



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**



## **ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS COMPLEXAS**

### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE-CNPq)**

Karla Nayumi Mukai - Bolsista  
Universidade Estadual de Maringá - UEM  
E-mail: karlanmukai@gmail.com

Dr. Odim Mendes Júnior - Orientador  
Divisão de Geofísica Espacial  
DGE/CEA/INPE  
E-mail: odim.mendes@inpe.br

Dra. Margarete Oliveira Domingues - Coorientadora  
Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada  
LAC/CTE/INPE  
E-mail: margarete.domingues@inpe.br

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sistemas Dinâmicos</b>	<b>3</b>
2.1	Sistemas Lineares e Não-Lineares . . . . .	3
2.1.1	Sistemas Lineares . . . . .	4
2.1.2	Sistemas Não Lineares . . . . .	4
2.2	Espaço de fase . . . . .	5
2.2.1	Exemplo de espaço de fase . . . . .	5
2.3	Comportamento caótico e atratores . . . . .	6
2.4	Expoente de Lyapunov . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Recorrência</b>	<b>8</b>
3.1	Análise de Quantificação de Recorrência . . . . .	8
3.1.1	Gráfico de Recorrência . . . . .	8
3.1.2	Medidas de Quantificação de Recorrência . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Perturbações Geomagnéticas</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Dados</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Experimentos e Resultados</b>	<b>17</b>
6.1	Tabela de Casos de HILDCAA . . . . .	19
<b>7</b>	<b>Comentários finais</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>29</b>

## **Resumo**

Esse trabalho examina as características do acoplamento eletrodinâmico do plasma do vento solar com a atmosfera ionizada e magnetizada da Terra, pois dessa interação decorrem perturbações geomagnéticas. Neste estudo, a base de dados são os índices geomagnéticos  $AE$ , obtidos de medições magnéticas de superfície em regiões de altas latitudes, durante eventos do tipo HILDCAA. Esse índice está relacionado ao eletrojato auroral e é sensível ao acoplamento mesmo em situações mais fracas. Utilizando uma metodologia baseada em análise de quantificação por recorrência, obteve-se por resultado uma tabulação preliminar de valores que retratam as características dos sinais relacionados a esses eventos.

# Capítulo 1

## Introdução

O planeta Terra está sob constante influência do ambiente espacial. A Terra é formada por um núcleo sólido, por um núcleo exterior fluido, envolto por manto de magma e, na parte mais exterior, pela crosta terrestre. Ainda por mecanismos que precisam ser melhor compreendidos, o movimento da parte fluida cria um campo magnético que permeia toda a atmosfera terrestre. Por influência de um plasma magnetizado proveniente do Sol em regime bastante constante, um sistema de correntes é estruturado na parte ionizada da atmosfera terrestre [3], identificandas, de acordo com a região espacial, como a corrente na fronteira da magnetosfera terrestre - designada magnetopausa, corrente na cauda magnetosférica, uma corrente anelar em torno do planeta na região equatorial, correntes nas ionosferas polares, e corrente na ionosfera equatorial, interligando-se de uma forma complexa por meio de outras correntes. De forma esquemática, essas correntes estão mostradas na figura 1.1.

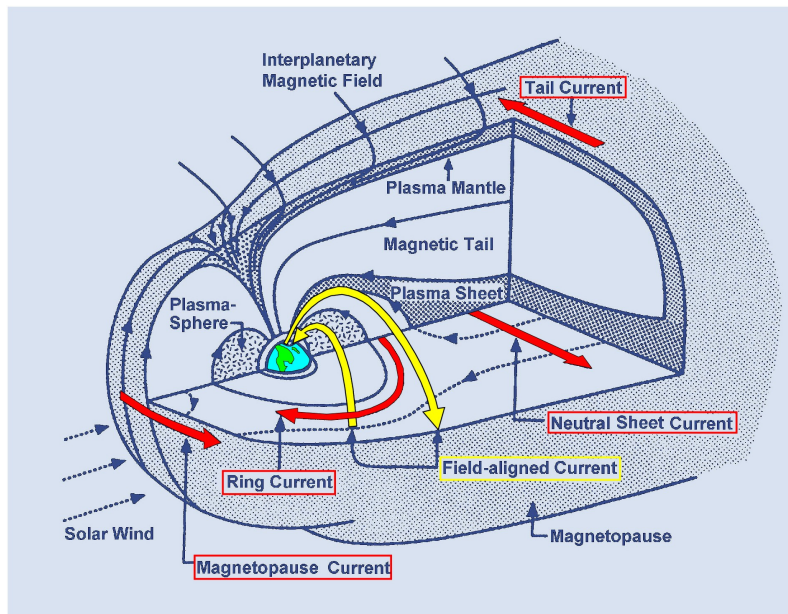


Figura 1.1: Representação da região de plasma terrestre e de correntes elétricas do sistema magnetosfera-ionosfera. Fonte: [5]

A Magnetosfera, que é a região em que a dinâmica das partículas é regida pelo campo geomagnético, é criada pela interação do plasma do vento solar com o campo geomagnético. Há um achatamento do campo geomagnético no lado diurno e um prolongamento no lado noturno.

Perturbações da atmosfera terrestre ocasionadas por variações das condições do plasma solar ou do ambiente espacial por mecanismos existentes no Sol correspondem primordialmente a distúrbios geomagnéticos. A morfologia

da magnetosfera pode se alterar, o regime de correntes elétricas no sistema magnetosfera-ionosfera é alterado, principalmente nas regiões aurorais e em torno do equador geomagnético, o que afeta sistemas de eletricidade, causando interrupção em linhas de transmissão, interferência em telecomunicações, aumentando corrosão em tubulações metálicas no transporte de fluidos na superfície terrestre, entre outros efeitos.

Devido a esses efeitos, uma atenção crescente tem sido dada ao monitoramento das atividades solares, visando evitar ou mitigar danos causados por tais interações Sol, meio espacial e ambiente planetário terrestre.

Atualmente, vários recursos de análises de dados estão disponíveis. Entre eles, ferramentas bastante promissoras que propiciam caracterização de assinaturas de fenômenos não lineares podem ser usadas. Neste trabalho, iniciou-se um estudo de processos relacionados a perturbações geomagnéticas na superfície da Terra considerando análise de quantificações de recorrência [2]. Ainda de caráter exploratório, alguns resultados ilustrativos foram obtidos.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é contribuir com a caracterização de processos dessa interação eletrodinâmica Sol-Terra. Como parte inicial de atividades relacionado a recursos de monitoramento, escolheu-se para avaliação o índice geomagnético de atividade auroral, identificado como AE, um dos índices de quantificação de perturbação magnética mais sensíveis a essa influência. Para uma investigação exploratória, períodos com ocorrência de HILDCAAs, do inglês *high-intensity, long-duration, continuous AE activity*, são utilizados. Esses são fenômenos em que o índice geomagnético AE, que mede a atividade do eletrojato auroral, apresenta atividade intensa e contínua, pode ocorrer tanto precedidos por intervalos geomagneticamente calmos quanto por intervalos de tempestades geomagnéticas, que representam períodos de forte perturbação geomagnética. Tais perturbações geomagnéticas afetam sistemas de eletricidade e causa danos em satélites e tecnologias de comunicação, dada sua importância este projeto tem por objetivo investigar as características dessas perturbações. Saber entender os mecanismos envolvidos nesses processos são de grande relevância e revelam a importância deste tipo de trabalho.

O trabalho está assim composto. No Capítulo 2, apresenta-se a ideia básica de sistemas dinâmicos, aspecto a ser explorado nas quantificações executadas neste trabalho. No Capítulo 3, o embasamento em física de processos não lineares, por meio de análise de quantificação de recorrência. No Capítulo 4, as perturbações geomagnéticas. No Capítulo 5, os dados utilizados neste estudo exploratório. No Capítulo 6, os experimentos de análise conduzidos e os resultados inicialmente alcançados e que deverão sofrer reanálise. E, Capítulo 7, os comentários finais relacionados a este projeto de iniciação científica.

## Capítulo 2

# Sistemas Dinâmicos

Um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos inter-relacionados, que apresentam uma relação de causa e efeito com uma função a desempenhar [4]. Quando um sistema apresenta propriedades descritivas que não variam com tempo, podendo variar espacialmente, é chamado sistema estático, enquanto no sistema dinâmico essas propriedades variam. Sistemas dinâmicos podem representar como um sistemas de variáveis interage entre si e evolui com o tempo. Essas interações podem ou não ser lineares, e mesmo sistemas determinísticos podem apresentar soluções aparentemente aleatórias, sendo tal comportamento chamado de caos determinístico.

Se o sistema for contínuo pode ser descrito por equações diferenciais ordinárias ou parciais.

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t)\end{aligned}$$

As  $n$  variáveis são dadas por  $x_1, \dots, x_n$  e pelas funções  $f_1, \dots, f_n$  que definem como as variáveis evoluem com o tempo. Já o sistema dinâmico discreto pode ser representado como a iteração de uma ou mais funções.

$$\begin{aligned}x_{n+1}^1 &= F_1(x_{n+1}^1, x_{n+1}^2, \dots, x_{n+1}^m) \\ x_{n+1}^2 &= F_2(x_{n+1}^1, x_{n+1}^2, \dots, x_{n+1}^m) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ x_{n+1}^m &= F_m(x_{n+1}^1, x_{n+1}^2, \dots, x_{n+1}^m)\end{aligned}$$

Dado um estado inicial  $x_0^1, x_0^2, \dots, x_0^m$ , a aplicação sucessiva das funções  $F_1, F_2, \dots, F_m$  permite obter a sequência de estados de cada variável.

### 2.1 Sistemas Lineares e Não-Lineares

Sistemas podem ser tanto lineares quanto não lineares. O primeiro tipo é o preferível de se trabalhar, pois possui a teoria muito mais desenvolvida e pode ser usadas ferramentas mais básicas e simples para se utilizar. Entretanto, os

sistemas da natureza em geral não possuem a propriedade da linearidade e devem ser analisados com ferramentas mais elaboradas.

Neste capítulo, será definido o que são sistemas lineares, o que são sistemas não lineares, e exemplos de ambos os tipos de sistemas serão dados.

