

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - IP&D  
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

MARCUS VINICIUS CHEMELLO CARDOSO

**ESTUDO ESTATÍSTICO DAS VARIAÇÕES DE ENTROPIA DO  
CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO NO PONTO DE  
LAGRANGE L1 NOS ANOS DE 1999 A 2001**

São José dos Campos - SP

2020

MARCUS VINICIUS CHEMELLO CARDOSO

**ESTUDO ESTATÍSTICO DAS VARIACÕES DE ENTROPIA DO  
CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO NO PONTO DE  
LAGRANGE L1 NOS ANOS DE 1999 A 2001**

Exame Final de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Arian Ojeda González

São José dos Campos - SP

2020

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Cardoso, Marcus Vinicius Chemello  
Estudo estatístico das variações de entropia do campo magnético interplanetário no ponto de Lagrange L1 nos anos de 1999 a 2001 / Marcus Vinicius Chemello Cardoso; orientador, Arian Ojeda González. - São José dos Campos, SP, 2020.  
1 CD-ROM, 80 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

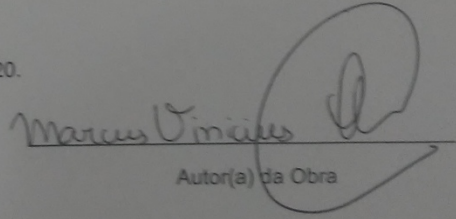
1. Física e Astronomia. 2. Distúrbios interplanetários (DIs). 3. Entropia. 4. Ondas de Alfvén. 5. Vento solar. I. González, Arian Ojeda, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. III. Título.

Eu, Marcus Vinicius Chemello Cardoso, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 1 de Setembro de 2020.

  
Autor(a) da Obra

Data da defesa: 10 / 03 / 2020

---

**MARCUS VINICIUS CHEMELLO CARDOSO**

**“ESTUDO ESTATÍSTICO DAS VARIAÇÕES DE ENTROPIA DO CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO NO PONTO DE LAGRANGE L1 NOS ANOS DE 1999 A 2001”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. ALAN PRESTES Alan Prestes  
PROF. DR. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ Arian Ojeda  
PROF. DR. ALEXANDRE SOARES DE OLIVEIRA Alexandre Soares de Oliveira  
PROF. DR. ODIM MENDES JUNIOR - INPE Odin Mendes Junior

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D – Univap

São José dos Campos, 10 de março de 2020.

*Primeiramente a Deus, meu pai Toni Izidoro Cardoso minha mãe Cecília Cardoso e minha amada esposa Gisele Gonçalves Pessini Cardoso e a meu orientador Arian Ojeda González que me deu forças para que eu pudesse desenvolver a pesquisa e qualificar. Aos amigos Matheus Cristaldo, Daniela Oliveira da Silva, Fábio Ryoji Yamamoto, Carlos Menegati, Renato Machado Wilson Mota, Hildebrando Penteado, Pastora Maria Onisaki*

## **Agradecimentos**

Agradeço ao meu Professor Orientador Arian Ojeda Gonzalez o interesse, vigor e paciência no desenvolvimento do trabalho. Ao programa de bolsas Capes/Prosc modalidade 2 que me favoreceu. Muito obrigado aos membros da banca pelos aportes ao trabalho. Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo 16/25563-6, que forneceu verba para o início da pesquisa com os métodos de entropia utilizados neste trabalho, e a partir dos quais foi possível dar continuidade ao estudo apresentado nesta dissertação. Agradeço à equipe da NASA responsável pela manutenção e divulgação dos dados do satélite ACE. Agradeço ao corpo docente do PPGFA pelos ensinamentos nas respectivas disciplinas do programa. Ao IP&D e à UNIVAP por disponibilizar durante estes dois anos uma excelente infraestrutura para fazer pesquisa.

*“Eu sou o Alfa e o Ômega”, diz o Senhor Deus, “aquele que é, que era e que vem, o  
Todo-poderoso”. apocalipse 1:8.”*

## Resumo

A pesquisa teve como foco a estimativa das variações nos valores de entropia no campo magnético interplanetário no ponto de Lagrange L1 no período de 1999 a 2001, utilizando quatro métodos: Entropia Espaço-Temporal (STE), Entropia Espectral (SE), Entropia na análise de quantificação de recorrência (ENTR) e densidade de entropia em período de Recorrência (RPDE). Os dados foram colhidos do satélite ACE e com eles obtidos as séries temporais do campo magnético interplanetário (IMF) e das componentes da velocidade do vento solar. A partir dessa etapa a entropia foi calculada de cada componente do IMF, criando-se para cada método os seguintes índices:  $IE_{STE}$ ,  $IE_{SE}$ ,  $IE_{ENTR}$  e  $IE_{RPDE}$ . A obtenção destes índices possibilitou fazer uma análise estatística da entropia do ano 1999 a 2001 e separar os diferentes tipos de Distúrbios interplanetários (DIs) para estudar suas características. Neste trabalho foram identificados dezoito intervalos Alfvênicos com durabilidade maior que dois dias e vinte intervalos não-Alfvênicos também de longa duração. A correlação linear do  $IE_{STE}$  com  $IE_{SE}$ ,  $IE_{ENTR}$ , e  $IE_{RPDE}$  foi de 60,8%, -82,2% e 31,5%, respectivamente. No estudo dos DIs, o  $IE_{SE}$  e  $IE_{ENTR}$  mostraram resultados semelhantes ao  $IE_{STE}$  na caracterização dos eventos. No entanto, o  $IE_{STE}$  foi melhor para identificar ICMEs, *flux-ropes* e MCs. O  $IE_{SE}$  se mostrou melhor para estudar eventos Alfvênicos de longa duração. Dos métodos utilizados apenas o RPDE não apresentou valores do  $IE_{RPDE}$  estatisticamente significativos para caracterizar os DIs. O trabalho deixa em aberto a possibilidade de utilizar de forma automática o  $IE_{SE}$  e  $IE_{ENTR}$  para estender o estudo estatístico em outros anos. A escolha do máximo do ciclo solar 23 permitiu analisar uma quantidade estatisticamente significativa de DIs, pois num período de mínimo teríamos mais dificuldades para caracterizá-los.

**Palavras-chaves:** Distúrbios interplanetários (DIs). Entropia. Ondas de Alfvén. Campo magnético interplanetário. Vento solar.

