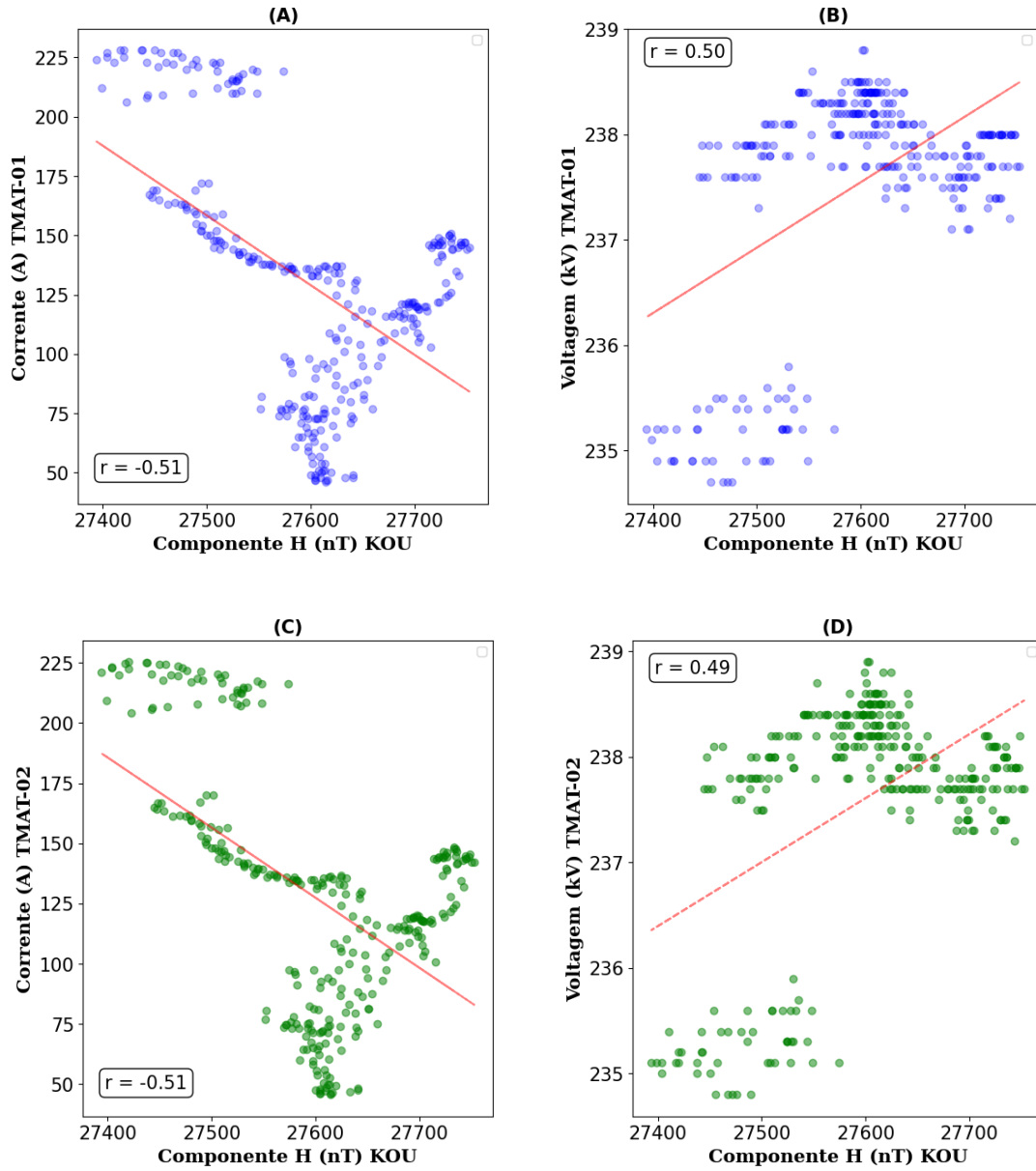


Figura 6.6: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (KOU) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (KOU) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

Os coeficientes de correlação (r) entre os parâmetros elétricos e magnéticos registrados no observatório de Kourou (KOU) apresentaram valores altamente consistentes para ambas as LTs. Especificamente, foi observada uma correlação negativa moderada entre a corrente elétrica e a componente H do campo geomagnético, com $r = -0.51$. Quanto à relação entre a voltagem e a componente H , foram identificadas correlações positivas de magnitude semelhante: $r = 0.50$ para a linha TMA-01 e $r = 0.49$ para a linha TMA-02 (ver figura 6.6).

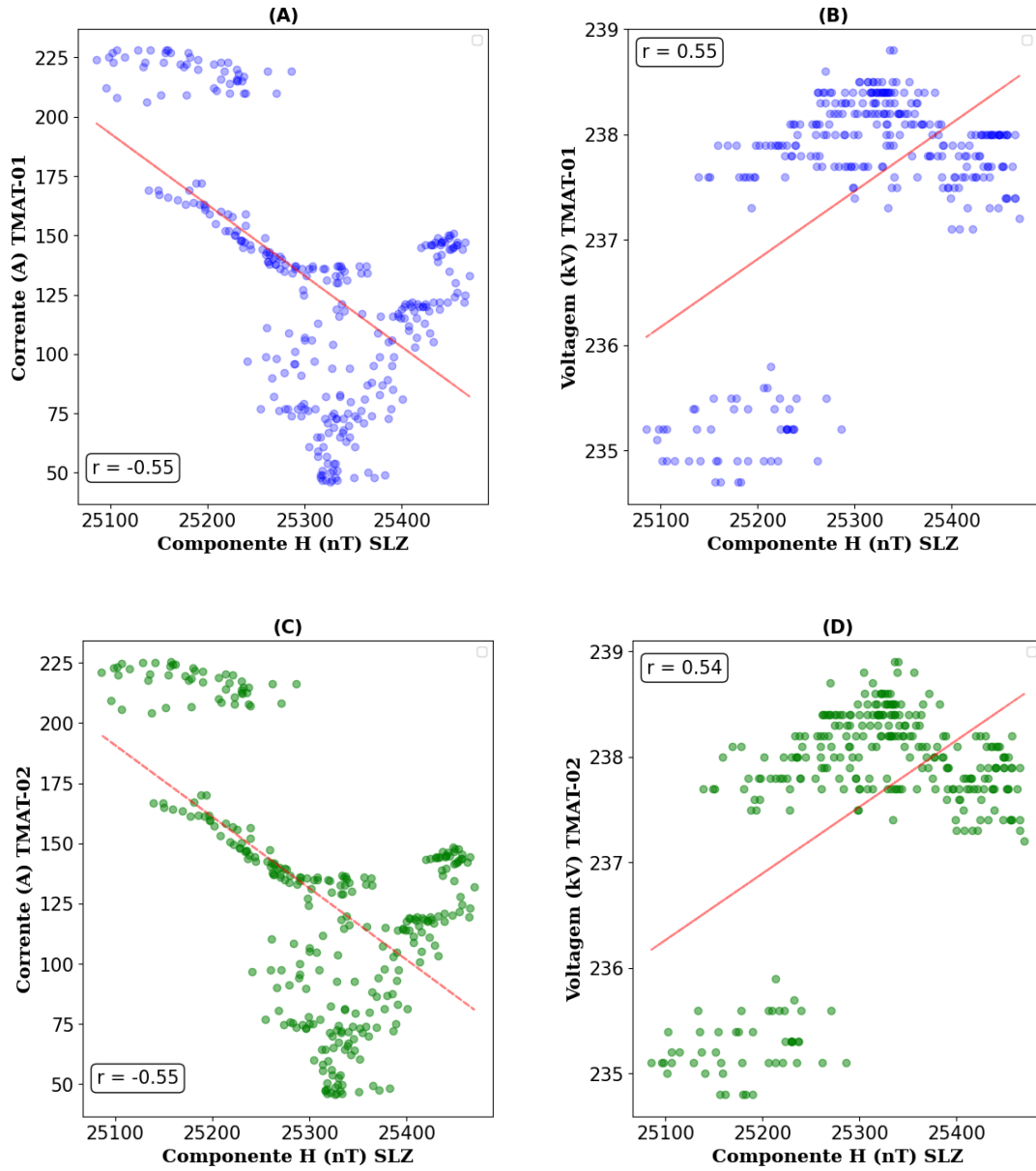


Figura 6.7: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (SLZ) $\times$ Corrente (A e C); componente H (SLZ) $\times$ Voltagem (B e D), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

6.2.3 Comparação com período geomagneticamente moderado

Nesta etapa da análise, as correlações entre as variáveis sofreram uma mudança bastante significativa. O coeficiente de correlação entre a componente H , em TTB, e corrente da linha TMA-01 teve um valor negativo de $r = -0.91$ enquanto que a correlação entre componente H e voltagem teve um valor negativo de $r = -0.12$ (figura 6.8A e 6.8B, respectivamente). Já o valor de r obtido entre a componente

H , em TTB, e corrente, para a linha TMAT-02, também foi de $r = -0.91$, enquanto que o valor de r entre componente H e voltagem foi de $r = -0.14$ (figura 6.8C e 6.8D, respectivamente).