### 2.1.1 Sistemas Lineares

Um sistema linear é uma modelagem matemática baseada no uso de um operador linear. Qualquer sistema  $y(t) = H\{x(t)\}$  é linear quando satisfaz a propriedade da linearidade, ou seja, se

$$\begin{aligned}y_1(t) &= H\{x_1(t)\} \\ y_2(t) &= H\{x_2(t)\}\end{aligned}$$

então para  $x(t) = ax_1(t) + bx_2(t)$ , em que  $a$  e  $b$  são constantes,

$$y(t) = H\{x(t)\} = H\{ax_1(t) + bx_2(t)\} = ay_1(t) + by_2(t) \quad (2.1)$$

Sistemas lineares, por apresentar esta característica, facilitam normalmente a obtenção do sinal de saída utilizando uma função que define o sistema, chamada de resposta ao impulso. Chamando esta função de  $h(t)$ , qualquer sinal de saída pode ser conseguido aplicando a convolução deste sinal com o sinal de entrada. Além disso, quando modelados como uma equação diferencial, todas as derivadas da função desconhecida aparecem com ordem 1.

Um exemplo simples é

$$y(t) + ty'(t) = x(t) \quad (2.2)$$

Observe que tanto o fator  $y(t)$  quanto o fator  $y'(t)$  estão presentes em ordem 1. Se este não fosse o caso, ou aparecesse algum termo multiplicando ambos os fatores, o sistema não seria linear.

### 2.1.2 Sistemas Não Lineares

Quando um sistema não apresenta a propriedade da superposição 2.1, ele é chamado de não linear. Sistemas assim são mais imprevisíveis e difíceis de se trabalhar, porém, em geral, alguns fenômenos da natureza podem ser mais fielmente representados por sistemas não lineares do que por sistemas lineares (a adição de mais parâmetros em consideração no problema pode torná-lo não linear, e a aproximação de um sistema não linear pode torná-lo linear). Estes sistemas são difíceis de serem analisados pela transformada de Fourier, visto que a superposição é uma propriedade importante para esta ferramenta.

Um exemplo de sistema não linear é

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 2 = 0 \\ f_2(x_1, x_2) = x_2^1 - \frac{x_2^2}{9} - 1 = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Este sistema não linear admite quatro soluções, que são os pontos onde as curvas  $x_1^2 + x_2^2 = 2$  e  $x_2^1 - \frac{x_2^2}{9} = 1$  se interceptam. A Resolução de sistemas não lineares são feitas por métodos iterativos.

Fenômenos solares também são modelados como sistemas não lineares, e por isso, necessitam de outras ferramentas. É esperado que a magnetosfera tenha um comportamento não linear devido a sua dinâmica interna de energia associada a tempestades e tempestades magnéticas. Não é possível compreender interação magnetosfera com os ventos solares apenas linearmente, é necessário o uso de técnicas não lineares.

## 2.2 Espaço de fase

O espaço de fase é uma representação das variáveis dinâmicas relevantes do sistema, muito útil para a compreensão do comportamento dos sistemas. A trajetória no espaço de fase representa a evolução temporal do sistema, em que cada ponto define o estado do sistema em um momento dependendo da sua função iterativa e condições iniciais, e a dimensão desse espaço depende da quantidade de variáveis dinâmicas. Para um sistema mecânico por exemplo, o espaço de fase geralmente consiste de todos os valores possíveis de posição e momento das variáveis.

### 2.2.1 Exemplo de espaço de fase

Um exemplo de sistema dinâmico real é o pêndulo não-linear forçado, na Figura 2.1, com massa  $M$  sujeito a um torque de uma força periódica e a força gravitacional  $G$ . O ângulo depende do tempo  $\theta = \theta(t)$  e está entre  $-\pi \leq \theta < \pi$ . O movimento do pêndulo forçado, não-linear e dissipativo, pode ser expresso pela Equação adimensional

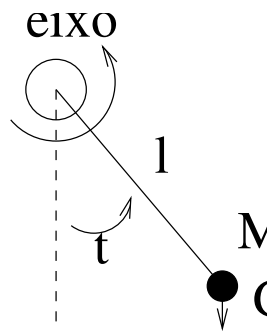


Figura 2.1: Pêndulo forçado com massa  $M$ , sujeito a gravidade e com torque aplicado no eixo.

2.5 .

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \nu \frac{d\theta}{dt} + \text{sen } \theta = A \text{sen}(2\pi ft) \quad (2.4)$$

ou

$$\ddot{\theta} + \nu \dot{\theta} + \text{sen } \theta = A \text{sen}(2\pi ft) \quad (2.5)$$

Simplificando a massa  $M$  para igual a um. A variável dinâmica  $\theta$  descreve o estado do sistema descrito na Equação 2.5, em que  $\dot{\theta}$  é  $w$  a velocidade angular, enquanto  $\nu$ ,  $A$ ,  $f$  são parâmetros de controle. Em que  $\nu$  denota o coeficiente de fricção,  $A$  a amplitude da excitação periódica e  $f$  frequência da força de excitação. A Equação 2.5 não permite solução algébrica, mas pode ser resolvida com o auxílio de um computador realizando uma integração por métodos numéricos. Variando os valores dos parâmetros de controle, observa-se quatro tipos diferentes de comportamento.

1. Pêndulo em que não há torque nem amortecimento. Considerando  $A = 0$  e  $\nu = 0$ . (a) Para ângulos  $\theta$  pequenos em relação a vertical

$$\text{sen}(\theta) \approx \theta$$

Tem-se, então, da Equação 2.5.

$$\ddot{\theta} + \theta = 0 \quad (2.6)$$

Na Figura 2.2(a) é mostrado o gráfico  $(\theta, w)$ . O sistema é conservativo, a área ocupada pelos pontos se mantém constante. Como não há dissipação e reposição de energia, o comportamento se mantém para um longo prazo, por isso não se define atrator para sistemas conservativos.

- (b) Considerando  $\theta$  com valores  $-\pi \leq \theta < \pi$ . Tem-se, então, da Equação 2.5.

$$\ddot{\theta} + \text{sen } \theta = 0 \quad (2.7)$$



O gráfico 2.2(b) de  $(\theta, w)$  para um pêndulo é obtida se  $\theta(0) = \pi$  para uma velocidade inicial  $w \neq 0$ . Quando o pêndulo se movimenta em círculos e para em equilíbrio no topo, esse gráfico representa o contorno crítico que separa as trajetórias finitas e infinitas

2. Pêndulo com amortecimento. Com  $\nu \neq 0$ , para um longo prazo  $t \rightarrow \infty$  o pêndulo irá cessar o movimento. Da Equação 2.5, tem-se.

$$\ddot{\theta} + \nu\dot{\theta} + \text{sen } \theta = 0 \quad (2.8)$$

O gráfico  $(\theta, w)$  na Figura 2.2(c) vemos que a área ocupada pela condição inicial diminuindo com o tempo, ou seja, a distância entre os pontos diminui e isso representa dissipação de energia.

3. Pêndulo com amortecimento e com movimento forçado. Considerando  $f \neq 0$ ,  $\nu \neq 0$ . Temos um pêndulo forçado não-linear da Equação 2.5 com um comportamento caótico. No gráfico da Figura 2.2(d) o comportamento dinâmico do pêndulo não se estabiliza num ciclo limite, apresentando comportamento caótico. Apresentando grande sensibilidade às condições iniciais, vemos que pontos inicialmente próximos (traços vermelho e azul) se afastam.

## 2.3 Comportamento caótico e atratores

A sensibilidade às condições iniciais significa que uma pequena perturbação ou mudança nas condições iniciais de um sistema leva a trajetórias significativamente divergentes. Em sistemas dissipativos, regiões em que as trajetórias convergem para uma ampla variedade de condições iniciais, limitadas pelo espaço de fase, são chamadas atratores. Valores do sistema que chegam próximos dos valores do atrator, permanecem próximos mesmo que o sistema seja perturbado. Pode-se definir um conjunto fechado de pontos  $A$  no espaço de fase como atrator, se:

1. Qualquer trajetória de  $\vec{x}(t)$  que começa em  $A$  e continua em  $A$ , para todo tempo.
2. Há um hipervolume  $B \subset A$ , Tal que qualquer condição inicial  $\vec{x}(0)$  pertencente a  $B$ . Em que a distância entre a trajetória  $\vec{x}(t)$  e  $A$  tende a 0, quando  $t \rightarrow \infty$ , ou seja,

$$d(\vec{x}(t), A) \rightarrow 0, \quad \text{quando } t \rightarrow \infty \quad (2.9)$$

O maior conjunto aberto que satisfaz a propriedade é chamado de bacia de atração de  $A$ .

3.  $A$  é mínimo, ou seja, não a subconjunto de  $A$  que satisfaça as duas condições anteriores.

## 2.4 Expoente de Lyapunov

O Expoente de Lyapunov ( $\lambda$ ) é a medida padrão para verificar a existência ou não de caos em um sistema. Os expoentes de Lyapunov avaliam a sensibilidade as condições iniciais, verificando a divergência exponencial média no espaço de fase. Os sinais dos expoentes de Lyapunov definem direções de instabilidade. A existência de pelo menos um expoente positivo ( $\lambda > 0$ ) caracteriza um sistema caótico pois, independente de quão próximo os pontos estejam, eles vão divergir. Se o expoente for negativo ( $\lambda < 0$ ), então o sistema tem uma órbita periódica estável. A magnitude do expoente  $\lambda$  esta relacionada a medida da razão na qual o sistema cria ou destrói informações.