Statistical Study of Entropy Variations of the Interplanetary Magnetic Field at  
Lagrange Point L1 in the years 1999 to 2001

**Abstract**

The research focused on estimating the variations of entropy values in the interplanetary magnetic field at the Lagrange L1 point from 1999 to 2001, by using four methods: the spatio-temporal entropy (STE), spectral entropy (SE), entropy in recurrence quantification analysis (ENTR) and recurrence period density entropy (RPDE). The data were collected from the ACE satellite and through them it were got time series of the interplanetary magnetic field (IMF) and the components of the solar wind speed. From this stage, entropy was calculated for each component of the IMF, creating the following indices for each method:  $IE_{STE}$ ,  $IE_{SE}$ ,  $IE_{ENTR}$  e  $IE_{RPDE}$ . These key figures enabled to make a statistical analysis of the entropy of the year 1999 to 2001 and separate the different types of interplanetary disturbances (DIs) to study its characteristics. At the study, eighteen Alfvénic intervals were identified with greater durability than two days and twenty non-Alfvénic intervals also of long durability. The linear correlation of  $IE_{STE}$  with  $IE_{SE}$ ,  $IE_{ENTR}$ , and  $IE_{RPDE}$  was 60,8%, -82,2% e 31,5%, respectively. The  $IE_{SE}$  and  $IE_{ENTR}$  showed results similar to  $IE_{STE}$  in characterizing events during the DIs. However,  $IE_{STE}$  was better to identify ICMEs, flux-ropes and MCs. The  $IE_{SE}$  proved to be better for studying Alfvénic events of long durability. Of the methods used, only the RPDE did not present  $IE_{RPDE}$  values statistically significant to characterize the DIs. The research open up the possibility of automatically using  $IE_{SE}$  e  $IE_{ENTR}$  to extend the statistical study in other years. The choice of the maximum of the solar cycle 23 allowed to analyze a statistically significant amount of DIs.

**Keywords:** Interplanetary disturbances (DIs). Entropy. Alfvén waves. Interplanetary magnetic field. Solar wind.

## Lista de ilustrações

- Figura 1 – O painel superior mostra no eixo das abscissas os valores de STE da componente z do campo magnético interplanetário de 20 MCs, 17 DIs excluindo as MCs e 20 períodos de vento solar calmo, no eixo das ordenadas mostra-se o valor mínimo do índice Dst para cada evento. O painel inferior representa um gráfico similar ao da direita mas para os valores de STE da componente x do vento solar. . . . . 31
- Figura 2 – O painel superior é a representação dos valores de STE das componentes do IMF em 41 MCs observadas *in situ* pelo satélite ACE entre os anos de 1998 a 2003. O painel inferior mostra os valores de STE para as respectivas bainhas magnéticas de cada uma das MCs. O principal resultado observado na figura é o valor nulo de STE em mais da metade das 41 MCs estudadas. . . . . 32
- Figura 3 – O histograma foi gerado a partir dos valores da componente  $B_z$  plotada na Figura 2. As barras pretas representam as MCs e as barras cinzas as respectivas bainhas magnéticas de cada uma das MCs. Observa-se que 29 nuvem apresentam entropia menor que 20 % e somente 1 bainha magnética encontrasse nesse intervalo. . . . . 32
- Figura 4 – Representação do modelo com campo magnético livre de força ou *magnetic force-free model* como apresentado no trabalho de Burlaga (1988). As quatro linhas de cores diferentes foram obtidas a partir das componentes axial ( $B_A$ ), tangencial ( $B_T$ ), radial ( $B_R$ ) e total ( $B$ ) do campo magnético obtidas do modelo. As linhas verticais identificam as fronteiras do modelo que se definiu nos pontos onde  $B_A = 0$ , sendo que no sistema de Equações (2.2) considerou-se  $\alpha R = 2, 4$  e  $B/B_0 = 0, 5$  com  $\alpha = 1$ . . . . . 33
- Figura 5 – O painel superior mostra as componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  do IMF medidos *in situ* pelo satélite ACE com resolução temporal de 16 s e em coordenadas GSE (do inglês, Geocentric Solar Ecliptic system). O painel inferior mostra os valores da entropia espaço-temporal (STE) em função do tempo para as séries temporais das componentes do campo magnético: sendo  $STE_{B_x}$  linha pontilhada vermelha,  $STE_{B_y}$  linha tracejada verde e  $STE_{B_z}$  linha fina contínua azul. A curva preta e grossa representa o índice IE calculado ao longo do período analisado. Os tempos de choque, início e fim da MC identificada no artigo, são representados por três linhas verticais. . . . . 34

Figura 6 – O painel superior mostra as componentes $B_x$ , $B_y$ e $B_z$ do IMF medidos <i>in situ</i> pelo satélite ACE com resolução temporal de 16 s e em coordenadas GSM (do inglês, Geocentric Solar Magnetospheric system). O painel do meio mostra os valores da entropia espaço-temporal (STE) em função do tempo para as séries temporais das componentes do campo magnético: sendo $STE_{B_x}$ linha pontilhada vermelha, $STE_{B_y}$ linha tracejada verde e $STE_{B_z}$ linha fina contínua azul. A curva preta e grossa representa o índice IE calculado ao longo do período analisado. O painel inferior é um <i>zoom</i> na região das MCs para fazer o cálculo do índice IE em janelas de 2.5 h em lugar de 11 h. Os tempos de choque, início e fim das duas MCs identificada no artigo, são representados por três linhas verticais. . . . .	36
Figura 7 – O painel superior mostra detalhes da órbita do satélite ACE no ponto L1. O painel inferior é uma representação do satélite ACE sinalizando o nome dos dez instrumentos. Desses dez instrumento nesta pesquisa são utilizados dados do instrumento MAG e do SWEPAM ION. . . . .	37
Figura 8 – Escolha do arquivo de dados do instrumento MAG abordo do satélite ACE que se utiliza neste trabalho para o cálculo da entropia. . . . .	39
Figura 9 – Escolha do arquivo de dados do instrumento MAG abordo do satélite ACE que se utiliza neste trabalho para o cálculo da Alvenicidade. . . . .	40
Figura 10 – Visualiza-se uma janela com o software VRA no momento em que se fez o cálculo de STE. . . . .	42
Figura 11 – Visualiza-se a série temporal de $x(t)$ obtida do Atrator de Lorenz representado pela Equação 3.1. . . . .	43
Figura 12 – Descrição pictórica dos cálculos necessários para encontrar o valor RPDE. . . . .	46
Figura 13 – Figura resumo que explica o método para detectar intervalos Alfvênicos no vento solar na data de 01/01/1999. Os painéis de cima para baixo representam: as componentes do IMF, componentes da velocidade, as respectivas correlações por componentes centralizadas no meio do intervalo e o valor médio das correlações. O valor final que se utiliza na identificação de intervalos Alfvênicos é o representado no painel inferior. . . . .	48
Figura 14 – Componentes do IMF referentes as primeiras 11 horas e 11 minutos do mês de janeiro de 1999. Estas séries temporais tem comprimento de 2500 valores e dados com resolução temporal de 16 s. A partir de este tipo de janela de dados é que se calcula a entropia. . . . .	49