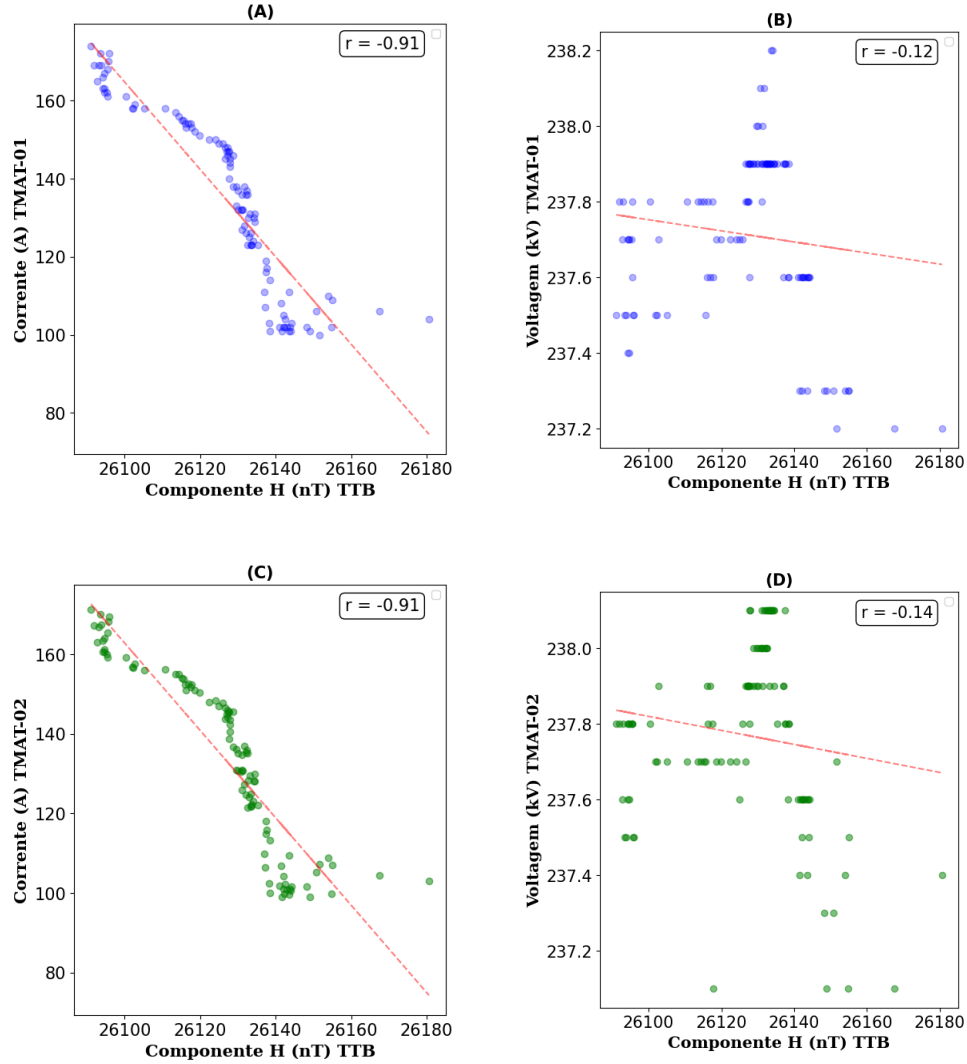


Figura 6.8: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (TTB) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (TTB) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

Da mesma maneira, o valor de r encontrado entre componente H , para KOU, e corrente, para a linha TMAT-01, teve um valor negativo de $r = -0.97$ (figura 6.9A). Já para componente H e voltagem, teve um valor também negativo de $r = -0.10$ (figura 6.9B). Por outro lado, o coeficiente de correlação entre a componente H e os parâmetros elétricos da linha de transmissão TMAT-02 teve, também, como resultado ambos negativos, como segue: $r = -0.97$ para a correlação entre componente H e corrente (figura 6.9C); e $r = -0.12$ para correlação entre componente H e voltagem

(Figura 6.9D).

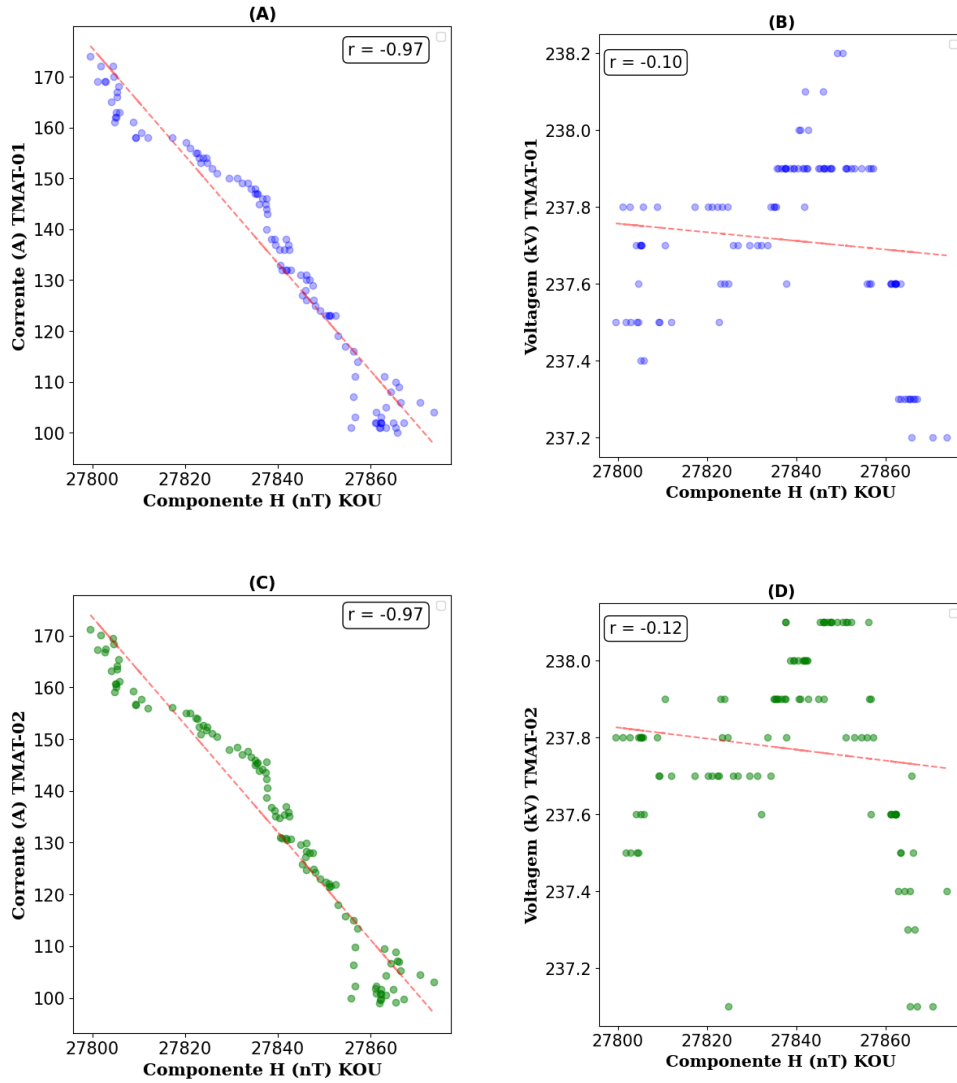


Figura 6.9: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (KOU) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (KOU) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

Em SLZ, os valores obtidos pelo coeficiente de correlação r também apresentaram valores negativos e comparáveis com os dois casos anteriores: entre componente H e corrente (para a linha TMAT-01), foi obtido $r = -0.96$ (figura 6.10A), e entre componente H e voltagem, obteve-se $r = -0.14$ (figura 6.10B). Para a linha TMAT-02, os obtidos entre componente H e corrente foi de $r = -0.96$ (figura 6.10C), e entre componente H e voltagem foi de $r = -0.16$ (figura 6.10D).