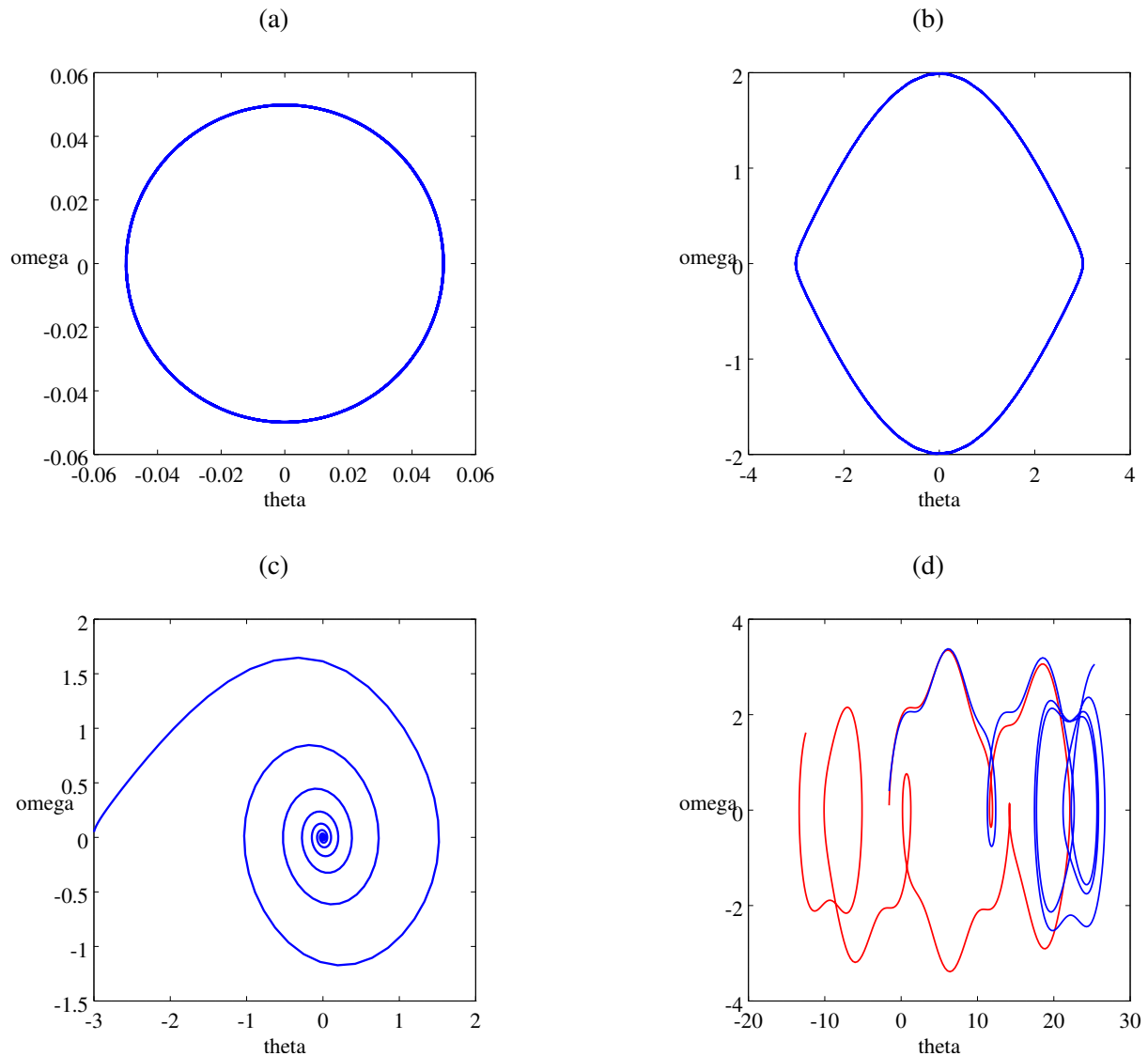


Figura 2.2: Plotagem do espaço de fase  $(\omega, \theta)$  de quatro tipos de comportamento do pêndulo forçado não-linear, variando os parâmetros de controle. (a) Pêndulo simples,  $A = 0, \nu = 0, \theta \approx 0$ . (b) Pêndulo simples,  $A = 0, \nu = 0, -\pi \leq \theta < \pi$ . (c) Pêndulo com amortecimento,  $\nu \neq 0, A = 0, -\pi \leq \theta < \pi$ . (d) Pêndulo com amortecimento e com movimento forçado,  $f \neq 0, \nu \neq 0, A \neq 0$ . As cores azul e vermelha representam o mesmo pêndulo com duas velocidades angulares iniciais,  $w$ , diferentes.

# Capítulo 3

## Recorrência

O conceito de recorrência inicialmente foi introduzido por Poincaré, o teorema de recorrência de Poincaré afirma que certos sistemas, após um longo tempo finito, retornam a um estado próximo de seu estado inicial. O tempo de recorrência de Poincaré é o tempo para um certo estado recorrer. A recorrência é uma característica fundamental de vários sistemas dinâmicos, geralmente aplicada as series temporais desses sistemas. Séries temporais são utilizadas no estudo de dados das mais diversas áreas, como finanças, astrofísica, engenharia e computação.

### 3.1 Análise de Quantificação de Recorrência

A análise de quantificação de recorrência [2] é um método em que se extraem medidas dos chamados gráficos de recorrência (Recurrence Plot), são construídos a partir de séries temporais, e utilizados para a visualização de comportamentos recorrentes no espaço de fase de sistemas dinâmicos. Supondo que o sistema tem uma trajetória  $\{\vec{x}_i\}_{i=1}^N$  no espaço de fase, em que  $N$  é o número de estados considerados e  $\vec{x}_i \approx \vec{x}_j$  é a igualdade até um limiar  $\varepsilon$ . Então o gráfico de recorrência é baseado na seguinte matriz.

$$R_{i,j} = \begin{cases} 1 & : \vec{x}_i \approx \vec{x}_j \\ 0 & : \vec{x}_i \not\approx \vec{x}_j \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

A matriz compara o estado do sistema nos tempos  $i$  e  $j$ , se o estados são similares,  $R_{i,j} = 1$ . Se os estados são muito diferentes, a entrada correspondente na matriz é  $R_{i,j} = 0$ .

#### 3.1.1 Gráfico de Recorrência

O gráfico de recorrência é definido pela matriz

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (3.2)$$

Em que  $N$  é o número de estados  $\vec{x}_i \in R^m$ ,  $\varepsilon$ (threshold) é o limiar a partir do ponto  $\vec{x}_i$ ,  $\Theta(\cdot)$  é função de Heaviside ( $\Theta(x)=0$ , se  $x < 0$ , e  $\Theta(x)=1$  caso contrário),  $\|\cdot\|$  é a norma da vizinhança e  $m$  é a dimensão de imersão.

#### 3.1.2 Medidas de Quantificação de Recorrência

Medidas de Quantificação de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis* - RQA), que é um método de análise de dados não lineares que quantifica o número e duração das recorrências de um sistema dinâmico representado por sua trajetória no espaço de fase das variáveis. Neste trabalho, foram utilizadas as Medidas de Quantificação de Recorrência, as principais são definidas a seguir.

- A taxa de recorrência (RR) é a densidade de pontos de recorrência no plot de recorrência,, excluindo a diagonal principal, definido pela equação abaixo.

$$RR(\varepsilon) = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}(\varepsilon) \quad (3.3)$$

A RR corresponde a probabilidade de, no limite  $N \rightarrow \infty$  um estado específico retornar à sua vizinhança de raio  $\varepsilon$  no espaço de fase.

- O determinismo (DET) é a medida de previsibilidade do sistema, definido pela equação abaixo.

$$DET = \frac{\sum_{\ell=\ell_{min}}^N \ell P(\ell)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}} \quad (3.4)$$

Em que  $P(\ell)$  é o número de diagonais de comprimento  $\ell$ , e  $\ell_{min}$  é o menor tamanho para uma linha ser considerada uma diagonal. Esta medida é chamada de determinismo e está relacionada com a previsibilidade de um sistema dinâmico.

- Da mesma forma a quantidade de pontos de recorrência que formam linhas verticais podem ser quantificados pela equação seguinte. Esta medida é chamada de liminaridade (LAM), e esta relacionada com a intermitência do sistema.

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P(v)}{\sum_{v=1}^N v P(v)} \quad (3.5)$$

Em que  $P(v)$  é o numero de linhas verticais de comprimento  $v$ , e  $v_{min}$  é o comprimento mínimo.

- O comprimento médio das estruturas verticais, ou tempo de permanência em um estado (*trapping Time* - TT), essa medida contém informação acerca da quantidade e do comprimento das estruturas verticais no gráfico de recorrência. Ela mede o tempo médio que o sistema permanece em um estado específico.

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P(v)}{\sum_{v=v_{min}}^N P(v)} \quad (3.6)$$

- Comprimento médio das linhas diagonais (L) é o tempo médio que dois segmentos de uma trajetória estão próximos um do outro, podendo ser interpretado como o tempo médio de predição. É calculado por

$$L = \frac{\sum_{\ell=\ell_{min}}^N \ell P(\ell)}{\sum_{\ell=\ell_{min}}^N P(\ell)} \quad (3.7)$$

- A Entropia de Shannon (ENTR) mede a distribuição de frequência dos comprimentos das linhas diagonais. Ela reflete a complexidade da estrutura determinística no sistema.

$$ENTR = \sum_{\ell=\ell_{min}}^N p(\ell) \ln p(\ell) \quad (3.8)$$

- A razão entre DET e RR (RATIO OU DET/RR) e pode ser calculada pela frequência de distribuição do comprimento de linhas diagonais.

$$RATIO = N^2 \frac{\sum_{\ell=\ell_{min}}^N \ell P(\ell)}{(\sum_{\ell=1}^N \ell P(\ell))^2} \quad (3.9)$$

- Comprimento máximo das linhas ( $V_{max}$ ) verticais mede a linha vertical mais longa.

$$V_{max} = \max(v_i ; i = 1 \dots N_v) \quad (3.10)$$

- Comprimento máximo das linhas diagonais ( $L_{max}$ ), é o comprimento da maior estrutura diagonal. Esta relacionada com a divergência de trajetória de dois segmentos.

$$L_{max} = \max(\ell_i ; i = 1 \dots N_\ell) \quad (3.11)$$

- A divergência (DIV) é o inverso comprimento máximo das linhas diagonais.