- Figura 15 – Esta figura agrupa os histogramas, com a respectiva distribuição Gaussiana, construídos a partir do cálculo do IE das componentes do IMF entre os anos 1999-2001. Cada painel foi construído com um dos métodos de entropia como segue: a) STE; b) SE; c) ENTR e d) RPDE. No interior de cada um dos gráficos existem informações importantes:  $\mu$  é o valor médio de IE em cada histograma e  $\sigma$  o desvio padrão,  $\sigma$  representa a correlação linear de cada método em relação ao STE. As linhas verticais é um limiar obtido fazendo  $\mu \pm \sigma$ . . . . . 52
- Figura 16 – Esta figura agrupa os histogramas, com a respectiva distribuição gaussiana, construídos a partir do cálculo do IE das componentes do IMF nas datas com a presença de DIs entre os anos 1999-2001. Cada painel foi construído para o método da entropia espaço-temporal (STE) separando valores para cada tipo de DI estudado como segue: a) ICMEs (MC0); b) *flux-ropes* (MC1); c) MCs (MC2); d) CIRs; e) eventos não-Alfvênicos de longa duração; f) eventos Alfvênicos de longa duração. No interior de cada um dos gráficos existem informações importantes:  $\mu$  é o valor médio de IE em cada histograma e  $\sigma$  o desvio padrão. As linhas verticais é um limiar obtido fazendo  $\mu \pm \sigma$ . . . . . 56
- Figura 17 – Cada painel desta figura é similar a Figura 16 mas mostrando os resultados para o método SE, ou seja  $IE_{SE}$ . . . . . 59
- Figura 18 – Cada painel desta figura é similar a Figura 16 mas mostrando os resultados para o método ENTR, ou seja  $IE_{ENTR}$ . . . . . 61
- Figura 19 – Cada painel desta figura é similar a Figura 16 mas mostrando os resultados para o método RPDE, ou seja  $IE_{RPDE}$ . . . . . 62

## Lista de tabelas

Tabela 1	– Classificação do sinal para as diferentes faixas de STE. . . . .	42
Tabela 2	– Os quatro métodos de cálculo da entropia de Shannon são aplicados nas séries temporais das componentes do IMF representadas na Figura 14. Na penúltima coluna se mostra a fórmula utilizada para calcular o índice de entropia interplanetária (IE). A última coluna mostra o valor do IE para cada um dos métodos. . . . .	50
Tabela 3	– Intervalos de tempo Alfvênicos identificados neste trabalho no período de 1999 até 2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados em ordem cronológica em cada um dos anos. As colunas 2 e 3 correspondem as datas de início e fim dos intervalos de tempo Alfvênicos. . . . .	72
Tabela 4	– Intervalos de tempo não Alfvênicos identificados neste trabalho no período de 1999 até 2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados em ordem cronológica em cada um dos anos. As colunas 2 e 3 correspondem as datas de início e fim dos intervalos de tempo alfvênicos. . . . .	73
Tabela 5	– Intervalos de tempo dos ICMEs identificados por Richardson e Cane (2010) (RC2010) no período de 1999 até 2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados cronologicamente em cada um dos anos. A coluna 2 informa dos ICMEs com: nuvem magnética (MC2), candidato a nuvem (MC1) ou sem nuvem (MC0). As colunas 3 e 4 correspondem as datas de início e fim dos ICMEs segundo RC2010. . . . .	74
Tabela 6	– Intervalos de tempo dos CIRs identificados por Jian <i>et al.</i> (2006) (Ji2006) no período de 1999 até 2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados em ordem cronológica em cada um dos anos. As colunas 2 e 3 correspondem as datas de início e fim dos CIRs como informado no artigo de Ji2006. . . . .	78

## Lista de abreviaturas e siglas

IMF	- Campo Magnético Interplanetário
ACE	- Satélite <i>Advanced Composition Explorer</i>
ICME	- Ejeções Coronal de Massa no Meio Interplanetário
MHD	- Magnetohidrodinâmica
CIR	- Região de interação co-rotante
HCS	- Lâmina de Corrente Heliosférica
CME	- Ejeções Coronal de Massa
STE	- Entropia Espaço Temporal
SE	- Entropia Espectral
ENT	- Entropia na Análise de Quantificação por Recorrência
RPDE	- Densidade de Entropia em Período de Recorrência
IE	- Índice de Entropia
$IE_{STE}$	- Índice de Entropia Espaço Temporal
$IE_{SE}$	- Índice de Entropia Espectral
$IE_{ENT}$	- Índice de Entropia na Análise de Quantificação por Recorrência
$IE_{RPDE}$	- Índice de Densidade de Entropia em Período de Recorrência
GSM	- Sistema de Coordenadas Magnetosférico Solar Geocêntrico
RP	- Gráfico de Recorrência
FFT	- Transformada Rápida de Fourier
VRA	- Software de Nome <i>Visual Recurrence Analysis</i>
MC	- Nuvem Magnética
DI	- Distúrbios Interplanetários
GSE	- Sistema de Coordenadas Eclíptico Solar Geocêntrico
AU	- Unidade Astronômica