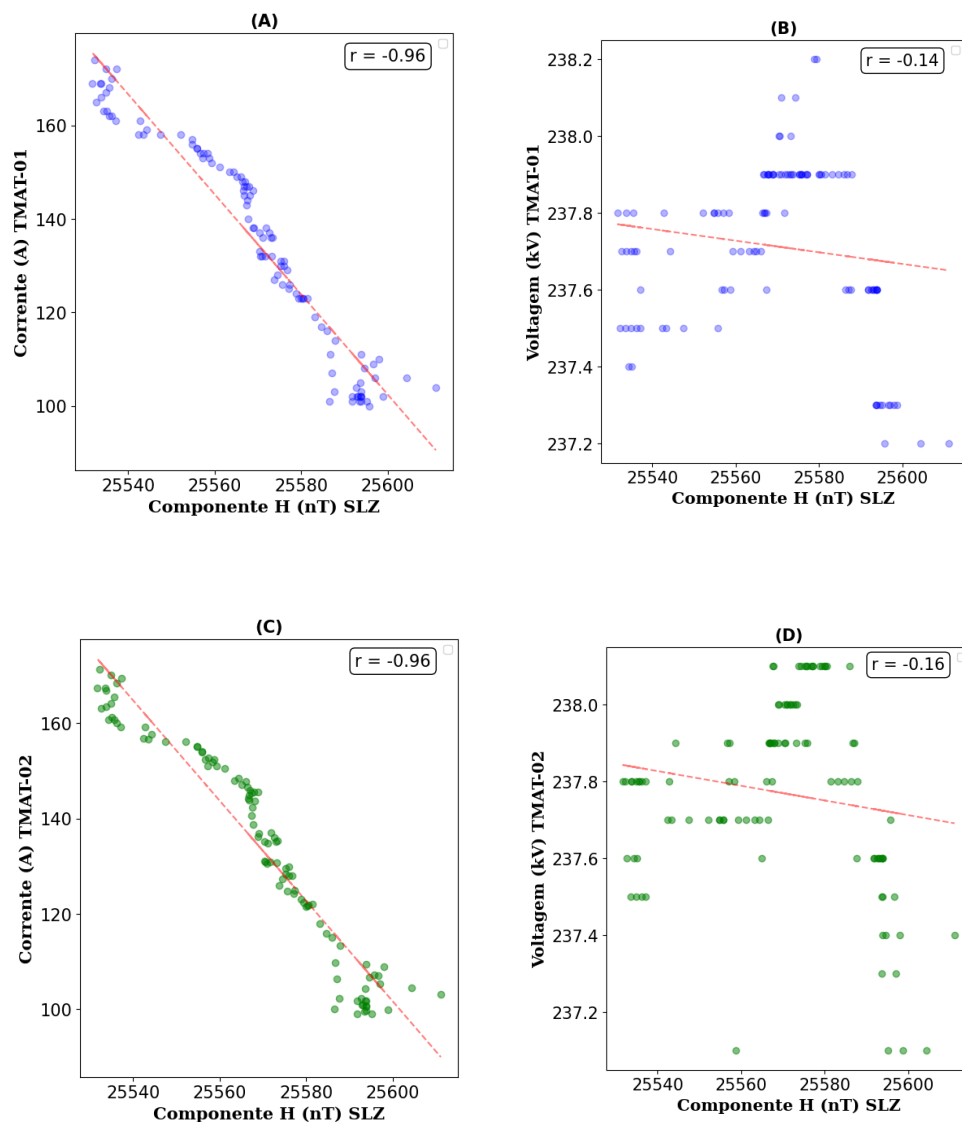


Figura 6.10: Análise de correlação de Pearson entre as variáveis: componente H (SLZ) $\times$ Corrente (**A** e **C**); componente H (SLZ) $\times$ Voltagem (**B** e **D**), para suas respectivas linhas de transmissão. A linha tracejada vermelha representa a linha de tendência. (Imagem gerada pelo autor).

Capítulo 7

Discussões

Neste estudo é apresentada uma análise da derivada temporal da componente horizontal do campo geomagnético ($d\mathbf{H}/dt$) em latitudes baixas e equatoriais, com o objetivo de avaliar o potencial de geração de GICs em regiões equatoriais próximas às LTs de energia analisadas. Subsequente a isso, procedeu-se a análise de correlação entre parâmetros magnéticos e elétricos em dois cenários distintos (períodos moderados e intensos), visando identificar possíveis relações entre as séries temporais da componente H (provenientes de cada observatório magnético) e as medições de corrente e voltagem das LTs, bem como comparar os dois cenários. Essas análises foram conduzidas no contexto da tempestade geomagnética de 10 a 11 de maio de 2024 (comumente referida como “Tempestade do Dia das Mães”) considerada até o momento o evento mais intenso do Ciclo Solar 25, apresentando um índice Kp máximo de 9 e um índice Dst mínimo de -412 nT; e durante um intervalo de tempo geomagneticamente moderado ($3.66 \leq Kp \leq 4.33$) do dia 24 de março de 2024.

Embora SLZ e KOU estejam localizados em regiões de baixa latitude (diferentemente de TTB, que se encontra na latitude equatorial e mais próximo das LTs), essa separação espacial não parece representar uma limitação relevante, visto que as séries temporais da tempestade geomagnética e os valores de $d\mathbf{H}/dt$ registrados nos três observatórios (KOU, TTB e SLZ) apresentam comportamento consistente e semelhante. Essa similaridade indica que o campo geomagnético na região de estudo pode ser considerado uniforme em relação às variações da componente horizontal (H). Assim, o uso desses observatórios revela-se uma abordagem razoável e adequada para a caracterização do ambiente geomagnético neste estudo.

Ainda que a investigação dos picos de $d\mathbf{H}/dt$ e sua relação com estimativas de GICs, assim como a análise de r , constitua o núcleo deste trabalho, uma interpretação abrangente também deve considerar fatores adicionais. Um aspecto crucial refere-se à localização geomagnética dos observatórios, uma vez que a intensidade das variações geomagnéticas é fortemente influenciada pela proximidade ao equador magnético. Estações situadas dentro ou próximas à região do EEJ são particu-

larmente sensíveis à dinâmica das correntes ionosféricas, o que pode amplificar as perturbações no campo geomagnético. Além disso, as características específicas da tempestade geomagnética analisada (10–11 de maio de 2024) também são relevantes. O evento em questão foi precedido por um SSC, fenômeno reconhecido por desempenhar um papel chave na indução de GICs em latitudes baixas e equatoriais. Tal relação já foi demonstrada em estudos anteriores (CARTER *et al.*, 2015; KAPPENMAN, 2003; ZHANG *et al.*, 2015), os quais dão respaldo à abordagem metodológica adotada nesta pesquisa e ressaltam a importância de se examinar os efeitos associados à SSC ao se avaliar a vulnerabilidade de sistemas elétricos em regiões de baixa e equatorial latitude.