$$DIV = \frac{1}{L_{max}} \quad (3.12)$$

## Capítulo 4

# Perturbações Geomagnéticas

A Interação vento solar-magnetosfera terrestre é responsável por criar efeitos chamados de atividades geomagnéticas [1]. As sub tempestades magnéticas são o tipo mais frequente de atividade geomagnética, apresentam durações mais curtas (em média entre 1 e 3 horas) do que as tempestades magnéticas, resultantes do acúmulo de energia que é transportado do vento solar para o interior da magnetosfera. Causando várias perturbações nas regiões terrestres de altas latitudes, como o surgimento de auroras e o aumento da densidade de corrente do eletrojato auroral. Em geral as sub tempestades são caracterizadas por três fases distintas, a fase de crescimento em que a energia extraída do vento solar é armazenada na magnetosfera, a fase de expansão que corresponde à liberação da energia armazenada e a fase de recuperação em que a magnetosfera retorna às suas condições normais. Tempestades geomagnéticas podem ser entendidas com uma grande perturbação da magnetosfera terrestre que ocorre com uma intensificação da atividade solar, pela interação da energia do vento solar com o ambiente espacial que envolve a Terra. As tempestades são resultado da variação do vento solar que causa mudanças nas correntes, plasma e campo da magnetosfera Terrestre. As condições para a eficaz transferência de energia do vento solar para magnetosfera são ventos solares acelerados durante longos períodos na direção sul, oposto à direção do campo Terrestre, do lado diurno da magnetosfera. O Sol possui um ciclo de atividade de 11 anos, em que na fase de máxima atividade é caracterizado por nuvens de plasma denominadas ejeção de massa coronal (*coronal mass ejections* - CMESs) e ao se propagar no meio interplanetário essa estrutura passa a ser denominada de ICME (*interplanetary coronal mass ejections*, essas são as estruturas que mais aparecem relacionadas a tempestades geomagnéticas). Na fase mínima de atividade solar, ventos solares de alta velocidade (*high-speed solar wind stream* - HSS) chocam com ventos de baixa velocidade criando uma estrutura espiral distorcida pela rotação do sol e as regiões de interação são conhecidas como CIRs. Tempestades mais intensas e a presença de aurora geralmente são causadas por ICMEs. As tempestades são o resultado do aumento na densidade de energia das partículas que compõem a corrente de anel equatorial, o anel de corrente este que envolve a Terra, produz distúrbios magnéticos na superfície Terrestre. A medida desta corrente, o índice DST (*disturbance storm time*), é definido como a média instantânea mundial da perturbação da componente BH (campo magnético) no solo na região equatorial. Na zona sub auroral são utilizados o Kp e o Ap e em médias e baixas latitudes os índices mais utilizados são o Dst, o Sym e o Asy. Tempestades típicas são constituídas de três fases definidas, A fase inicial, onde temos um aumento rápido e de alguns minutos aproximadamente em a magnetosfera sofre compressão pelos ventos solares, intensificando o sistema de correntes que fluem na magnetosfera, causando um aumento súbito nos valores de BH. A fase principal, com decréscimo rápido e às vezes perturbado da componente BH. Acontece pela energização da corrente de anel através do processo de reconexão na magnetosfera diurna, à medida que o campo magnético interplanetário inverte sua polaridade, se opondo ao campo geomagnético, o crescimento da corrente do anel cessa com a diminuição da injeção de partículas na magnetosfera, diminuindo as perturbações. Iniciando a fase de recuperação da tempestade, em que os valores da componente BH e de Dst retornam lentamente aos seus valores normais de período calmo. As correntes aurorais, ou *auroral eletrojet*, produzem distúrbios magnéticos na componente horizontal que são medidos pelos índices AU, AL e AE, na zona auroral. Os índices AE foram idealizados por T. N. Davis and M. Sugiura, são medidos a partir de diversas estações e plotados ao mesmo tempo nas escalas em relação com seus níveis em calma, e sobrepostos graficamente, AU (*amplitude upper*) e AL (*amplitude lower*) estão relacionados com os valores maiores e

menores respectivamente, e AE é a diferença entre eles  $AE = AU - AL$ . Sendo AO o valor médio de AU e AL, isto é  $(AU + AL)/2$ . Os casos de atividades contínuas do índice AE, de longa duração e de grande intensidade HILDCAAs, *high-intensity, long-duration, continuous AE activity*, descobertos por Tsurutani e Gonzalez em 1987. Ocorre tanto durante períodos geomagneticamente calmos quanto durante a fase de recuperação de uma tempestade magnética, os critérios básicos para a classificação são de um evento como HILDCAA:

- O evento não deve ocorrer em períodos que correspondem à fase principal de uma tempestade magnética;
- O evento deve ter a duração de, no mínimo, dois dias;
- Durante o evento a intensidade do índice AE deve alcançar, pelo menos uma vez, um pico maior ou igual a 1000 nT;
- A atividade auroral deveria ser aproximadamente constante, o índice AE não deve cair para valores menores que 200 nT por mais de duas horas seguidas;

# Capítulo 5

## Dados

Os base de dados utilizados são os índices AE, AL e AU, obtidos do *Space Physics Data Facility* (SPDF) gerenciado por *Goddard Space Flight Center* (GSFC) - NASA através de OMNIWeb ([www.omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni\\_min.html](http://www.omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html)), que são computados de hora em hora em *World Data Center for Geomagnetism* operada por *Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism* na Universidade de Kyoto, Japão ([swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html)). Os dados são fornecidos por 12 observatórios localizados na zona auroral, apresentados na Tabela 5.1. Na Tabela 5.2 estão os eventos utilizados no trabalho,

Tabela 5.1: Lista de estações AE. Adaptado de: ([wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/AEObs.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/AEObs.html)).

Observatório	Lat. Geográfica	Long. Geográfica	Lat. Geomagnética	Long. Geomagnética
Abisko	68.36	18.82	66.04	115.08
Dixon Island	73.55	80.57	63.02	161.57
Cape Chelyuskin	77.72	104.28	66.26	176.46
Tixie Bay	71.58	129.00	60.44	191.41
Cape Wellen	66.17	190.17	61.79	237.10
Barrow	71.30	203.25	68.54	241.15
College	64.87	212.17	64.63	256.52
Yellowknife	62.40	245.60	69.00	292.80
Fort Churchill	58.80	265.90	68.70	322.77
Poste-de-la-Baleine	55.27	282.22	66.58	347.36
Narsarsuaq	61.20	314.16	71.21	36.79
Leirvogur	64.18	338.30	70.22	71.04

todos os eventos contidos na lista são casos de HILDCAA definidos pelo critério exposto anteriormente. Os casos utilizados são do período de 20 de Abril de 1981 à 29 de Junho de 2012, não existem dados no repositório para datas anteriores a estas, os eventos grifados são de de HILDCAAs precedidas por tempestades geomagnéticas, enquanto os eventos sem grifar são de casos não relacionados com tempestades.

Tabela 5.2: Tabela com a lista de eventos HILDCAA's de 1975 à 2012. Eventos grifados são HILDCAA's precedidas por tempestades geomagnéticas, enquanto os não grifados são eventos não relacionados a tempestades.

Evento	Início do Evento		Início do Evento	
	Data	UT	Data	UT
H001	1975 - 01 - 03	12 : 43	1975 - 01 - 06	0 : 56
H002	1975 - 01 - 13	1 : 23	1975 - 01 - 15	5 : 26



H003	1975 - 01 - 31	16 : 34	1975 - 02 - 02	21 : 25
H004	1975 - 02 - 10	8 : 00	1975 - 02 - 17	0 : 44
H005	1975 - 03 - 11	11 : 00	1975 - 03 - 14	0 : 18
H006	1975 - 03 - 14	3 : 07	1975 - 03 - 16	17 : 44
H007	1975 - 05 - 04	16 : 42	1975 - 05 - 07	19 : 29
H008	1975 - 06 - 01	10 : 06	1975 - 06 - 05	4 : 58
H009	1975 - 09 - 08	21 : 24	1975 - 09 - 12	18 : 06
H010	1975 - 10 - 06	3 : 46	1975 - 10 - 10	9 : 57
H011	1975 - 11 - 29	6 : 18	1975 - 12 - 02	4 : 47
H012	1978 - 03 - 16	11 : 41	1978 - 03 - 19	6 : 55
H013	1978 - 05 - 10	20 : 19	1978 - 05 - 13	3 : 20
H014	1979 - 01 - 25	7 : 58	1979 - 01 - 27	10 : 36
H015	1979 - 05 - 23	18 : 40	1979 - 05 - 26	7 : 02
H016	1979 - 06 - 22	10 : 58	1979 - 06 - 24	12 : 34
H017	1981 - 04 - 20	9 : 47	1981 - 04 - 23	22 : 58
H018	1982 - 01 - 21	23 : 43	1982 - 01 - 25	0 : 27
H019	1982 - 02 - 17	6 : 09	1982 - 02 - 21	2 : 00
H020	1982 - 02 - 23	10 : 11	1982 - 02 - 25	22 : 49
H021	1982 - 06 - 19	4 : 02	1982 - 06 - 21	15 : 02
H022	1982 - 08 - 25	0 : 59	1982 - 08 - 27	1 : 21
H023	1982 - 12 - 27	20 : 18	1982 - 12 - 30	12 : 09
H024	1983 - 03 - 18	15 : 57	1983 - 03 - 21	6 : 57
H025	1983 - 03 - 31	8 : 06	1983 - 04 - 03	13 : 18
H026	1983 - 04 - 05	23 : 55	1983 - 04 - 11	8 : 55
H027	1983 - 06 - 17	11 : 44	1983 - 06 - 20	17 : 19
H028	1983 - 07 - 16	17 : 34	1983 - 07 - 19	22 : 25
H029	1983 - 08 - 23	9 : 00	1983 - 08 - 26	21 : 39
H030	1983 - 08 - 29	9 : 11	1983 - 09 - 01	5 : 38
H031	1983 - 12 - 05	2 : 39	1983 - 12 - 07	4 : 31
H032	1983 - 12 - 13	8 : 53	1983 - 12 - 15	18 : 45
H033	1983 - 12 - 30	3 : 49	1984 - 01 - 01	23 : 59
H034	1984 - 05 - 28	7 : 22	1984 - 05 - 31	2 : 13
H035	1984 - 06 - 18	8 : 06	1984 - 06 - 20	17 : 59
H036	1984 - 07 - 16	18 : 28	1984 - 07 - 19	15 : 11
H037	1984 - 08 - 28	5 : 34	1984 - 08 - 31	3 : 32
H038	1984 - 10 - 09	14 : 37	1984 - 10 - 13	4 : 08
H039	1984 - 11 - 19	14 : 13	1984 - 11 - 21	22 : 58
H040	1984 - 12 - 15	20 : 03	1984 - 12 - 18	19 : 00
H041	1984 - 12 - 28	6 : 34	1984 - 12 - 31	23 : 29
H042	1985 - 06 - 06	11 : 11	1985 - 06 - 08	13 : 06
H043	1985 - 06 - 27	6 : 45	1985 - 06 - 30	0 : 41
H044	1985 - 07 - 03	22 : 59	1985 - 07 - 07	16 : 44
H045	1986 - 01 - 27	2 : 35	1986 - 01 - 31	6 : 01
H046	1986 - 02 - 21	16 : 23	1986 - 02 - 25	22 : 18
H047	1986 - 05 - 30	17 : 34	1986 - 06 - 02	9 : 34
H048	1986 - 08 - 21	7 : 45	1986 - 08 - 24	9 : 59
H049	1986 - 08 - 28	23 : 24	1986 - 08 - 31	7 : 05
H050	1986 - 12 - 22	13 : 14	1986 - 12 - 24	14 : 42
H051	1987 - 08 - 30	15 : 24	1987 - 09 - 02	14 : 07
H052	1987 - 09 - 13	20 : 58	1987 - 09 - 17	10 : 25