RQA - Análise de Quantificação por Recorrência

Rs - Raios solares

## Lista de símbolos

$\mu$  - Valor Médio

$\sigma$  - Desvio Padrão

$\rho$  - Coeficiente de Correlação de Pearson

$\beta$  - Beta do Plasma

$p_i$  - Probabilidade

$k_B$  - Constante de Stefan–Boltzmann

$\Omega$  - Microestados Termodinâmicos

$\Delta S$  - Variação de Entropia na Termodinâmica

$V_A$  - Velocidade de Alfvén

$\mu_0$  - Permeabilidade Magnética do Vácuo

$\rho_m$  - Densidade de Partículas no Vento Solar

$\alpha$  - Constante Adimensional do Modelo Livre de Força

$J_0$  - Função de Bessel de Primeira Espécie de Ordem Zero

$J_1$  - Função de Bessel de Primeira Espécie de Ordem Um

$B_0$  - Campo Magnético Máximo do Eixo de uma Nuvem Magnética

$B_A$  - Campo Magnético Axial no Modelo Livre de Força

$B_T$  - Campo Magnético Tangencial no Modelo Livre de Força

$B_R$  - Campo Magnético Radial no Modelo Livre de Força

$m$  - Dimensão de Mergulho em séries temporais

$\tau$  - Tempo de Retardo em séries temporais

$\epsilon$  - Raio dos Pontos Vizinhos no Plot de Recorrência

$T_{max}$  - Tempo de Recorrência Máximo

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	Motivação	22
1.2	Importância da Pesquisa	23
1.3	Enunciado do Problema	23
1.4	Objetivos Geral e Específicos	24
1.5	Estrutura do Trabalho	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>26</b>
2.1	O sol e o meio interplanetário	26
2.2	Ondas de Alfvén	27
2.3	Entropia aplicada à análise de séries temporais	28
2.4	Entropia Espaço-Temporal para estudar nuvens magnéticas	30
<b>3</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA</b>	<b>37</b>
3.1	Dados	37
3.2	Metodologia	42
3.2.1	Entropia Espaço-Temporal - STE	42
3.2.2	Entropia Espectral - SE	44
3.2.3	Entropia na Análise de Quantificação de Recorrência - ENTR	45
3.2.4	Densidade de Entropia em Período de Recorrência - RPDE	46
3.3	Exemplo Metodológico	47
3.3.1	Cálculo da Alfvénicidade	47
3.3.2	Cálculo da Entropia	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>51</b>
4.1	Análise estatística da Entropia do IMF	51
4.2	Estudo da Alfvénicidade	54
4.3	Estudo Estatístico da Entropia em DIs	55
4.3.1	Análise estatística dos valores da STE	55
4.3.2	Análise estatístico dos valores da SE	58
4.3.3	Análise estatístico dos valores da ENTR	60
4.3.4	Análise estatístico dos valores da RPDE	62
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A – TABELAS DE EVENTOS ALFVÊNICOS E NÃO- ALFVÊNICOS, ICMES E CIRS . . . . .</b>	<b>72</b>

## 1 Introdução

Ao longo dos seus ciclos de atividade, o sol emite uma grande quantidade de energia na forma de radiação eletromagnética (KELLEY; HEELIS, 1989). Essa energia afeta toda a dinâmica da atmosfera da Terra, especialmente a ionosfera que se encontra entre sessenta até mais de mil quilômetros de altura da superfície, cujas subcamadas (D, E e F) são muito sensíveis a radiação ultravioleta, raios gama, infravermelho e raios-X, aumentando drasticamente a densidade de partículas ionizadas no lado diurno (KIVELSON; RUSSELL, 1995). Além de radiação eletromagnética, do Sol também emana um fluxo contínuo de partículas ionizadas, fundamentalmente elétrons, prótons e partículas alfa, que conjuntamente com o campo magnético coronal formam o vento solar (PARKER, 1958). Conseqüentemente, as propriedades físicas do meio interplanetário como temperatura iônica e eletrônica, velocidade, densidade e pressão cinética variam sistematicamente de acordo com a atividade solar (KIVELSON; RUSSELL, 1995).

As variações bruscas na densidade, velocidade e temperatura do vento solar e do campo magnético interplanetário medidos *in situ* por satélites, podem ser chamadas de Distúrbios Interplanetários (DIs) (KIVELSON; RUSSELL, 1995; TSURUTANI; GONZALEZ, 1997; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017b). Tais eventos interplanetários emanados do Sol ao atingirem a Terra tendem a ser muito geofetivos, ou seja, podem causar subtempestades e/ou tempestades geomagnéticas (TSURUTANI *et al.*, 1988; TSURUTANI; GONZALEZ, 1992; GONZALEZ; TSURUTANI; GONZALEZ, 1999; GONZALEZ *et al.*, 1994; ECHER *et al.*, 2004; ECHER; ALVES; GONZALEZ, 2005; ECHER *et al.*, 2008).

O aumento na velocidade e o campo magnético interplanetário causam crescimentos na pressão cinética e magnética que conseqüentemente comprimem a magnetosfera. O aumento na densidade aporta mais partículas que ficam disponíveis para entrarem no interior das linhas do campo magnético da Terra. O sentido do vetor campo magnético e o tempo que ele perdura, ou seja, pouca ou rápida flutuação, poderá abrir "pequenos buracos magnetosféricos" por meio do fenômeno da reconexão magnética, para que as partículas entrem na magnetosfera. As flutuações na morfologia das linhas de campo geomagnético causado por compressões/descompressões da magnetosfera juntamente com o aumento de partículas nos sistemas de corrente, causam dissipação de energia na ionosfera auroral (subtempestades) e variações da componente horizontal do campo magnético em baixas e medias latitudes (tempestades) que afetam toda a dinâmica magneto-ionosférica planetária.

De acordo com as características observadas nos dados *in situ* e da respectiva fonte de emissão na atmosfera solar, os DIs podem ser classificados como:

- a) regiões de interação corotantes (*Corotating Interaction Regions - CIRs*) (SHEELEY N. R.; HARVEY; FELDMAN, 1976; SHEELEY N. R. *et al.*, 1977; TSURUTANI *et al.*, 1995; KIVELSON; RUSSELL, 1995);
- b) intervalos Alfênicos (ALFVÉN, 1942; BELCHER; DAVIS JR.; SMITH, 1969; BELCHER; DAVIS JR., 1971; TSURUTANI *et al.*, 1990; TSURUTANI *et al.*, 2011);
- c) ejeções de massa coronal interplanetárias (*Interplanetary Coronal Mass Ejections - ICMEs*) (TSURUTANI *et al.*, 1988; GOSLING; MCCOMAS; PHILLIPS, 1992; RICHARDSON; CLIVER; CANE, 2000; CANE; RICHARDSON, 2003; SCHWENN, 2006);
- d) Cordas de fluxos de pequena (*flux-ropes*) e grande escala (*Magnetic Clouds - MCs*), sendo as MCs um subconjunto específico de ICMEs (BURLAGA; KLEIN, 1980; Burlaga *et al.*, 1981; Burlaga; Behannon, 1982; BOTHMER; SCHWENN, 1994; Bothmer; Schwenn, 1998; Burlaga, 1988; OJEDA-GONZALEZ *et al.*, 2005; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2013; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2014a; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017a; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017b);
- e) lâmina de corrente heliosférica (*Heliospheric Current Sheet - HCS*) (PARKER, 1958; LIU *et al.*, 2014; CROOKER *et al.*, 2004) e
- f) choques (BURLAGA, 1995; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2014b).

Durante a fase descendente e o mínimo de atividade solar, a possibilidade de DI deve-se principalmente à recorrência de feixes rápidos (HSSs) emanados de buracos coronais. É comum que os buracos coronais persistam por mais de uma rotação solar (SHEELEY N. R.; HARVEY; FELDMAN, 1976; SHEELEY N. R. *et al.*, 1977; TSURUTANI *et al.*, 1995). Os HSSs são caracterizados pela presença de ondas de Alfvén (ALFVÉN, 1942; BELCHER; DAVIS JR.; SMITH, 1969; ZIRKER, 1977; TU; PU; WEI, 1984; TU, 1988; TSURUTANI; GONZALEZ, 1987; TSURUTANI *et al.*, 1990; TSURUTANI *et al.*, 1995; OFMAN; DAVILA, 1995; TSURUTANI *et al.*, 2006; TSURUTANI *et al.*, 2011; TANSKANEN *et al.*, 2017; PRESTES; KLAUSNER; OJEDA-GONZÁLEZ, 2017). Devido à rápida velocidade, os HSSs fluem mais radialmente do que o feixe lento emanado de outras regiões do Sol (KIVELSON; RUSSELL, 1995). A interação entre HSS e feixe lento dá origem a regiões de choques entre suas interfaces, formando assim as CIRs. Se houver fortes componentes magnéticas com orientação sul em coordenadas GSM dentro da CIR, ocorrerá uma tempestade geomagnética se ela atingir a magnetosfera terrestre (TSURUTANI *et al.*, 2006).