7.1 Implicações dos Picos de $d\mathbf{H}/dt$

Os picos de $d\mathbf{H}/dt$ observados em todos os observatórios magnéticos analisados neste estudo ultrapassaram o limiar de 30 nT/min proposto por MOHD ANUAR *et al.* (2019) e KASRAN *et al.* (2018b), conforme ilustrado na Figura 6.1. Nossa análise baseia-se na premissa de que o EEJ pode amplificar as variações magnéticas durante tempestades geomagnéticas em regiões próximas ao equador magnético, aumentando, assim, a vulnerabilidade da infraestrutura de transmissão de energia nessas áreas à ocorrência de GICs (CARTER *et al.*, 2015). Em todos os observatórios, os maiores picos de $d\mathbf{H}/dt$ ocorreram imediatamente após o choque interplanetário associado ao SSC às 17:05 UTC do dia 10 de maio, em conformidade com os resultados de CARTER *et al.* (2015) e FIORI *et al.* (2014). Destaca-se que as fases inicial e principal da tempestade (das 17:05 até $\approx 22:00$ UTC) ocorreram, predominantemente, durante o horário diurno local ($LT = UTC - 3$) nos locais geográficos das LTs e dos observatórios SLZ, KOU e TTB (condições estas que favorecem uma maior condutividade ionosférica e intensificação da atividade do EEJ).

ROUT *et al.* (2025) relataram evidências claras de anomalias de ionização equatoriais durante a tempestade geomagnética de 10–11 de maio de 2024, incluindo uma intensificação pronunciada do EEJ registrada no Observatório de Jicamarca (11.95° S, 76.97° O; $MLAT = 0.6^\circ$ N), no setor sul-americano. Foi observada uma intensificação significativa do campo magnético associada ao EEJ, com pico em ~ 275 nT às 17:40 UTC —cerca de 35 minutos após o SSC. Esse resultado indica que, durante o evento, o EEJ respondeu de forma dinâmica às perturbações ionosféricas/magnetosféricas, de modo potencialmente contributivo para riscos de GICs em regiões próximas ao equador magnético.

Os valores de $d\mathbf{H}/dt$ reportados neste estudo reforçam ainda mais o risco potencial de ocorrência de GICs em regiões de baixa e equatorial latitude (como aquelas onde se localizam as LTs, analisadas), uma vez que são comparáveis aos valores

documentados em estudos anteriores. BARBOSA *et al.* (2014) identificaram picos de $d\mathbf{B}_x/dt$ (por questões de notação, $B_x = X$) superiores a 100 nT/min durante a tempestade magnética ocorrida entre 29 de outubro e 1º de novembro de 2003 (conhecida como “Halloween geomagnetic storm”), com as maiores variações do campo magnético coincidindo com os picos de GICs modelados em uma linha de transmissão de baixa latitude. Ainda neste último trabalho, foram reportados valores $> |45 \text{ nT/min}|$ durante a tempestade ocorrida entre os dias 7 e 10 de novembro de 2004.

Conforme esperado, devido à influência do EEJ, os maiores valores de $d\mathbf{H}/dt$ neste estudo foram registrados em TTB, o observatório mais próximo do equador magnético. Esse resultado está em consonância com as observações de ABD LATIFF e JUSOH (2021), que apontaram que os valores médios de $d\mathbf{H}/dt$ tendem a aumentar à medida que a latitude magnética se aproxima do equador magnético.

Notavelmente, o pico de $d\mathbf{H}/dt$ registrado em SLZ atingiu aproximadamente 66 nT/min, uma magnitude comparável aos 73 nT/min (figura 6.1) observados em TTB. Considerando a posição de SLZ mais ao sul do equador magnético, seriam esperados valores de $d\mathbf{H}/dt$ mais baixos. No entanto, essa aparente anomalia pode ser explicada pelas constatações de RIGOTI *et al.* (1999), que analisaram a morfologia do EEJ com base em dados de uma rede de 29 magnetômetros distribuídos pelo norte e nordeste do Brasil. O estudo revelou que o centro do EEJ encontra-se, em média, deslocado cerca de 21 km ao sul do equador magnético, com deslocamentos ocasionais de até 62 km nesta direção. Esse deslocamento para o sul pode justificar os valores elevados de $d\mathbf{H}/dt$ registrados em SLZ, apesar de sua latitude magnética relativamente mais elevada em comparação a TTB. Em contraste, o observatório de KOU, localizado mais afastado do centro do EEJ, registrou valores máximos de $d\mathbf{H}/dt$ em torno de 38 nT/min (significativamente inferiores aos observados em TTB e SLZ). Isso corrobora a interpretação de que a proximidade ao EEJ exerce forte influência sobre a intensidade das variações geomagnéticas em regiões equatoriais.

É razoável estimar que valores de $d\mathbf{H}/dt$ superiores a $|60 \text{ nT/min}|$ podem implicar indução de GICs em LTs de energia, visto que estes valores se assemelham a valores alcançados em trabalhos prévios (BARBOSA *et al.*, 2014). DIVETT *et al.* (2018) modelaram GICs para uma rede de transformadores de uma ilha ao sul da Nova Zelândia, onde o valor liminar de 50 nT/min foi utilizado para representar a variação do campo magnético (dB/dt) na região estudada. Adicionalmente, essas estimativas não se limitam apenas ao primeiro período analisado, picos de $d\mathbf{H}/dt$ superiores a $|54 \text{ nT/min}|$ ainda foram registrados nos observatórios TTB e SLZ (figura 6.1) durante o segundo período analisado. Esses valores, por si só, já poderiam indicar condições favoráveis à indução de GICs. No entanto, afirmar a ocorrência de GICs nos transformadores das LTs analisadas, neste estudo, extrapola o escopo

da investigação, a qual se concentra na análise dos resultados obtidos a partir dos métodos empregados e da literatura e dados disponíveis. A confirmação mais robusta da presença de GICs nessas linhas exigiria a consideração de parâmetros adicionais comumente utilizados na área, como, por exemplo, a estrutura de resistividade do solo e a configuração específica da malha elétrica analisada (MCKAY e WHALER, 2006; PIRJOLA, 2002; PULKKINEN *et al.*, 2013).

Os resultados reforçam o papel modulador do EEJ sobre as variações geomagnéticas em latitudes baixas e equatoriais. Essa influência é particularmente notável em TTB e SLZ, que apresentaram magnitudes de $d\mathbf{H}/dt$ comparáveis ou superiores às reportadas em estudos de latitudes baixas e médias, confirmando que a proximidade ao EEJ pode amplificar significativamente os efeitos de tempestades geomagnéticas.

As condições geomagnéticas observadas durante a tempestade de 10–11 de maio de 2024 foram favoráveis à ocorrência de GICs. Eventos extremos dessa natureza (classificados como supertempestades) podem gerar correntes ionosféricas significativas, especialmente por meio da dinâmica do EEJ, representando, assim, um risco substancial para os sistemas de energia nessas regiões (ZHANG *et al.*, 2022). Dado o impacto global das supertempestades geomagnéticas, medidas proativas, incluindo monitoramento em tempo real, reforço da infraestrutura e planejamento de manutenção, devem ser consideradas essenciais para a proteção das redes elétricas, mesmo em latitudes tradicionalmente consideradas menos vulneráveis.

7.2 Correspondência entre variáveis magnéticas e elétricas

Em muitos estudos da área do clima espacial, técnicas de correlação são comumente empregadas para analisar relações entre parâmetros associados, por exemplo, ao vento solar, CMEs, GICs, $d\mathbf{H}/dt$, entre outros (SAMWEL e MITEVA, 2023; SILVA *et al.*, 2024; SMITH *et al.*, 2022). Durante eventos intensos, como tempestades geomagnéticas, muitas dessas variáveis sofrem variações interdependentes, o que torna a análise de correlação uma ferramenta pertinente para investigar tais relações. No presente estudo, essa técnica foi aplicada para examinar possíveis associações entre variações na componente H do campo geomagnético e os valores de corrente e voltagem das LTs durante a tempestade geomagnética de 10–11 de maio de 2024.