H053	1987 - 10 - 13	5 : 18	1987 - 10 - 15	23 : 11
H054	1987 - 10 - 26	23 : 30	1987 - 10 - 30	14 : 33
H055	1988 - 03 - 27	15 : 18	1988 - 03 - 30	8 : 19
H056	1990 - 02 - 28	2 : 02	1990 - 03 - 02	23 : 11
H057	1990 - 10 - 10	23 : 20	1990 - 10 - 13	9 : 37
H058	1991 - 06 - 01	19 : 33	1991 - 06 - 04	1 : 22
H059	1991 - 07 - 18	11 : 26	1991 - 07 - 23	19 : 36
H060	1991 - 08 - 31	3 : 06	1991 - 09 - 02	18 : 19
H061	1991 - 09 - 03	3 : 49	1991 - 09 - 06	18 : 54
H062	1992 - 07 - 12	4 : 25	1992 - 07 - 14	19 : 24
H063	1992 - 09 - 06	12 : 10	1992 - 09 - 08	18 : 50
H064	1992 - 10 - 27	23 : 05	1992 - 10 - 29	23 : 11
H065	1992 - 12 - 07	20 : 40	1992 - 12 - 10	1 : 31
H066	1993 - 01 - 01	22 : 02	1993 - 01 - 05	13 : 42
H067	1993 - 04 - 20	1 : 41	1993 - 04 - 22	7 : 52
H068	1993 - 06 - 23	18 : 51	1993 - 06 - 26	4 : 41
H069	1993 - 11 - 04	20 : 58	1993 - 11 - 09	5 : 10
H070	1993 - 12 - 16	9 : 24	1993 - 12 - 18	19 : 07
H071	1994 - 01 - 11	15 : 19	1994 - 01 - 15	8 : 59
H072	1994 - 01 - 15	11 : 39	1994 - 01 - 20	0 : 46
H073	1994 - 02 - 07	1 : 39	1994 - 02 - 16	5 : 58
H074	1994 - 03 - 07	23 : 24	1994 - 03 - 18	8 : 45
H075	1994 - 04 - 04	8 : 15	1994 - 04 - 15	19 : 17
H076	1994 - 05 - 14	20 : 47	1994 - 05 - 17	14 : 02
H077	1994 - 07 - 15	19 : 41	1994 - 07 - 18	15 : 12
H078	1994 - 09 - 08	15 : 29	1994 - 09 - 12	0 : 43
H079	1994 - 10 - 09	23 : 45	1994 - 10 - 12	13 : 50
H080	1994 - 10 - 30	2 : 38	1994 - 11 - 02	22 : 53
H081	1994 - 12 - 23	23 : 24	1994 - 12 - 26	6 : 54
H082	1995 - 01 - 02	14 : 13	1995 - 01 - 06	0 : 11
H083	1995 - 02 - 02	0 : 49	1995 - 02 - 04	20 : 29
H084	1995 - 02 - 12	15 : 48	1995 - 02 - 14	21 : 05
H085	1995 - 05 - 30	2 : 53	1995 - 06 - 04	1 : 48
H086	1995 - 10 - 06	2 : 23	1995 - 10 - 08	22 : 59
H087	1996 - 03 - 12	2 : 04	1996 - 03 - 14	2 : 58
H088	1996 - 04 - 18	9 : 34	1996 - 04 - 21	5 : 01
h089	1996 - 08 - 28	3 : 54	1996 - 08 - 30	9 : 02
H090	1996 - 09 - 19	15 : 57	1996 - 09 - 22	18 : 27
H091	1998 - 04 - 24	17 : 11	1998 - 04 - 27	16 : 46
H092	1998 - 07 - 22	20 : 56	1998 - 07 - 25	12 : 32
H093	1999 - 03 - 30	6 : 32	1999 - 04 - 01	6 : 58
H094	1999 - 04 - 29	9 : 48	1999 - 05 - 03	19 : 35
H095	1999 - 08 - 31	15 : 30	1999 - 09 - 02	20 : 10
H096	1999 - 10 - 23	13 : 20	1999 - 10 - 25	19 : 08
H097	1999 - 12 - 03	9 : 59	1999 - 12 - 05	23 : 58
H098	1999 - 12 - 30	20 : 01	2000 - 01 - 03	4 : 04
H099	2000 - 01 - 27	18 : 06	2000 - 01 - 31	3 : 02
H100	2000 - 02 - 05	15 : 53	2000 - 02 - 08	5 : 26
H101	2000 - 02 - 24	2 : 42	2000 - 02 - 26	2 : 53
H102	2001 - 07 - 15	6 : 19	2001 - 07 - 17	6 : 50

H103	2002 - 07 - 22	1 : 35	2002 - 07 - 24	2 : 20
H104	2002 - 09 - 11	5 : 22	2002 - 09 - 13	13 : 16
H105	2002 - 11 - 29	12 : 05	2002 - 12 - 02	1 : 34
H106	2003 - 04 - 20	15 : 45	2003 - 04 - 23	2 : 01
H107	2003 - 04 - 24	5 : 06	2003 - 04 - 28	11 : 05
H108	2003 - 05 - 05	8 : 50	2003 - 05 - 09	16 : 59
H109	2003 - 05 - 13	4 : 31	2003 - 05 - 16	3 : 50
H110	2003 - 06 - 26	21 : 14	2003 - 06 - 30	22 : 16
H111	2003 - 07 - 03	8 : 47	2003 - 07 - 06	6 : 00
H112	2003 - 08 - 20	15 : 11	2003 - 08 - 24	15 : 43
H113	2003 - 09 - 15	21 : 02	2003 - 09 - 20	22 : 03
H114	2003 - 09 - 23	23 : 31	2003 - 09 - 26	2 : 36
H115	2003 - 10 - 15	3 : 28	2003 - 10 - 22	18 : 35
H116	2003 - 12 - 09	2 : 48	2003 - 12 - 16	4 : 02
H117	2004 - 01 - 02	8 : 24	2004 - 01 - 06	11 : 11
H118	2004 - 02 - 12	1 : 35	2004 - 02 - 15	11 : 36
H119	2004 - 09 - 15	19 : 49	2004 - 09 - 18	5 : 39
H120	2005 - 05 - 15	17 : 08	2005 - 05 - 18	16 : 03
H121	2005 - 08 - 05	22 : 19	2005 - 08 - 07	22 : 54
H122	2005 - 11 - 03	10 : 33	2005 - 11 - 05	11 : 58
H123	2006 - 03 - 18	5 : 25	2006 - 03 - 20	11 : 19
H124	2006 - 06 - 06	6 : 02	2006 - 06 - 10	6 : 28
H125	2006 - 10 - 13	15 : 17	2006 - 10 - 16	0 : 16
H126	2006 - 10 - 28	14 : 15	2006 - 10 - 30	16 : 27
H127	2006 - 12 - 06	0 : 00	2006 - 12 - 08	21 : 49
H128	2007 - 01 - 29	14 : 02	2007 - 01 - 31	14 : 14
H129	2007 - 02 - 27	15 : 31	2007 - 03 - 01	17 : 07
H130	2007 - 09 - 01	16 : 31	2007 - 09 - 03	17 : 10
H131	2008 - 02 - 28	9 : 23	2008 - 03 - 01	23 : 42
H132	2011 - 04 - 30	18 : 04	2011 - 05 - 03	4 : 56
H133	2011 - 09 - 11	12 : 17	2011 - 09 - 13	12 : 42
H134	2012 - 05 - 08	21 : 22	2012 - 05 - 11	6 : 35
H135	2012 - 06 - 04	3 : 06	2012 - 06 - 06	6 : 10
H136	2012 - 06 - 29	21 : 08	2012 - 07 - 02	21 : 01

A análise de quantificação de recorrência, da qual são extraídas as medidas de quantificação de recorrência (MQR) para cada evento, foi realizada por da meio da versão em linha de comando da ferramenta TOCSY - *Toolbox for Complex Systems pelo Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) software 1.13z* (disponível em (<http://tocsy.pik-potsdam.de/commandline-rp.php>) acesso em 26/02/2015).

## Capítulo 6

# Experimentos e Resultados

Para exemplificar os experimentos feitos, duas situações diferentes de HILDCAA's são mostrados nas Figuras 6.3 e 6.4. Na Figura 6.3 temos um caso de HILDCAA precedida por tempestade, ocorrido entre os dias 29 de Novembro e 02 de Dezembro de 2002, e na Figura 6.4 sem tempestade precedendo a HILDCAA, que ocorreu entre os dias 05 e 09 de Maio de 2003. Para calcular o gráfico de recorrência e a medidas de quantificação de recorrência utilizamos apenas um número de registros centrais de cada dado, o número de registros corresponde ao caso de HILDCAA da Tabela 5.2 que tem o menor número de registros. O gráfico de recorrência gerado para os índices AE, AL e AU de HILDCAA precedida por tempestade é mostrado na Figura 6.1, e para HILDCAA não precedida por tempestade em 6.2, assim como as suas medidas de quantificação de recorrência para os índices AL, AL e AU nas Tabelas 6, 6 e 6 respectivamente.