Geralmente, depois de uma explosão solar pode-se desprender uma ICME, alcançando o meio interplanetário, que são mais comuns de acontecer em máxima atividade solar. Há um subconjunto específico de ICMEs que podem ser muito geofetivos (KELLEY;

HEELIS, 1989), onde associado ao plasma, há um campo magnético bem estruturado. em forma de "tubo de fluxo" de grande escala com duração (maior que 6 horas) chamado de nuvem magnética (MC) (BOTHMER; SCHWENN, 1994; Bothmer; Schwenn, 1998; Burlaga; Behannon, 1982; Burlaga, 1988). As medições locais são limitadas à trajetória do satélite no interior da MC pelo que é necessário fazer uma abordagem teórica e realizar modelos computacionais para obter a estrutura magnética global (OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017a; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017b). A nuvem magnética é uma tubo de fluxo magnético em grande escala porque tem uma durabilidade temporal promédio de um (1) a dois (2) dias quando identificada por um satélite *in situ* no ponto de Lagrange L1. As propriedades que permitem identificar uma MC foram estabelecidas por Burlaga e Klein (1980), Burlaga *et al.* (1981) como sendo eventos interplanetários com:

- a) baixa velocidade térmica de íons;
- b) maior intensidade de campo magnético que o ambiente;
- c) rotação suave do vetor de campo magnético em qualquer componente.

Tais características isoladamente podem ser encontradas em outros DIs, contudo, no caso das MCs elas precisam aparecer simultaneamente nos dados do satélite para definir o evento como nuvem.

Pela condição de campo "congelado" e a rotação solar, o campo magnético do Sol estende-se deformado ("torcido"), numa Espiral de Arquimedes, o que se conhece com o nome de Espiral de Parker, em referência a Eugene Parker (PARKER, 1958). Por conta das linhas de campo abertas, existe fluxo de partículas de alta velocidade (*High Speed Streams - HSSs*), geralmente provenientes de buracos coronais, que interagem com o vento solar lento formando os chamados *CIRs*, como foi já explicado anteriormente. Nesse ambiente também podem existir lâminas de corrente que separa regiões com campo magnético interplanetário adjacentes com polaridades opostas, que se conhecem com o nome de *HCS*, que é uma descontinuidade tangencial que separa dois plasmas com campos magnéticos anti-paralelos (PARKER, 1958; LIU *et al.*, 2014; CROOKER *et al.*, 2004).

Uma característica em todos os tipos de DIs é o aumento da amplitude das magnitudes físicas medidas *in-situ* no ponto de Lagrange L1. A diferença é que a frequência entre essas variações pode variar entre os diferentes tipos de distúrbios. Por exemplo, nas nuvens magnéticas a frequência de flutuação do campo é muito pequena, sendo que a principal característica delas é a suave rotação do vetor campo magnético durante a identificação do evento (Burlaga *et al.*, 1981). Por outro lado, os feixes de vento solar de altas velocidades provenientes de buracos coronais tem uma alta frequência de flutuação das componentes do campo magnético e da velocidade, sendo comum o aumento da presença

de ondas de Alfvén. Nestes cenários, é que a utilização da entropia como ferramenta de estudo ganha importância para ser utilizada.

A entropia é um conceito muito antigo na física e de alguma forma possui um certo grau de abstração desde os primórdios das ideias de Clausius passando por Lord Kelvin. A entropia é uma importante grandeza física utilizada na mecânica estatística e na termodinâmica para medir o grau de desordem de um sistema, em outras palavras, pode-se dizer que ela está relacionada a espontaneidade de algum processo físico ou químico. Quando os processos são espontâneos a entropia aumenta e junto com isso há mais desorganização no sistema. Portanto, define-se uma função de estado do sistema  $S$ , chamada de entropia, que será função da temperatura, volume e pressão, cuja variação  $\Delta S$  entre um estado inicial  $i$  e final  $f$  está relacionada com a temperatura absoluta do sistema  $T$  e a quantidade de calor  $Q$ , trocado de forma reversível entre o sistema e sua vizinhança.

Esta variação de entropia está relacionada com a segunda lei da termodinâmica e podemos representá-la pela integral:

$$\Delta S = \int_i^f \left( \frac{1}{T(Q)} \right) dQ \left[ \frac{J}{K} \right] \quad (\text{Expressão de Rudolf Clausius, década de 1850}). \quad (1.1)$$

Segundo Lord Kelvin, não existe possibilidade de construção de uma máquina térmica que transforme todo o calor produzido em trabalho integral. Assim, a energia que é dissipada de um sistema na forma de calor se transforma em entropia acumulando a desordem ou irreversibilidade de um sistema. O aumento da entropia é importante pois ela é responsável pela ocorrência de fenômenos internos dissipativos nos diferentes sistemas físicos.

Em 1877, Ludwig Boltzmann propôs na mecânica estatística, um método probabilístico para definir a entropia do movimento das partículas no interior de um gás ideal. A definição é feita a partir do logaritmo neperiano do número de microestados  $\Omega$  possíveis para o sistema por meio da seguinte expressão:

$$S = k_B \cdot \ln \Omega \left[ \frac{J}{K} \right] \quad (1.2)$$

onde  $S$  é a entropia e  $k_B$  é a constante de Boltzmann ( $k_B = 1,380649 \times 10^{-23}$  J/K)<sup>1</sup>.

Outra maneira de definir a Equação (1.2) é em função da probabilidade  $p_i$  de cada microestado  $i$ :

$$S = -k_B \sum_i p_i \ln p_i \left[ \frac{J}{K} \right]. \quad (1.3)$$

<sup>1</sup> Esta expressão é importante porque permite definir a entropia absoluta de um sistema. A equação está gravada na lápide da tumba de Ludwig Boltzmann no Zentralfriedhof (o cemitério central) em Viena. Boltzmann cometeu suicídio em 1906, profundamente deprimido, talvez devido à baixa aceitação de suas teorias no mundo acadêmico da época.