As correlações identificadas, durante o primeiro período analisado, indicam associações fortes entre a corrente elétrica e a componente H , bem como entre a voltagem e a componente H , conforme ilustrado nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4. Vale destacar que, nos dois períodos analisados, os comportamentos da componente H , da corrente e da voltagem variaram de forma distinta. Por exemplo, enquanto os valores de cor-

rente diminuíram, no primeiro intervalo, os valores de voltagem aumentaram (figura 5.2). Dentro desse mesmo intervalo de tempo, ocorreram as fases inicial e principal da tempestade. Esta última se caracteriza pela queda abrupta (diminuição) na força da componente H . Logo depois, o seu valor mínimo é alcançado, onde, neste momento, marca o início da fase de recuperação da tempestade. Sendo assim, conforme a interpretação da correlação de Pearson (SCHÖBER *et al.*, 2018), quando uma variável aumenta enquanto a outra diminui (em suas respectivas magnitudes), a correlação assume valor negativo. Em contrapartida, quando ambas crescem, em suas magnitudes, simultaneamente, a correlação é positiva. Essa dinâmica entre as diferentes tendências de variações entre essas variáveis pode explicar a correlação positiva entre a componente H e a voltagem, e a correlação negativa entre a corrente e a componente H observadas neste intervalo.

Como justificativa adicional para tais comportamentos, destaca-se que, em uma linha de transmissão de energia, a manutenção de potência ativa (P) constante requer um balanceamento entre as duas grandezas: o aumento da voltagem (V) e, conseqüentemente, a redução da corrente (I), uma vez que a potência é proporcional ao produto entre ambas, Eq. (7.1). Isto se dá devido a melhor atender ao compromisso de custos dos equipamentos que condicionam e transportam a energia, e custo das perdas elétricas envolvidas (VASCONCELOS, 2017). Assim, as flutuações nesses parâmetros influenciam diretamente a direção da relação linear entre essas grandezas e a componente H ao longo dos períodos analisados.

$$P = VI \cos \phi, \quad (7.1)$$

onde ϕ é o ângulo de fase entre V e I .

Apesar dos elevados coeficientes de correlação observados no primeiro período ($r > 0.80$), é necessário frisar que tais associações não implicam, por si só, em causalidade. A relação entre os parâmetros elétricos das LTs e a componente H deve ser interpretada no âmbito estatístico, como indício preliminar da influência das variações geomagnéticas sobre os sistemas elétricos. Dessa forma, interpretações adicionais requerem análises adicionais mais robustas (tal como MANSOUR *et al.* 2021), bem como a disponibilidade de dados com maior resolução, para confirmar a existência e a natureza dessa relação, o que extrapola o escopo deste trabalho (que se limita à análise dos dados atualmente disponíveis).

No segundo intervalo de análise, observou-se uma redução geral nos valores de correlação (figuras 6.5, 6.6 e 6.7). As correlações fracas entre a componente H e voltagem/corrente sugerem que as reduções nesses valores de r poderiam ser explicadas devido a uma influência maior por parte da componente H durante a fase de recuperação da tempestade a partir da dinâmica sofrida pelos sistemas de corren-

tes na ionosfera-magnetosfera elucidados a seguir. Às 02:00 UTC de 11 de maio, foi detectado um aumento no fluxo de prótons de alta energia (>500 MeV), como reportado por HAYAKAWA *et al.* (2025), provocando flutuações adicionais na série temporal da componente H (figura 5.1), o que poderia ser atribuído ao impacto nos coeficientes de correlação (r) observados nesse período.

7.2.1 Coeficiente r sob condições geomagnéticas moderada

De forma geral, os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a componente H e os valores de voltagem obtidos para este período foram inferiores aos registrados no primeiro e segundo períodos analisados (capítulos 6.2.1 e 6.2.2), sendo suas correlações classificadas como fracas. A tabela 7.1 mostra, de forma mais nítida, as correlações obtidas ao longo de todos os períodos analisados neste trabalho. Além dessa redução, verificou-se uma inversão na direção da correlação, passando a apresentar correlação negativa.

Para a correlação entre componente H e corrente, observaram-se valores de $r = -0.91$ (TTB), -0.96 (SLZ) e -0.97 (KOU), indicando correlações classificadas como muito fortes (SCHOBER *et al.*, 2018), assim como no primeiro período da tempestade de 10–11 de maio de 2024, além de apresentar valores superiores aos observados no segundo período analisado da mesma data (os quais variaram de $r = -0.39$ a $r = -0.55$; capítulo 6.2.2).

Tabela 7.1: Correlação de Pearson entre grandezas elétricas e a componente H magnética para diferentes observatórios e linhas de transmissão. (Tabela gerada pelo autor).

Linha	Observatório	Período	$H \times \text{Corrente}$	$H \times \text{Voltagem}$
TMAT-01	TTB	Primeiro período	-0.94	0.83
		Segundo período	-0.39	0.44
		Período comparativo	-0.91	-0.12
	KOU	Primeiro período	-0.95	0.82
		Segundo período	-0.51	0.50
		Período comparativo	-0.97	-0.10
	SLZ	Primeiro período	-0.95	0.83
		Segundo período	-0.55	0.55
		Período comparativo	-0.96	-0.14
TMAT-02	TTB	Primeiro período	-0.94	0.83
		Segundo período	-0.40	0.43
		Período comparativo	-0.91	-0.14
	KOU	Primeiro período	-0.95	0.82
		Segundo período	-0.51	0.49
		Período comparativo	-0.97	-0.12
	SLZ	Primeiro período	-0.95	0.84
		Segundo período	-0.55	0.54
		Período comparativo	-0.96	-0.16

Adicionalmente, identificou-se um padrão espacial durante o período de comparação:

Para componente H e corrente, os maiores valores de r ocorreram à medida que o observatório magnético se afastava do equador magnético, apesar de ainda serem todas correlações muito fortes, ou seja, não haver diferenças grandes de um valor de r para outro: -0.91 (TTB), -0.96 (SLZ) e -0.97 (KOU).

Já para componente H e voltagem não foi identificado qualquer tendência espacial. No entanto, o fato de que nesta correlação os valores de r terem alterado sua direção, passando a ser negativos, indica uma sensibilidade maior por parte da voltagem quanto à mudança de cenário, o que sugere algum tipo de mudança na série temporal dos valores de voltagem, uma vez que os valores de r entre componente H e corrente mantiveram suas respectivas direções inalteradas em relação aos dois primeiros períodos analisados.

Na figura 5.4, notamos uma variabilidade alta na série temporal dos dados de

voltagem, em relação à de corrente (que se mostra mais suave). No entanto, tais variabilidades também são observadas na série temporal durante o primeiro e segundo períodos analisados (figura 5.3, segundo e quarto painel, no sentido de cima para baixo), o que pode ter ligação a causas operacionais das linhas, visto que este comportamento pode ser observado tanto no período com e sem tempestade geomagnética.

Adicionalmente, em um estudo conduzido por SCHONS *et al.* (2020), cujo objetivo era verificar os impactos das GICs em TCs (transformadores de corrente), os autores demonstram, por meio de modelagem que simula a circulação das GICs em um sistema de energia —considerando sua frequência característica de 0.01-0.0001 Hz, ou seja, natureza de corrente quasi-DC —que essas correntes (com amplitudes de 20 A) afetam o núcleo dos transformadores, provocando a saturação em poucos ciclos e distorções nos sinais de corrente e voltagem, entre outros efeitos. Tendo em vista que os mesmos dispositivos (TCs) foram utilizados no presente estudo, pode-se sugerir uma interpretação adicional para a flutuação dos valores de voltagem, atribuindo essas variações a causas externas relacionadas às GICs. No entanto, as limitações dos modelos e dos dados empregados neste presente trabalho de mestrado não permitem confirmar tal hipótese, cabendo a investigações futuras a responsabilidade de aprofundar essa análise.

É importante destacar que o estudo realizado apresenta limitações relacionadas à disponibilidade de dados (taxa de amostragem e períodos, por exemplo), tanto por parte da empresa de energia elétrica quanto dos observatórios geomagnéticos. Por essa razão, foram consideradas apenas três observatórios e um único dia de tempestade. Essa restrição impõe certas limitações à amplitude da discussão. No entanto, os resultados obtidos são inéditos e relevantes, contribuindo de forma significativa para a compreensão do fenômeno estudado.