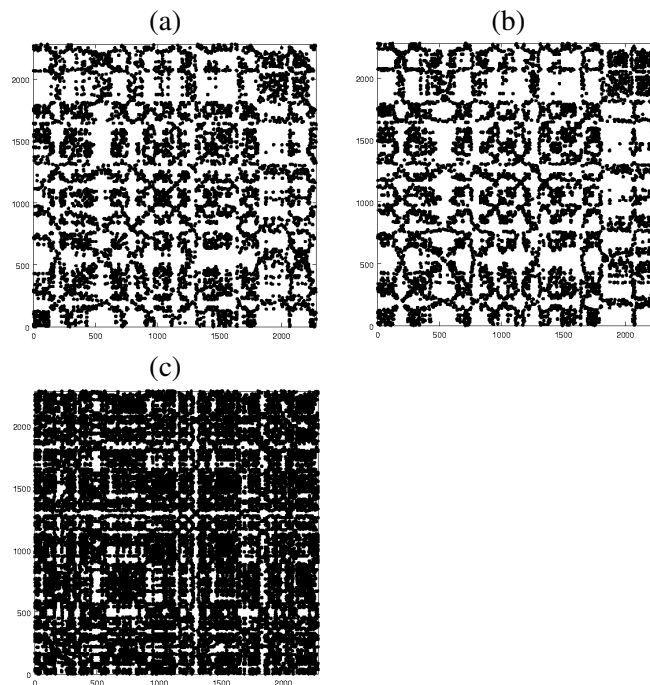


Figura 6.1: Gráfico de recorrência dos índices AE, AL e AU para um caso de HILDCAA precedido por tempestade, ocorrido nos dias 29 de Novembro à 02 de Dezembro de 2002(H105). Em que (a) Índice AE, (b) Índice AL e (c) Índice AU.

Tabela 6.1: Tabela de RQA para o índice AE dos eventos ocorridos em 29 de Novembro à 02 de Dezembro de 2002(H105) e 05 à 09 de Maio de 2003(H108)

	RR	DET	DET/RR	LAM	LAM/DET	$L_{max}$	$L$	$L_{entr}$	DIV	
H105	0.001795	0.031	17	0.04884	1.6	4	2.0	0.1461	0.25	
H108	0.000992	0.018	18	0.02746	1.5	2	2.0	-0	0.50	
	$V_{max}$	TT	$V_{entr}$	T1	T2	$W_{max}$	$W_{mean}$	$W_{entr}$	$W_{prob}$	$F_{min}$
H105	5	2.14	0.341466	337	350	2036	321	6.2	2	0.0004
H108	3	2.04	0.171411	439	449	2125	408	6.3	3	0.0004

Tabela 6.2: Tabela de RQA para o índice AL dos eventos ocorridos em 29 de Novembro à 02 de Dezembro de 2002(H105) e 05 à 09 de Maio de 2003(H108)

	RR	DET	DET/RR	LAM	LAM/DET	$L_{max}$	$L$	$L_{entr}$	DIV	
H105	0.002022	0.035	17	0.05612	1.6	3	2.1	0.2094	0.33	
H108	0.001479	0.025	16	0.02764	1.1	2	2.0	-0.0001	0.50	
	$V_{max}$	TT	$V_{entr}$	T1	T2	$W_{max}$	$W_{mean}$	$W_{entr}$	$W_{prob}$	$F_{min}$
H105	4	2.12	0.380797	316	329	1968	301	6.1	1	0.0005
H108	2	2.00	-0	346	353	2167	331	6.2	1	0.0004

Tabela 6.3: Tabela de RQA para o índice AU dos eventos ocorridos em 29 de Novembro à 02 de Dezembro de 2002(H105) e 05 à 09 de Maio de 2003(H108)

	RR	DET	DET/RR	LAM	LAM/DET	$L_{max}$	$L$	$L_{entr}$	DIV	
H105	0.007452	0.065	9	0.11612	1.8	4	2.1	0.2258	0.25	
H108	0.002680	0.033	12	0.05096	1.5	3	2.0	0.1490	0.33	
	$V_{max}$	TT	$V_{entr}$	T1	T2	$W_{max}$	$W_{mean}$	$W_{entr}$	$W_{prob}$	$F_{min}$
H105	4	2.13	0.382454	117	125	1549	120	5.5	1	0.0006
H108	3	2.03	0.127759	247	256	2121	233	6.0	1	0.0004

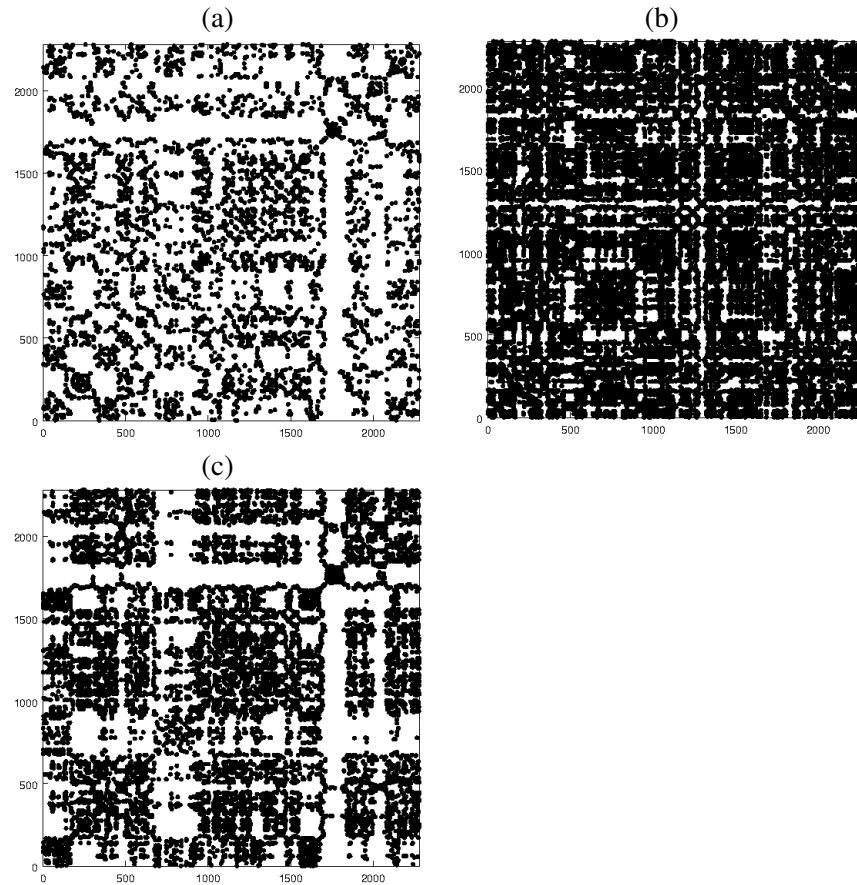


Figura 6.2: Gráfico de recorrência dos índices AE, AL e AU para um caso de HILDCAA não precedido por tempestade, ocorrido nos dias 05 à 09 de Maio de 2003(H108). Em que (a) Índice AE, (b) Índice AL e (c) Índice AU.

## 6.1 Tabela de Casos de HILDCAA

Nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 é mostrado o valor da medida de quantificação de recorrência calculados para os índices AE, AL e AU respectivamente.

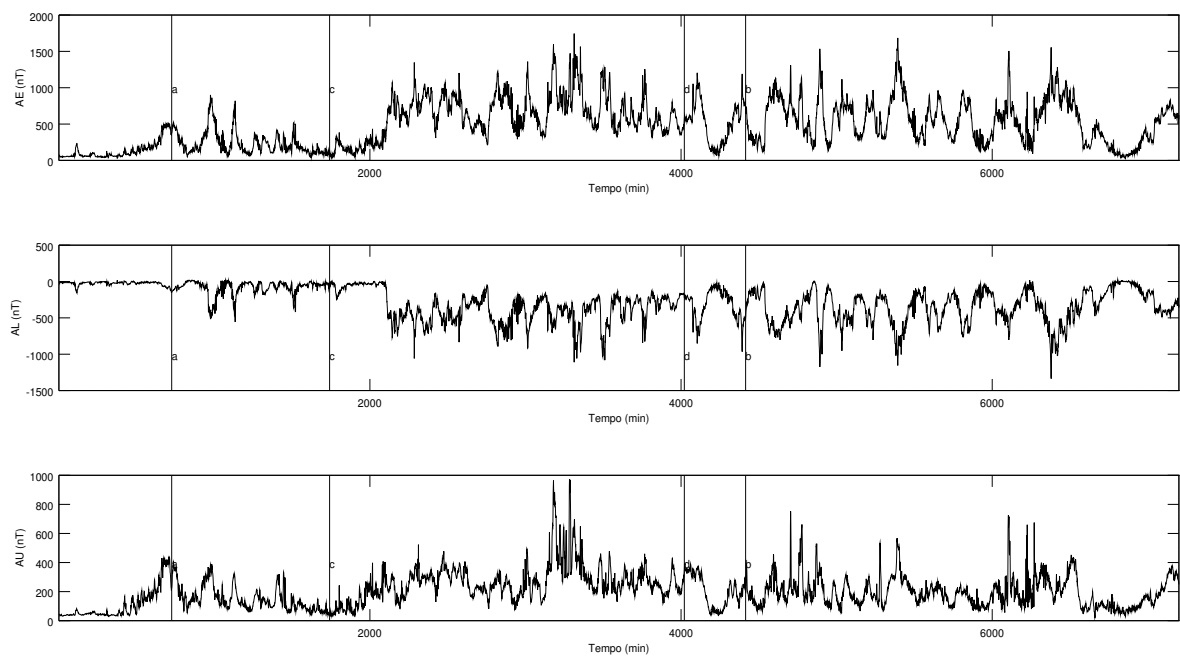


Figura 6.3: Gráfico dos índices AE, AL e AU para os dias 29 de Novembro à 02 de Dezembro de 2002(H105), um caso de HILDCAA precedido por tempestade. O trecho entre as linhas verticais a-b se referem a o período em que aconteceu a HILDCAA, e entre c-d o trecho que foi utilizado para criar o gráfico de recorrência e calcular os valores de RQA .