Posteriormente, o conceito de entropia foi utilizado na área de informática uma vez que na comunicação por mensagens se faz presente aspectos linguísticos pelo uso de símbolos. Entretanto, ao se transmitir uma mensagem o pacote de informação pode ser modificado. Em 1948, Shannon e Weaver (1948) propôs uma maneira de se quantificar a informação proveniente de uma mensagem, onde em um sinal discreto, a entropia da informação, agora re-escrita com a letra  $H(X)$  para diferenciar da entropia de Boltzmann, estaria relacionada ao logaritmo da probabilidade de uma certa variável aleatória  $X$  como segue:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad [Adimensional] \quad . \quad (1.4)$$

Segundo definido pelo próprio Shannon no artigo de 1948, nesta nova redefinição de entropia, ela pode ser interpretada como a informação média associada as observações de uma variável aleatória, de tal forma que podemos dizer que a entropia avalia a incerteza média associada a tal variável.

O conceito de entropia tornou-se popular na área de análise de séries temporais. Séries temporais são um conjunto de observações ordenadas no tempo ou espaço, podendo serem discretas ou contínuas. Podemos dizer que uma série temporal de uma medição de um fenômeno físico na natureza é a realização de um processo estocástico. O oposto, que seria uma série temporal determinística, poderia se obter a partir de uma solução analítica de uma equação diferencial, por exemplo. Na literatura, podemos encontrar várias aplicações do uso da entropia para estudar diversos sistemas físicos (Facchini; Mocenni; Vicino, 2009; NUNES; ALMEIDA; SLEIGH, 2004; LITTLE *et al.*, 2007; ZBILUT; WEBBER, 1992; WEBBER; ZBILUT, 1994; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2013; OJEDA-GONZÁLEZ *et al.*, 2017a). Uma boa referência para se estudar vários métodos de entropia e suas respectivas aplicações, é o trabalho de Boffetta *et al.* (2002) que estaremos revisitando no Capítulo 2. Neste trabalho, estaremos estudando séries temporais do campo magnético interplanetário no interior de DIs. Estas séries estão relacionadas com processos estocásticos, mas mesmo assim será possível calcular a entropia no interior dos DIs.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação deste trabalho veio de tópicos abordados em trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa do Professor orientador Arian Ojeda-González. Os trabalhos que deram sustentação teórica a esta pesquisa são os seguintes: Boffetta *et al.* (2002), Ojeda-Gonzalez *et al.* (2005), Ojeda-González *et al.* (2013), Ojeda-González *et al.* (2017a), Ojeda-González *et al.* (2017b). Além disso, utilizamos como principal motivação o trabalho apresentado pelo aluno de iniciação científica Matheus Guilherme Anjos de Souza no INIC do ano de 2017<sup>2</sup>, como parte de um projeto IC da FAPESP (no. processo 2016/25563-6). No projeto

<sup>2</sup> <[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2017/anais/arquivos/RE\\_0560\\_0209\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2017/anais/arquivos/RE_0560_0209_01.pdf)>

anteriormente citado foi realizado um estudo dos valores de entropia no período de 1999 a 2001 utilizando dados do campo magnético interplanetário medidos pelo satélite ACE e com resolução temporal de 16 s. Esses dados foram pré-processados para calcular a entropia espaço temporal (STE), que permitiu identificar as MCs presentes nesses intervalos de dados. Os autores também utilizaram outros três métodos para calcular a entropia nesses dados. Este trabalho, pelo qual sou integrante principal, me motiva no sentido de estender a pesquisa sobre os DIs, bem como a relação entre os métodos de entropia aplicado ao estudo dos DIs na busca de identificar e entender melhor as características principais de cada evento.

## 1.2 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A sociedade moderna é totalmente dependente da tecnologia geoespacial, e os distúrbios Interplanetários (DIs) são os grandes vilões desta história. Sem dúvida, os DIs podem afetar os sistemas de geração de energia, telecomunicações e até para voos intercontinentais que circulem perto das zonas aurorais por conta das correntes induzidas que podem aparecer na superfície terrestre oriunda de partículas vindas do meio interplanetário. Utilizar ferramentas de análise de séries temporais para estudar fenômenos físicos associados aos DIs como: temperatura, densidade de partículas por exemplo, é um tópico importante que enriquece o conhecimento em Física Espacial e também contribui para o Clima Espacial.

Neste trabalho em específico, desde a proposta do título, deixamos bem claro para o leitor que estaremos fazendo uma estatística dos valores de entropia no vento solar em um intervalo de três anos. O fato de fazer um estudo de um intervalo de três anos, correspondente ao pico de máximo do ciclo solar 23, torna este trabalho importante. Sendo que o pico de máximo, coincide com um aumento na quantidade de DIs que atingem a Terra. Por exemplo, utilizando o catálogo de Richardson e Cane (2010) observa-se que entre 1999-2001 um total de 132 ICMEs atingiram a Terra. Além do mais, no catálogo de CIRs disponibilizado por Jian *et al.* (2006) foram identificados 100 eventos. Com essa quantidade de DIs pode-se fazer um importante estudo estatístico para validar quanto efetiva poderia ser a entropia como ferramenta para estudar esses eventos.

## 1.3 ENUNCIADO DO PROBLEMA

Antes de começar um trabalho científico na área de Física Espacial Experimental, primeiro devem-se definir três itens importantes: *i)* qual é o nosso objeto de estudo; *ii)* o que nos interessa conhecer dele e *iii)* quais as ferramentas disponíveis para realizar o estudo. Focados em esses três itens anteriormente citados, estaremos em condições de fazer o enunciado do problema a ser resolvido.

Continuando com o raciocínio do parágrafo anterior, define-se como objeto de estudo aqueles DIs nos quais possam ser obtidos séries temporais de suas magnitudes com um tamanho específico. O interesse de estudar séries temporais no interior dos DIs se deve a necessidade de caracterizar as flutuações das magnitudes do campo magnético relacionadas com o nível de determinismo presente em cada uma das séries. Isto poderá estar relacionado com a geofetividade do DI. Séries temporais menos estocásticas, porém mais determinísticas, são mais factíveis de serem estudadas a partir de modelos numéricos. Além do mais, são séries mais fáceis de serem ajustadas em modelos de previsão, úteis para o estudo do Clima Espacial. Existem uma variedade de ferramentas para estudar séries temporais, mas neste trabalho estaremos utilizando a entropia de Shannon calculada por diferentes metodologias para estudar os DIs. A fórmula da entropia de Shannon foi apresentada na Equação (1.4), o que difere entre os quatro métodos utilizados neste trabalho, é a maneira como se determina a probabilidade  $p(x_i)$  da série temporal.