Por se tratar do primeiro estudo a analisar dados elétricos brutos no contexto de uma atividade geomagnética intensa, os resultados aqui apresentados oferecem suporte relevante para investigações futuras e contribuem para a contextualização dos dados observacionais discutidos nesta pesquisa. Além disso, o estudo evidencia a viabilidade do uso de séries temporais de corrente e voltagem como ferramenta complementar na interpretação relacionada com altos valores de $d\mathbf{H}/dt$. Tal integração pode favorecer avanços na modelagem do acoplamento eletromagnético em diferentes sistemas (tal como magnetosfera-redes de energia) e no desenvolvimento de estratégias preditivas voltadas à mitigação de riscos de indução de GICs (por exemplo, MAC MANUS *et al.* 2025) em redes de transmissão situadas em regiões de latitudes equatoriais (ainda relativamente pouco exploradas na literatura).

Capítulo 8

Conclusões e Perspectivas

Este trabalho representa a primeira análise conhecida a utilizar séries temporais elétricas brutas de LTs em latitudes equatoriais para investigar a ocorrência de GICs. Essa abordagem, inédita, reforça a relevância do estudo e abre novas perspectivas para a compreensão dos riscos geomagnéticos em regiões até então consideradas menos vulneráveis.

Embora os impactos das GICs em sistemas de energia estejam bem documentados em regiões de altas latitudes, sua ocorrência e potenciais efeitos em áreas próximas ao equador magnético permanecem significativamente pouco explorados. LTs de energia localizadas nessas regiões equatoriais e proximidades (normalmente consideradas menos vulneráveis) passaram a apresentar mais interesse por conta da suscetibilidade a distúrbios geomagnéticos em regiões equatoriais, evidenciando a necessidade de estudos adicionais direcionados a esse contexto específico.

Neste estudo, aplicou-se o método da derivada temporal da componente horizontal ($d\mathbf{H}/dt$) para estimar induções de GICs, juntamente com a análise de correlação de Pearson, para investigar possíveis relações entre variações geomagnéticas e parâmetros elétricos durante a tempestade geomagnética de 10–11 de maio de 2024.

As principais conclusões referentes aos procedimentos metodológicos, obtidas para os observatórios magnéticos e LTs nos períodos específicos analisados neste estudo, são as seguintes:

- Ultrapassagem de limiares de $d\mathbf{H}/dt$: todos os picos de $d\mathbf{H}/dt$ registrados pelos observatórios magnéticos utilizados neste estudo excederam o limiar de 30 nT/min, o que é indicativo de potencial atividade de GICs, na região analisada.
- Variações espaciais nos picos de $d\mathbf{H}/dt$: os picos mais notáveis de $d\mathbf{H}/dt$ foram observados nos observatórios de Tatuoca (TTB) e São Luís (SLZ), provavelmente devido à sua proximidade com o centro do EEJ. Em contraste, o observatório de Kourou (KOU), localizado mais afastado da EEJ, registrou os

menores valores em seu pico.

- Resposta de $d\mathbf{H}/dt$ à SSC: os maiores picos de $d\mathbf{H}/dt$ em todos os observatórios magnéticos foram atingidos imediatamente após a SSC.
- Padrões de correlação durante as fases da tempestade: durante as fases inicial e principal da tempestade geomagnética, foi identificada uma forte correlação negativa entre a componente horizontal (H) do campo geomagnético e a corrente elétrica, enquanto uma forte correlação positiva foi observada entre a componente H e a voltagem das LTs.
- Queda nos valores de correlação durante a fase de recuperação: na fase de recuperação da tempestade, as correlações entre a componente H e a corrente variaram de moderadas a fracas. As correlações entre a componente H e a voltagem mostraram-se moderadas e positivas durante esse período.
- Semelhança entre diferentes contextos geomagnéticos: valores de r para componente H e corrente semelhantes (na faixa de -0.91 a -0.96) entre os encontrados no primeiro período analisado durante a tempestade de 10–11 de maio de 2024 e os encontrados durante o período sem tempestade, 24 de março de 2024.
- Padrão espacial entre os valores de r em relação ao EEJ: no período moderado, observou-se que os valores de r , entre componente H e corrente, tendem a aumentar à medida que o observatório magnético se afasta do centro do EEJ.
- Sensibilidade por parte dos valores de voltagem em decorrência da inversão na direção da correlação e queda acentuada, no período de comparação, para os valores de r entre componente H e voltagem em relação aos dois períodos analisados no decorrer de 10–11 de maio de 2024.

Nossos resultados demonstram que, em dois observatórios (TTB e SLZ) localizados próximos à região da EEJ, a derivada temporal da componente horizontal do campo geomagnético ($d\mathbf{H}/dt$) atingiu magnitudes em torno de $|60 \text{ nT/min}|$ (73 nT/min em TTB) durante a tempestade geomagnética abordada. Essa taxa de variação é significativa, uma vez que esses valores são comparáveis com os encontrados por outros autores. Ademais, os coeficientes de correlação de Pearson calculados entre as variáveis analisadas indicam uma relação potencialmente relevante, estatisticamente, especialmente durante as fases inicial e principal da tempestade de 10–11 de maio de 2024, assim como no período de comparação, sugerindo um forte acoplamento entre as variações magnéticas e os parâmetros elétricos das LTs.

Embora as GICs tenham sido amplamente estudadas em áreas de médias e altas latitudes, seus impactos em zonas equatoriais ainda são pouco investigados. As

observações aqui encontradas ressaltam a importância de ampliar as investigações sobre GICs, especialmente em regiões de baixas latitudes e latitudes equatoriais, onde o EEJ pode atuar como uma fonte significativa de distúrbios geomagnéticos. Para validar os resultados deste estudo e aprofundar a compreensão sobre o comportamento das GICs em regiões equatoriais, são necessárias novas investigações.

Neste trabalho, a baixa taxa de amostragem das variáveis Corrente e Voltagem representou uma limitação significativa, impactando diretamente os resultados obtidos. Ainda assim, esses resultados permanecem relevantes, fornecendo os primeiros indícios sobre o potencial de utilização desses dados e sobre a relação entre parâmetros do clima espacial e variáveis elétricas de infraestruturas em solo.

A realização de estudos comparativos entre períodos de baixa e alta atividade geomagnética permitiria uma caracterização mais robusta das respostas das LTs à indução de GICs, assim como a utilização de dados mais precisos das variáveis elétricas das LTs. Tais análises poderiam confirmar a consistência dos resultados observados e oferecer uma compreensão abrangente sobre como perturbações do clima espacial influenciam sistemas elétricos próximos à região do EEJ.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a obtenção de dados elétricos em resoluções mais altas (1 s a 1 min), a ampliação do conjunto de observatórios, a inclusão de diferentes eventos de tempestades geomagnéticas e uma análise de transferência de informação (de forma a se obter mais precisão nas correlações), visto que ainda não existe tal procedimento disponível na literatura para as variáveis elétricas e magnéticas abordadas neste presente trabalho. Dessa forma, será possível confirmar e expandir as evidências aqui encontradas, bem como aprimorar a modelagem da indução de GICs em LTs equatoriais.

Referências Bibliográficas

- ABD LATIFF, Z. I., JUSOH, M. H., 2021, “Analysis of geomagnetically induced currents (GIC) at equatorial region over solar cycle 24”, Journal of Electrical and Electronic Systems Research (JEESR), v. 19, pp. 37–42. doi: 10.24191/jeesr.v19i1.005.
- BARBOSA, C., HARTMANN, G., KATIA, J., et al., 2014, “Numerical modeling of geomagnetically induced currents in a Brazilian transmission line”, Advances in Space Research, v. 55 (11). doi: 10.1016/j.asr.2014.11.008.
- BARTELS, J., 1949, “Appendix B of IATME Bulletin No. 12b: The standardised index Ks and the planetary index Kp”, IUGG. doi: 10.25577/xkjt-w404. Disponível em: <<https://doi.org/10.25577/xkjt-w404>>.
- BOLDUC, L., 2002, “GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system”, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 64, n. 16, pp. 1793–1802. ISSN: 1364-6826. doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00128-1). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682602001281>>. Space Weather Effects on Technological Systems.
- BOTELER, D. H., 1994, “Geomagnetically induced currents: present knowledge and future research”, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, pp. 50–58. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109134413>>.
- BOTELER, D. H., 2019, “A 21st century view of the March 1989 magnetic storm”, Space weather, v. 17, n. 10, pp. 1427–1441.
- CAMPBELL, W. H., 2003, Introduction to geomagnetic fields. Boulder, Colorado, Cambridge University Press.
- CARABALLO, R., 2016, “The south Atlantic magnetic anomaly phenomena: its impact on the technological infrastructure”, Master in Geosciences, Montevideo.