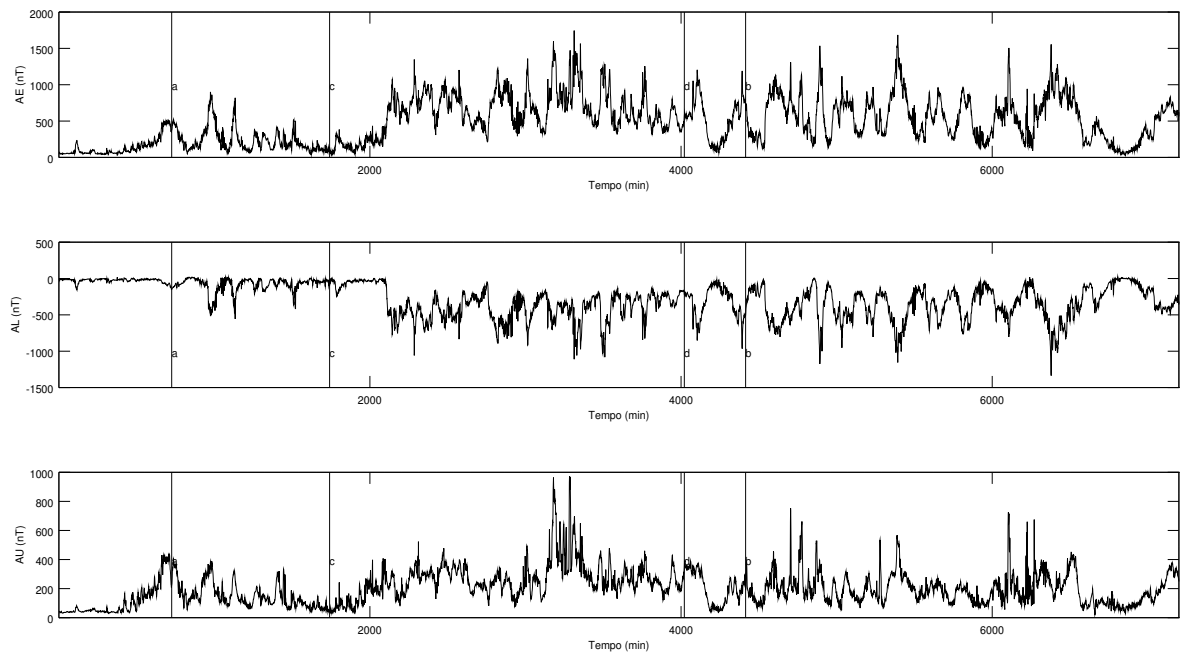


Figura 6.4: Gráfico dos índices AE, AL e AU para os dias 05 à 09 de Maio de 2003(H108), para um caso de HILDCAA não precedido por tempestade. O trecho entre as linhas verticais a-b se referem a o período em que aconteceu a HILDCAA, e entre c-d o trecho que foi utilizado para criar o gráfico de recorrência e calcular os valores de RQA .





Tabela 6.4 – Continuação da página anterior

RR	DET	DET/RR	LAM	LAM/DET	L <sub>max</sub>	L	L <sub>entr</sub>	DIV	V <sub>max</sub>	TT	V <sub>entr</sub>	T1	T2	W <sub>max</sub>	W <sub>mean</sub>	W <sub>entr</sub>	W <sub>prob</sub>	F <sub>min</sub>	
H085	0.001334	0.030	21	0.05224	1.8	2.0	0.1162	0.33	3	2.05	0.187691	563	581	6448	546	6.9	1	0.0001	
H086	0.001331	0.033	23	0.05571	1.7	3	2.0	0.1396	0.33	3	2.02	0.0789981	482	501	4094	467	6.7	2	0.0002
H087	0.002123	0.036	16	0.05455	1.5	3	2.0	0.1006	0.33	4	2.10	0.327832	332	344	3451	319	6.3	1	0.0002
H088	0.001442	0.040	26	0.05851	1.5	3	2.0	0.1616	0.33	3	2.03	0.126931	409	426	3442	391	6.4	1	0.0002
H089	0.001448	0.034	22	0.05089	1.5	3	2.0	0.0761	0.33	3	2.03	0.123541	425	440	3203	410	6.4	1	0.0003
H090	0.001030	0.024	22	0.04994	2.1	3	2.0	0.0775	0.33	4	2.04	0.157956	580	601	4255	558	6.8	1	0.0002
H091	0.001257	0.034	25	0.05680	1.7	3	2.0	0.1499	0.33	4	2.11	0.358919	522	543	3861	495	6.7	1	0.0002
H092	0.001301	0.025	18	0.04174	1.7	3	2.0	0.1679	0.33	3	2.01	0.0417547	453	465	3867	431	6.6	1	0.0003
H093	0.001410	0.040	27	0.05528	1.4	3	2.0	0.0815	0.33	3	2.05	0.207086	430	448	2643	409	6.4	1	0.0003
H094	0.001593	0.038	23	0.06029	1.6	4	2.0	0.1521	0.25	3	2.07	0.249361	460	477	6187	449	6.7	1	0.0001
H095	0.001388	0.038	26	0.06393	1.7	3	2.0	0.0731	0.33	4	2.10	0.320616	353	370	3225	337	6.3	1	0.0003
H096	0.001228	0.023	17	0.03500	1.5	2	2.0	-0.0001	0.50	3	2.06	0.224406	477	489	3225	443	6.5	1	0.0003
H097	0.001415	0.027	18	0.05156	1.9	3	2.0	0.1297	0.33	3	2.06	0.229898	468	484	3694	445	6.6	1	0.0002
H098	0.001423	0.023	15	0.03271	1.4	3	2.0	0.0560	0.33	3	2.04	0.177397	456	466	4316	430	6.7	1	0.0002
H099	0.001402	0.025	17	0.04251	1.7	3	2.0	0.1096	0.33	3	2.05	0.188113	490	504	3658	464	6.7	1	0.0002
H100	0.001280	0.025	19	0.04661	1.8	3	2.0	0.1754	0.33	4	2.09	0.31034	511	529	3565	480	6.6	2	0.0002
H101	0.001563	0.021	12	0.04362	2.1	2	2.0	-0.0001	0.50	3	2.02	0.110453	395	407	2798	364	6.4	2	0.0003
H102	0.001683	0.058	33	0.08725	1.5	3	2.1	0.2175	0.33	3	2.06	0.226534	359	381	2670	355	6.2	1	0.0003
H103	0.001500	0.043	28	0.05810	1.3	3	2.0	0.0398	0.33	3	2.02	0.0877923	371	385	2947	362	6.3	1	0.0003
H104	0.001432	0.040	26	0.05188	1.3	3	2.0	0.1326	0.33	4	2.11	0.348599	409	424	3407	394	6.4	1	0.0002
H105	0.001716	0.033	18	0.05698	1.8	4	2.0	0.1315	0.25	5	2.06	0.171882	404	419	3702	386	6.5	2	0.0002
H106	0.001225	0.035	27	0.05424	1.5	3	2.0	0.1515	0.33	3	2.05	0.19242	515	535	3427	480	6.5	1	0.0002
H107	0.001011	0.033	31	0.05889	1.8	4	2.0	0.1463	0.25	3	2.03	0.142786	618	643	5556	587	6.9	1	0.0001
H108	0.000954	0.020	20	0.03167	1.6	4	2.0	0.1092	0.25	5	2.09	0.269206	684	699	5977	637	7.0	1	0.0001
H109	0.001410	0.022	14	0.03869	1.8	2	2.0	-0.0001	0.50	2	2.00	-	483	495	4040	464	6.7	1	0.0002
H110	0.001367	0.027	18	0.02968	1.1	3	2.0	0.1272	0.33	3	2.01	0.0607713	531	541	5804	505	6.8	2	0.0001
H111	0.001477	0.033	21	0.05160	1.6	4	2.0	0.1518	0.25	3	2.05	0.190218	449	464	3364	426	6.6	2	0.0002
H112	0.001018	0.020	18	0.03089	1.5	3	2.0	0.0851	0.33	3	2.02	0.0829231	659	672	5687	621	7.0	1	0.0001
H113	0.000976	0.017	16	0.02303	1.4	3	2.0	0.0880	0.33	3	2.03	0.124715	729	740	7054	688	7.1	1	0.0001
H114	0.001311	0.015	11	0.02840	1.8	2	2.0	-0.0001	0.50	3	2.02	0.0822101	449	458	3098	420	6.5	1	0.0003
H115	0.001015	0.020	19	0.02685	1.3	4	2.0	0.1092	0.25	3	2.02	0.110151	778	791	10603	750	7.3	1	0.0000
H116	0.001187	0.017	13	0.02611	1.6	3	2.0	0.0134	0.33	3	2.04	0.154568	655	665	8769	633	7.2	1	0.0001
H117	0.001548	0.027	17	0.05319	2.0	3	2.0	0.1102	0.33	3	2.04	0.154702	500	517	5476	485	6.8	1	0.0001
H118	0.001387	0.019	13	0.02809	1.4	3	2.0	0.0355	0.33	3	2.04	0.176649	525	534	4518	496	6.8	1	0.0002
H119	0.001410	0.033	22	0.04902	1.5	3	2.0	0.0990	0.33	3	2.04	0.170823	451	466	3133	427	6.6	1	0.0003
H120	0.001555	0.026	16	0.05164	2.0	3	2.0	0.1016	0.33	3	2.04	0.172332	412	426	3850	402	6.6	1	0.0002
H121	0.001230	0.042	32	0.04660	1.1	2	2.0	-0.0001	0.50	3	2.02	0.0804848	443	459	2823	409	6.4	1	0.0003
H122	0.001745	0.030	16	0.04717	1.6	3	2.0	0.0847	0.33	3	2.02	0.0922161	328	338	2841	315	6.3	1	0.0003
H123	0.001221	0.024	18	0.03623	1.5	2	2.0	-0.0001	0.50	3	2.01	0.0465944	494	507	3285	459	6.6	1	0.0003
H124	0.001566	0.039	24	0.06234	1.6	3	2.0	0.1158	0.33	3	2.03	0.133729	441	459	4017	431	6.7	2	0.0002
H125	0.001684	0.040	23	0.06423	1.6	3	2.0	0.0950	0.33	3	2.03	0.135003	365	381	3153	349	6.4	1	0.0003
H126	0.001419	0.032	22	0.04850	1.5	3	2.0	0.1861	0.33	4	2.07	0.267835	347	360	2725	329	6.3	1	0.0003
H127	0.001315	0.027	19	0.04920	1.8	2	2.0	-0.0001	0.50	3	2.04	0.182994	512	529	3799	478	6.7	2	0.0002
H128	0.001508	0.018	11	0.03677	2.0	2	2.0	-0.0001	0.50	2	2.00	-	382	392	2629	354	6.4	1	0.0003
H129	0.001454	0.029	19	0.04595	1.6	3	2.0	0.1326	0.33	3	2.02	0.116907	444	459	3016	413	6.5	1	0.0003
H130	0.001612	0.033	19	0.05489	1.7	3	2.0	0.1452	0.33	3	2.05	0.198148	401	416	2986	379	6.4	1	0.0003
H131	0.001259	0.027	20	0.04240	1.6	3	2.0	0.1146	0.33	3	2.03	0.118771	517	533	3646	479	6.6	2	0.0002
H132	0.001436	0.034	22	0.05278	1.6	2	2.0	-0.0001	0.50	3	2.06	0.223035	468	486	3007	440	6.6	1	0.0003
H133	0.001222	0.025	19	0.04079	1.7	3	2.1	0.2286	0.33	3	2.03	0.140515	440	454	2602	402	6.4	2	0.0003
H134	0.001460	0.042	27	0.05765	1.4	3	2.0	0.1590	0.33	3	2.01	0.0538017	431	449	3466	416	6.4	1	0.0002
H135	0.001477	0.040	26	0.05592	1.4	3	2.0	0.1723	0.33	3	2.02	0.114446	393	409	2850	380	6.4	1	0.0003
H136	0.001210	0.030	23	0.04969	1.7	4	2.0	0.1843	0.25	3	2.02	0.0852218	561	579	3697	532	6.8	2	0.0002