Todo nosso estudo se inicia na coroa solar onde uma grande massa de partículas (plasma) é ejetada para fora alcançando o meio interplanetário, carregando também as linhas de campo magnético solar, todo esse pacote de plasma magnetizado é chamado de vento solar. Estruturas presentes no vento solar como ICMEs, que possuem como subconjunto as MCs, podem gerar tempestades e subtempestades geomagnéticas (GONZALEZ; TSURUTANI, 1987; TSURUTANI *et al.*, 1988). A entropia, pela própria definição física, é uma grandeza que quantifica a ordem e a desordem. Por esse fato, ela será uma ferramenta importante para utilizarmos no estudo dos DIs.

## 1.4 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

### GERAL:

- Analisar a morfologia do campo magnético no interior dos DIs no pico de máximo do ciclo solar 23 por meio do estudo das componentes do campo magnético interplanetário e com o apoio de ferramentas para quantificar a entropia. Utilizar agrupamentos estatísticas dos DIs para interpretação dos resultados.

### ESPECÍFICOS:

1. Coletar os dados obtidos do satélite (ACE) entre os anos de 1999 a 2001;
2. Obtenção das séries temporais desses dados;

3. Obter os valores de entropia pelos quatro métodos das componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ;
4. Utilizar catálogos para poder identificar os intervalos com presença de DIs;
5. Procurar intervalos Alfvênicos e não Alfvênicos;
6. Construir os histogramas de probabilidade por entropia dos três anos de estudo;
7. Construir os histogramas de probabilidade por entropia agrupando cada tipo de DI com seus semelhantes;
8. Analisar os resultados e dizer qual método é mais consistente para verificação dos DIs.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Primeiramente, definiu-se os principais conceitos e objetivos que formam a semente desta dissertação. Após esta etapa foi apresentada uma contextualização bibliográfica com o intuito de ajudar no entendimento das ondas de Alfvén, assim como a entropia previamente utilizada para estudar alguns tipos de DIs. Na sequência falaremos sobre os dados e metodologia que serão utilizados no trabalho. Nesta parte são apresentados os resultados e discussão da dissertação. Por último, são apresentadas as considerações finais do trabalho. O **Apêndice** agrupa as tabelas com as datas de início e fim de todos os DIs estudados no Capítulo 4.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado as definições de alguns conceitos básicos da Física Espacial e se realiza uma revisão bibliográfica de alguns métodos de cálculo de entropia utilizados em diversos estudos.

### 2.1 O SOL E O MEIO INTERPLANETÁRIO

O sol, por conta de sua energia na forma de radiação e partículas, é o ponto de partida dos eventos estudados nesta dissertação. Pela proximidade ao nosso planeta ( $1,5 \times 10^8$  km), seu estudo se torna fundamental para entender o efeito que essas partículas causam quando interagem com a biosfera e a atmosfera neutra e ionizada da terra. Como resultado podemos ter desde auroras até tempestades geomagnéticas que podem trazer problemas sérios para o clima espacial, por exemplo falhas nos sistemas elétricos e de comunicação de satélites. O sol basicamente é uma bola de gás incandescente formada por 73,46% hidrogênio onde internamente existe uma reação termonuclear chamada fusão nuclear, fonte de toda essa energia mantida em um equilíbrio termo-gravitacional. O volume do sol é de 1,3 milhões de vezes maior que o da terra. A temperatura varia bastante entre as diferentes regiões, por exemplo no seu interior é da ordem de 15 milhões de Kelvin, na fotosfera é de 6050 Kelvin e na coroa a temperatura passa a ser de 800 mil a 3 milhões de Kelvin. A estrela chamada sol tem uma idade de 4,5 bilhões de anos e calcula-se que aos 10 bilhões de anos do nascimento se torne uma gigante vermelha para finalmente se transformar numa anã branca.

Uma característica muito importante do sol é a rotação diferencial entre o plasma da região equatorial em comparação com a região polar. No equador, o período de rotação é da ordem de 25 dias, já no polo é de 35 dias. Esta rotação diferencial é responsável pela torção das linhas de campo magnético, que num tempo médio de 11 anos invertem sua polaridade magnética. Nesses período de 11 anos entre polaridades, acontecem uma diversidade de fenômenos na atmosfera solar que são responsáveis diretos da gênese dos DIs. Vale a pena mencionar, que no período de 1999-2001 o sol encontrava-se no máximo período de torção das linhas de campo magnético do ciclo 23. Isto significa, um aumento significativo na quantidade de DIs que podem atingir a terra.

O sol pode ser dividido nas seguintes regiões: *i*) núcleo (de 0-0,2 raios solares- $R_s$ ); *ii*) região de radiação (de 0,2-0,7  $R_s$ ); *iii*) Interface ou Tachocline (camada fina com espessura de 0,04  $R_s$ ); *iv*) região de convecção (de 0,7  $R_s$  até a base da Fotosfera) e *v*) Atmosfera solar, que se propaga milhões de quilômetros no espaço enchendo todo o meio interplanetário de plasma frio, chamado de vento solar (KELLEY; HEELIS, 1989). A

atmosfera solar, gênese dos DIs, se divide em três camadas: *i)* fotosfera; *ii)* cromosfera; e *iii)* coroa solar.

O núcleo emite energia por radiação, que por meio de processos radiativos tarda milhões de anos em atravessar a região de radiação até ser transportada à atmosfera solar por meio do processo de convecção através da região do mesmo nome. Ao observar a atmosfera solar, utilizando telescópios ópticos e radiotelescópios solares com diversos filtros de comprimento de onda, podem-se observar uma variedade de estruturas como: filamentos escuros, fáculas claras, espículas no limbo, plage, proeminências, fulgurações solares ou solar flares, ejeções de massa coronal, manchas solares, buracos coronais e granulação da fotosfera.

A velocidade das partículas no vento solar no plano da eclíptica numa distância de 1 unidade astronômica (AU) é da ordem de 450 km/s, nos buracos coronais o vento solar é mais rápido, na ordem de 700 km/s. Também no plano da eclíptica em 1 AU o campo magnético é de 5 nT, a densidade de prótons é de 5 partículas por  $\text{cm}^3$  e a temperatura do prótons é de 110 mil Kelvin. A medida que o vento solar se movimenta até a heliopausa esses parâmetros diminuem por causa da própria expansão radial do plasma. Neste trabalho, estamos interessados nas propriedades dos DIs no plano da eclíptica a uma distância de 1 AU aonde o satélite ACE irá providenciar os dados da pesquisa.