- CARABALLO, R., SÁNCHEZ BETTUCCI, L., TANCREDI, G., 2013, “Geomagnetically induced currents in the Uruguayan high-voltage power grid”, Geophysical Journal International, v. 195, n. 2, pp. 844–853.
- CARRINGTON, R. C., 1859, “Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 20, p. 13-15, v. 20, pp. 13–15.
- CARTER, B. A., YIZENGAW, E., PRADIPTA, R., et al., 2015, “Interplanetary shocks and the resulting geomagnetically induced currents at the equator”, Geophysical Research Letters, v. 42, n. 16, pp. 6554–6559.
- CHE-CASTALDO, J. P., COUSIN, R., DARYANTO, S., et al., 2021, “Critical Risk Indicators (CRIs) for the electric power grid: a survey and discussion of interconnected effects”, Environment Systems and Decisions, v. 41, pp. 594–615.
- CLIVER, E. W., DIETRICH, W. F., 2013, “The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity”, Journal of Space Weather and Space Climate, v. 3, pp. A31.
- COLLADO-VILLAVERDE, A., MUÑOZ, P., CID, C., 2024, “Classifying and bounding geomagnetic storms based on the SYM-H and ASY-H indices”, Natural Hazards, v. 120, n. 2, pp. 1141–1162. doi: 10.1007/s11069-023-06241-1.
- COSTA JR., E., SIMÕES JR., F., CARDOSO, F., et al., 2011, “O vento solar e a atividade geomagnética”, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4 (Oct), pp. 4301–4301. ISSN: 1806-1117. doi: 10.1590/S1806-11172011000400001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400001>>.
- COWLING, T. G., 1932, “Magnetism, Solar : The electrical conductivity of an ionised gas in the presence of a magnetic field”, , v. 93 (nov.), pp. 90. doi: 10.1093/mnras/93.1.90.
- DIVETT, T., RICHARDSON, G. S., BEGGAN, C. D., et al., 2018, “Transformer-Level Modeling of Geomagnetically Induced Currents in New Zealand’s South Island”, Space Weather, v. 16, n. 6, pp. 718–735. doi: <https://doi.org/10.1029/2018SW001814>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018SW001814>>.

- DUARTE, F. S., RIOS, R. A., HRUSCHKA, E. R., et al., 2019, “Decomposing time series into deterministic and stochastic influences: A survey”, Digital Signal Processing, v. 95, pp. 102582. doi: 10.1016/j.dsp.2019.102582.
- ESPINOSA, K. V., PADILHA, A. L., ALVES, L. R., et al., 2023, “Estimating geomagnetically induced currents in southern Brazil using 3-D Earth resistivity model”, Space Weather, v. 21, n. 4, pp. e2022SW003166.
- FIORI, R. A. D., BOTELER, D. H., GILLIES, D. M., 2014, “Assessment of GIC risk due to geomagnetic sudden commencements and identification of the current systems responsible”, Space Weather, v. 12, n. 1, pp. 76–91. doi: <https://doi.org/10.1002/2013SW000967>.
- FORBES, J. M., 1981, “The equatorial electrojet”, Reviews of Geophysics, v. 19, n. 3, pp. 469–504.
- GAUNT, C., COETZEE, G., 2007, “Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk”. In: 2007 IEEE Lausanne power tech, pp. 807–812. IEEE, 10.
- GONZALEZ, W., JOSELYN, J.-A., KAMIDE, Y., et al., 1994, “What is a geomagnetic storm?” Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 99, n. A4, pp. 5771–5792.
- GRIFFITHS, D. J., 2023, Introduction to electrodynamics. Boston, Pearson, Cambridge University Press.
- HAYAKAWA, H., EBIHARA, Y., MISHEV, A., et al., 2025, “The Solar and Geomagnetic Storms in 2024 May: A Flash Data Report”, The Astrophysical Journal, v. 979, n. 1, pp. 49. doi: 10.3847/1538-4357/ad9335.
- HONORÉ, M. E., ANAD, F., MARIE, N. C., et al., 2017, “Sq (H) Solar Variation at Yaoundé-Cameroon AMBER Station from 2011 to 2014”, International Journal of Geosciences, v. 8, n. 4, pp. 545–562.
- KANE, R., 1976, “Geomagnetic field variations”, Space Science Reviews, v. 18, n. 4, pp. 413–540. doi: 10.1007/BF00217344.
- KAPPENMAN, J. G., 2003, “Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations”, Space Weather, v. 1, n. 3. doi: <https://doi.org/10.1029/2003SW000009>.

- KASRAN, F. A. M., JUSOH, M. H., RAHIM, S. A. E. A., et al., 2018a, “Geomagnetically Induced Currents (GICs) in Equatorial Region”. In: 2018 IEEE 8th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), pp. 112–117. IEEE, a.
- KASRAN, F. A. M., JUSOH, M. H., YOSHIKAWA, A., et al., 2018b, “The Time Derivative of the Horizontal Geomagnetic Field for the Low Latitude MAGDAS Langkawi Station for the Estimation of Geomagnetically Induced Current”. In: Space Science and Communication for Sustainability, pp. 57–71, Singapore, Springer Singapore, b. doi: 10.1007/978-981-10-6574-3_6.
- KOEN, J., GAUNT, T., 2003, “Geomagnetically induced currents in the Southern African electricity transmission network”. In: 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, v. 1, pp. 7 pp. Vol.1–, 6. doi: 10.1109/PTC.2003.1304165.
- KONO, M., 2010, Treatise on Geophysics, Volume 5: Geomagnetism. Los Angeles, Elsevier.
- LAUNDAL, K. M., RICHMOND, A. D., 2017, “Magnetic coordinate systems”, Space science reviews, v. 206, n. 1, pp. 27–59. doi: <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0275-y>.
- LUNDSTEDT, H., 2006, “The sun, space weather and GIC effects in Sweden”, Advances in Space Research, v. 37, n. 6, pp. 1182–1191. ISSN: 0273-1177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.10.023>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117705011816>>. Space weather prediction: Applications and validation.
- MAC MANUS, D. H., RODGER, C. J., RENTON, A., et al., 2025, “Implementing Geomagnetically Induced Currents Mitigation During the May 2024 “Gannon” G5 Storm: Research Informed Response by the New Zealand Power Network”, Space Weather, v. 23, n. 6, pp. e2025SW004388. doi: <https://doi.org/10.1029/2025SW004388>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2025SW004388>>. e2025SW004388 2025SW004388.
- MANSHOUR, P., BALASIS, G., CONSOLINI, G., et al., 2021, “Causality and Information Transfer Between the Solar Wind and the Magnetosphere-Ionosphere System”, Entropy, v. 23, n. 4 (mar.), pp. 390. doi: 10.3390/e23040390. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/e23040390>>.