Tabela 6.6 – Continuação da página anterior

RR	DEI	DE/RR	LAM	LAM/DET	L <sub>max</sub>	L	L <sub>entr</sub>	DIV	V <sub>max</sub>	TI	V <sub>entr</sub>	T1	T2	W <sub>max</sub>	W <sub>mean</sub>	W <sub>entr</sub>	W <sub>prob</sub>	F <sub>min</sub>	
H094	0.005147	0.091	17	0.15385	1.7	2.1	0.2681	0.20	6	2.11	0.362517	163	179	5379	173	5.8	1	0.0001	
H095	0.003633	0.088	23	0.13888	1.6	5	2.1	0.3113	0.20	3	2.09	0.304147	190	207	2753	195	5.8	1	0.0003
H096	0.005136	0.057	10	0.08826	1.6	4	2.0	0.1841	0.25	4	2.07	0.249451	163	171	2940	163	5.8	1	0.0003
H097	0.005194	0.057	10	0.10098	1.8	4	2.0	0.1809	0.25	4	2.06	0.225039	160	169	3426	163	5.8	1	0.0002
H098	0.004865	0.050	10	0.07670	1.5	4	2.0	0.1610	0.25	4	2.07	0.2575	166	173	3038	167	5.8	1	0.0003
H099	0.005260	0.048	9	0.07802	1.6	4	2.0	0.1409	0.25	4	2.07	0.259126	153	160	3928	154	5.8	1	0.0002
H100	0.004607	0.056	12	0.08207	1.5	5	2.0	0.1580	0.20	5	2.07	0.252882	179	188	2192	179	5.9	1	0.0004
H101	0.005734	0.060	10	0.10657	1.8	4	2.1	0.2191	0.25	3	2.09	0.296279	130	139	1494	132	5.6	1	0.0004
H102	0.004373	0.116	26	0.17103	1.5	4	2.1	0.3311	0.25	5	2.10	0.34065	170	190	2111	182	5.6	1	0.0004
H103	0.003570	0.082	22	0.14103	1.7	4	2.1	0.2754	0.25	4	2.08	0.292996	207	226	2300	215	5.8	1	0.0004
H104	0.003767	0.086	22	0.12912	1.5	5	2.1	0.2439	0.20	6	2.15	0.431188	204	221	3400	210	5.8	1	0.0002
H105	0.006734	0.067	9	0.11247	1.7	4	2.1	0.2202	0.25	4	2.11	0.361514	128	137	2929	132	5.6	1	0.0003
H106	0.003205	0.074	22	0.11311	1.5	4	2.1	0.2407	0.25	4	2.12	0.370232	232	249	2828	233	5.9	1	0.0003
H107	0.002520	0.078	30	0.12934	1.7	4	2.1	0.2560	0.25	5	2.14	0.423003	285	309	4904	294	6.2	1	0.0002
H108	0.002717	0.037	13	0.06415	1.7	4	2.0	0.1536	0.25	3	2.05	0.185188	308	320	5819	306	6.4	1	0.0001
H109	0.004022	0.044	10	0.07455	1.7	4	2.0	0.0997	0.25	3	2.06	0.218538	203	212	3224	204	6.1	1	0.0003
H110	0.003580	0.051	14	0.08514	1.7	4	2.0	0.1736	0.25	3	2.06	0.234901	228	239	3346	231	6.1	1	0.0002
H111	0.004049	0.059	14	0.07975	1.4	4	2.0	0.1815	0.25	4	2.06	0.220312	199	208	3902	199	6.0	1	0.0002
H112	0.003342	0.044	13	0.07366	1.7	4	2.0	0.1151	0.25	4	2.07	0.27027	246	257	4528	247	6.2	1	0.0002
H113	0.003314	0.041	12	0.06649	1.6	4	2.0	0.1326	0.25	3	2.04	0.176043	239	248	6312	240	6.2	1	0.0001
H114	0.004408	0.042	9	0.06046	1.5	4	2.0	0.0963	0.25	3	2.02	0.085704	176	183	2400	173	5.9	1	0.0004
H115	0.004080	0.045	10	0.06924	1.5	4	2.0	0.1486	0.25	4	2.05	0.185445	224	233	9965	228	6.2	1	0.0001
H116	0.004980	0.033	6	0.06081	1.8	5	2.0	0.1261	0.20	4	2.06	0.226067	183	190	9082	186	6.1	2	0.0001
H117	0.005733	0.054	9	0.08443	1.6	4	2.0	0.1655	0.25	4	2.07	0.2686	152	159	3924	155	5.8	1	0.0002
H118	0.005151	0.048	9	0.08164	1.7	4	2.0	0.1311	0.25	3	2.06	0.219205	171	179	4908	173	5.9	1	0.0002
H119	0.005165	0.065	12	0.10152	1.6	5	2.1	0.2298	0.20	6	2.14	0.422999	161	172	2836	164	5.8	1	0.0003
H120	0.004092	0.064	15	0.10504	1.6	4	2.1	0.2244	0.25	5	2.12	0.377561	201	214	3839	206	6.0	1	0.0002
H121	0.003902	0.070	17	0.12128	1.7	4	2.1	0.2312	0.25	3	2.07	0.265314	192	207	2282	195	5.9	1	0.0004
H122	0.005922	0.057	9	0.10596	1.9	5	2.1	0.2014	0.20	3	2.08	0.283244	136	145	2813	139	5.6	1	0.0003
H123	0.004145	0.054	12	0.09044	1.7	5	2.0	0.1738	0.20	4	2.07	0.240412	192	203	2554	192	5.9	1	0.0003
H124	0.004417	0.089	19	0.14153	1.6	5	2.1	0.2593	0.20	6	2.16	0.459777	173	189	4032	183	5.8	1	0.0002
H125	0.005975	0.080	13	0.12792	1.6	5	2.1	0.2418	0.20	3	2.07	0.248423	128	138	1921	133	5.5	1	0.0005
H126	0.004396	0.061	13	0.12812	2.1	4	2.1	0.2166	0.25	4	2.06	0.238799	152	164	2802	156	5.7	1	0.0003
H127	0.003879	0.059	14	0.08967	1.5	4	2.0	0.1697	0.25	4	2.09	0.288573	209	220	3009	210	6.0	1	0.0003
H128	0.006007	0.046	7	0.08917	2.0	3	2.0	0.1247	0.33	3	2.07	0.245319	134	141	2448	135	5.7	1	0.0004
H129	0.005838	0.082	13	0.13384	1.6	4	2.1	0.2369	0.25	5	2.17	0.471585	137	148	2670	142	5.5	1	0.0003
H130	0.005859	0.086	14	0.13818	1.6	3	2.1	0.2301	0.33	4	2.11	0.366022	136	148	1811	141	5.5	1	0.0005
H131	0.004276	0.063	14	0.10446	1.7	4	2.1	0.2248	0.25	3	2.07	0.258375	178	189	2680	180	5.8	1	0.0003
H132	0.004410	0.071	15	0.11013	1.5	4	2.0	0.1727	0.25	3	2.06	0.221861	189	201	2169	193	5.9	1	0.0004
H133	0.004346	0.057	12	0.09419	1.7	3	2.0	0.1734	0.33	3	2.04	0.161965	156	165	2231	155	5.7	1	0.0004
H134	0.003578	0.091	25	0.12052	1.3	4	2.1	0.2644	0.25	5	2.16	0.455844	203	219	2418	207	5.8	1	0.0004
H135	0.004075	0.080	19	0.13278	1.7	4	2.1	0.2340	0.25	4	2.09	0.318289	196	212	2823	201	5.9	1	0.0003
H136	0.005081	0.075	23	0.14052	1.9	4	2.1	0.2535	0.25	4	2.11	0.34619	264	288	3541	273	6.1	1	0.0002

## Capítulo 7

### Comentários finais

Este trabalho de iniciação científica, para introdução às áreas de pesquisas espaciais, iniciou-se em janeiro de 2015. Em um tempo curto, até julho de 2015, foi possível o entendimento básico de fenômeno eletrodinâmico de interesse - as perturbações geomagnéticas, a introdução ao estudo de ferramentas para o estudo de comportamentos de processos dinâmicos não lineares, e a obtenção de primeiros resultados ilustrativos.

Essa parte inicial acrescida das devidas revisões de qualificação dos cálculos, que se daria em etapa seguinte, iria propiciar a atividade de análise considerando o regime de tempestades complexas.

Como resultados, houve o treino com sucesso da estudante com foco em desempenho de excelência e também uma tabulação embrionária de resultados, que quantificam ilustrativamente o comportamento dos sinais relacionados ao sistema eletrodinâmico de acoplamento do plasma do vento solar e a magnetosfera terrestre.

## Capítulo 8

# Referências Bibliográficas

- [1] Fernando L Guarnieri, Bruce T Tsurutani, Walter D Gonzalez, Ezequiel Echer, Alicia LC Gonzalez, Manuel Grande, and Finn Soraas. Icme and cir storms with particular emphasis on hildcaa events. In *ILWS Workshop*, pages 19–20, 2006.
- [2] Norbert Marwan, M Carmen Romano, Marco Thiel, and Jürgen Kurths. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5):237–329, 2007.
- [3] Odim Mendes, Aracy Mendes da Costa, and Margarete Oliveira Domingues. Introduction to planetary electrodynamics: A view of electric fields, currents and related magnetic fields. *Advances in Space Research*, 35(5):812–828, 2005.
- [4] Luiz Henrique Alves Monteiro. *Sistemas dinâmicos*. Editora Livraria da Física, 2006.
- [5] TA Potemra and LJ Zanetti. Applied physics laboratory. *Johns Hopkins Univer*, 1983.