- MCKAY, A., WHALER, K., 2006, “The electric field in northern England and southern Scotland: Implications for geomagnetically induced currents”, Geophysical Journal International, v. 167, n. 2, pp. 613–625. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03128.x.
- MERRILL, R. T., MCELHINNY, M. W., MCFADDEN, P. L., 1998, The magnetic field of the earth: paleomagnetism, the core, and the deep mantle, v. 63. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-themagneticfieldoftheearth.pdf>, Academic Press.
- MITEVA, R., NEDAL, M., SAMWEL, S. W., et al., 2023, “Parameter Study of Geomagnetic Storms and Associated Phenomena: CME Speed De-Projection vs. In Situ Data”, Universe, 9(4):179. doi: 10.3390/universe9040179.
- MOHD ANUAR, N., MOHD. KASRAN, F., ABBAS, M., et al., 2019, “Assessment of the Geomagnetically Induced Current (GIC) at Low Latitude Region based on MAGDAS Data”, Journal of Physics: Conference Series, v. 1152, n. 1 (jan), pp. 012028. doi: 10.1088/1742-6596/1152/1/012028.
- NGWIRA, C. M., PULKKINEN, A., WILDER, V., et al., 2013, “Extended study of extreme geoelectric field event scenarios for geomagnetically induced current applications”, Space Weather, v. 11, n. 3, pp. 121–131. doi: <https://doi.org/10.1002/swe.20021>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/swe.20021>>.
- OLIVEIRA, D., AREL, D., RAEDER, J., et al., 2018, “Geomagnetically induced currents caused by interplanetary shocks with different impact angles and speeds”, Space weather, v. 16, n. 6, pp. 636–647.
- ONS, 2025. “o Sistema Interligado Nacional”. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 12 maio 2025.
- PARKS, G., 2015, “Magnetosphere”. In: North, G. R., Pyle, J., Zhang, F. (Eds.), Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition), second edition ed., Academic Press, pp. 309–315, Oxford. ISBN: 978-0-12-382225-3. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00211-5>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123822253002115>>.

- PIRJOLA, R., 2000a, “Geomagnetically induced currents during magnetic storms”, IEEE Transactions on Plasma Science, v. 28, n. 6, pp. 1867–1873. doi: 10.1109/27.902215.
- PIRJOLA, R., 2000b, “Geomagnetically induced currents during magnetic storms”, IEEE transactions on plasma science, v. 28, n. 6, pp. 1867–1873.
- PIRJOLA, R., 2002, “Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems”, Surveys in geophysics, v. 23, pp. 71–90.
- PITKÄNEN, T., 2011, Dynamics of the polar cap boundary and the auroral oval in the nightside ionosphere. Tese de Doutorado, University of Oulu, Finland.
- PULKKINEN, A., RASTÄTTER, L., KUZNETSOVA, M., et al., 2013, “Community-wide validation of geospace model ground magnetic field perturbation predictions to support model transition to operations”, Space Weather, v. 11, n. 6, pp. 369–385. doi: 10.1002/swe.20056.
- RIGOTI, A., FH, C., NB, T., et al., 1999, “Characteristics of the equatorial electrojet determined from an array of magnetometers in N-NE Brazil”, Earth, planets and space, v. 51, n. 2, pp. 115–128. doi: 10.1186/BF03352216.
- ROSTOKER, G., 1972, “Geomagnetic indices”, Reviews of Geophysics, v. 10, n. 4, pp. 935–950. doi: <https://doi.org/10.1029/RG010i004p00935>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG010i004p00935>>.
- ROUT, D., KUMAR, A., SINGH, R., et al., 2025, “Evidence of Unusually Strong Equatorial Ionization Anomaly at Three Local Time Sectors During the Mother’s Day Geomagnetic Storm On 10–11 May 2024”, Geophysical Research Letters, v. 52, n. 2, pp. e2024GL111269. doi: <https://doi.org/10.1029/2024GL111269>.
- RUSSELL, C., 2001, “The dynamics of planetary magnetospheres”, Planetary and Space Science, v. 49, n. 10-11, pp. 1005–1030. doi: 10.1016/S0032-0633(01)00017-4.
- SAMWEL, S., MITEVA, R., 2023, “Correlations between space weather parameters during intense geomagnetic storms: Analytical study”, Advances in Space Research, v. 72, n. 8, pp. 3440–3453. doi: 10.1016/j.asr.2023.07.053.
- SARMIENTO, K. V. E., 2018, Estimativa da amplitude de correntes geomagneticamente induzidas em diferentes locais no Brasil durante

- tempestades magnéticas do ano de 2015. Tese de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.
- SCHERER, K., FICHTNER, H., HEBER, B., et al., 2005, Space Weather: The physics behind a slogan, v. 656. <https://link.springer.com/book/10.1007/b100037>, Springer Science & Business Media.
- SCHOBBER, P., BOER, C., SCHWARTE, L. A., 2018, “Correlation coefficients: appropriate use and interpretation”, Anesthesia & analgesia, v. 126, n. 5, pp. 1763–1768. doi: 10.1213/ANE.0000000000002864.
- SCHONS, F. K., LORENZONI, A. P., DOS SANTOS, E. M., et al., 2020, “EFEITOS CAUSADOS POR CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE E RELÉS DE DISTÂNCIA DO TIPO MHO”. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA, v. 2, 12.
- SILVA, G., ALVES, L., ESPINOSA, K., et al., 2024, “Evaluation of dB/dt amplitudes and sources over the Brazilian region during geomagnetic storms in the 2021–2022 biennium”, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 258, pp. 106196. doi: 10.1016/j.jastp.2024.106196.
- SMITH, A. W., RODGER, C. J., MAC MANUS, D. H., et al., 2022, “The Correspondence Between Sudden Commencements and Geomagnetically Induced Currents: Insights From New Zealand”, Space Weather, v. 20, n. 8, pp. e2021SW002983. doi: <https://doi.org/10.1029/2021SW002983>.
- SOARES, G., YAMAZAKI, Y., MATZKA, J., et al., 2018, “Equatorial counter electrojet longitudinal and seasonal variability in the American sector”, Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 123, n. 11, pp. 9906–9920. doi: 10.1029/2018JA025968.
- THOMSON, A. W., GAUNT, C. T., CILLIERS, P., et al., 2010, “Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids”, Advances in Space Research, v. 45, n. 9, pp. 1182–1190.
- TRIVEDI, N. B., VITORELLO, Í., KABATA, W., et al., 2007, “Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study”, Space weather, v. 5, n. 4.
- TULASI RAM, S., VEENADHARI, B., DIMRI, A., et al., 2024, “Super-intense geomagnetic storm on 10–11 May 2024: Possible mechanisms and impacts”,

- Space Weather, v. 22, n. 12, pp. e2024SW004126. doi: 10.1029/2024SW004126.
- VASCONCELOS, F. M. D., 2017, “Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica”, Londrina: Editora e Distribuidora Educacional SA.
- VILJANEN, A., PIRJOLA, R., 1994, “Geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system”, Surveys in Geophysics, v. 15, n. 4, pp. 383–408. ISSN: 1573-0956. doi: 10.1007/BF00665999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00665999>>.
- VILJANEN, A., NEVANLINNA, H., PAJUNPÄÄ, K., et al., 2001, “Time derivative of the horizontal geomagnetic field as an activity indicator”, Annales Geophysicae, v. 19, n. 9, pp. 1107–1118. doi: 10.5194/angeo-19-1107-2001. Disponível em: <<https://angeo.copernicus.org/articles/19/1107/2001/>>.
- WATARI, S., 2015, “Estimation of geomagnetically induced currents based on the measurement data of a transformer in a Japanese power network and geoelectric field observations”, Earth, Planets and Space, v. 67, pp. 1–12.
- WILCOX, R. R., 2003, “2 - PROBABILITY AND RELATED CONCEPTS”. In: Wilcox, R. R. (Ed.), Applying Contemporary Statistical Techniques, Academic Press, pp. 17–53, Burlington. ISBN: 978-0-12-751541-0. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012751541-0/50023-7>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127515410500237>>.
- YAMAZAKI, Y., MAUTE, A., 2017, “Sq and EEJ—a review on the daily variation of the geomagnetic field caused by ionospheric dynamo currents”, Space Science Reviews, v. 206, n. 1, pp. 299–405.
- ZHANG, J. J., WANG, C., SUN, T. R., et al., 2015, “GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in China: Observation and simulation”, Space Weather, v. 13, n. 10, pp. 643–655. doi: <https://doi.org/10.1002/2015SW001263>.
- ZHANG, J. J., YU, Y. Q., CHEN, W. Q., et al., 2022, “Simulation of Geomagnetically Induced Currents in a Low-Latitude 500 kV Power Network During a Solar Superstorm”, Space Weather, v. 20, n. 4, pp. e2021SW003005. doi: <https://doi.org/10.1029/2021SW003005>.

ZHOU, Y.-L., LÜHR, H., ALKEN, P., 2018, “The sidebands of the equatorial electrojet: General characteristic of the westward currents, as deduced from CHAMP”, Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 123, n. 2, pp. 1457–1476.