## 2.2 ONDAS DE ALFVÉN

Sabemos que nem todo ambiente com partículas carregadas é considerado plasma uma vez que existem condições específicas para que tal seja considerado, como exemplo podemos citar a condição de neutralidade macroscópica. Partiremos do princípio que o plasma ejetado da coroa solar esteja com as condições satisfeitas. Como podemos ter plasmas em condições variadas, devemos ter tipos diferentes de ondas geradas. Assim o plasma, sendo considerado um fluido extremamente carregado, fica sujeito a excitações externas de campo elétrico e magnético gerando maior quantidade de ondas mecânicas que num fluido normal, como por exemplo o ar atmosférico. O comportamento de fluidos normais difere do comportamento de fluidos com partículas carregadas, porém certos conceitos e equações que descrevem fluidos podem ser utilizados na descrição de fluidos com partículas carregadas. A ideia é tratar o plasma como um fluido magnetizado, sem preocupação com as partículas individuais. Esse tratamento é a base da teoria Magneto-hidrodinâmica (ou MHD) pela qual as ondas de Alfvén estão inseridas.

A descrição para que um meio seja MHD é feito usando-se as equações da continuidade, de movimento de partículas, da conservação da energia, a lei de Ampère, a lei de Faraday e por fim a lei de Ohm generalizada. A existência desse tipo de onda foi descrita em 1942 pelo físico Sueco Hannes Alfvén (ALFVÉN, 1942) onde posteriormente foram detectadas em laboratório. Como definição podemos dizer que são ondas transversais que

se propagam ao longo das linhas de campo magnético podendo aparecer em qualquer fluido eletricamente condutor estimulado por um campo magnético externo (ALFVÉN, 1942). Em um fluido eletricamente condutor, caso do plasma, as partículas estão aprisionadas nas linhas de campo magnética, de modo que quando houver uma perturbação as linhas de campo se desloquem transversalmente, similarmente ao que ocorre em uma corda (BITTENCOURT, 2004). A velocidade das ondas de Alfvén calcula-se por meio da seguinte expressão:

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho_m}} \quad (2.1)$$

sendo B a magnitude do campo magnético,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $\rho_m$  a densidade de partículas. Utilizando os valores médios do vento solar citados na seção anterior, pode-se obter que a velocidade de Alfvén média no vento solar, no plano da eclíptica a uma distância de 1 AU, é de 48,8 km/s. Métodos para identificar ondas de Alfvén no meio interplanetário podem-se encontrar nos trabalhos de Belcher, Davis Jr. e Smith (1969), Belcher e Davis Jr. (1971), Tsurutani *et al.* (1990), Tsurutani *et al.* (2011).

### 2.3 ENTROPIA APLICADA À ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Existem na literatura vários métodos de calcular a entropia, que ao mesmo tempo são aplicados para resolver problemas estatísticos e termodinâmicos em diversas áreas da ciência (SHANNON; WEAVER, 1948; RENYI, 1959; KOLMOGOROV, 1958; SINAI, 1959; BOFFETTA *et al.*, 2002). No trabalho de Boffetta *et al.* (2002), os autores fizeram um estudo que relaciona os expoentes de Lyapunov, utilizados para analisar séries caóticas, com autômatos celulares elementares, utilizando a entropia como uma ferramenta auxiliar, com o objetivo de fazer um link entre ambos métodos. A entropia criada por eles foi chamada de densidade de entropia espaço-temporal (do inglês, *spatial-temporal entropy density*), mas que tem uma limitação. Ou seja, ela é muito difícil de calcular analiticamente. O cálculo é feito fixando a escala macroscópica do sistema representada pela letra L, após essa fixação, calcula-se a entropia, que passará a se chamar de entropia temporal (do inglês, *temporal entropy*). A densidade de entropia espaço-temporal foi desenvolvida a partir da entropia de Shannon, *i.e.*, a fórmula da entropia de Boltzmann-Gibbs reenquadrada no marco da teoria da informação (BOFFETTA *et al.*, 2002).

A pesar da similaridade de nomes, a entropia espaço temporal (STE) mencionada na motivação do Capítulo 1, não se calcula da mesma maneira que a densidade de entropia espaço-temporal de Boffetta *et al.* (2002). A análise STE consiste em uma ferramenta que compara a distribuição das distâncias entre todos os pares de vetores no espaço de fase reconstruído com as distâncias entre diferentes órbitas que evoluem no tempo (WEBBER; ZBILUT, 1994). Nesse contexto, os termos “espaço de fase” e “órbitas” são conceitos da teoria de sistemas dinâmicos caóticos (ZBILUT; WEBBER, 1992). A reconstrução do

espaço de fase é o primeiro passo na análise de séries temporais não-lineares de dados de sistemas caóticos, incluindo estimativa de sistemas invariantes e previsão de futuros valores (OJEDA-GONZALEZ *et al.*, 2005). Regimes dinâmicos, como um estado de repouso ou oscilação periódica, correspondem a objetos geométricos, como um ponto ou uma curva fechada, no espaço de fase (CHIAN *et al.*, 2006).

A evolução de um sistema dinâmico corresponde a uma trajetória (ou uma órbita) no espaço de fase (TAKENS, 1981). Diferentes estados iniciais resultam em diferentes trajetórias (TAKENS, 1981). No gráfico de recorrência (RP), uma série temporal unidimensional de um arquivo de dados é expandida em um espaço de maior dimensão. O conceito de espaço de fase e órbita também são válidos no RP e no cálculo subsequente da entropia (WEBBER; ZBILUT, 1994). Os resultados do STE identificam de uma certa maneira objetiva as características de um processo físico presente em um conjunto de dados de medição de tempo. A STE está disponível como um dos métodos utilizados no software de Eugene Kononov's, chamado de *Visual Recurrence Analysis* ou VRA <sup>1</sup>. O VRA tem sido utilizado com sucesso por vários autores em diferentes áreas (Dasan *et al.*, 2002; HERMANN, 2005; MARWAN, 2008; CRISAN, 2012; ALEXA *et al.*, 2015).

Little *et al.* (2007) desenvolveram um método de entropia para quantificar a ordem de uma série temporal no espaço de fase. O cálculo desta entropia depende da fixação de um raio  $\epsilon$  que quantifica os pontos vizinhos no seu interior. Esses pontos são reorganizados em um histograma para criar uma função de probabilidades  $P(T)$ , sendo  $T$  o intervalo de tempo entre órbitas recorrentes. A entropia se calcula de forma similar ao apresentado na Equação (1.4). Neste caso, ela recebe o nome de RPDE (do inglês, *Recurrence Period Density Entropy -RPDE*) e se representa com a letra  $H_{norm}$ . O valor RPDE é um escalar no intervalo de zero a um (LITTLE *et al.*, 2007). Para sinais puramente periódicos,  $H_{norm} = 0$ , enquanto que para ruído branco puramente uniforme,  $H_{norm} = 1$ . No entanto, as estimativas obtidas com esta técnica (RPDE) são diferentes daquelas obtidas com a STE.

Dasan *et al.* (2002) usando ferramentas da dinâmica não linear e da teoria do caos, estudou as flutuações no estresse determinado a partir de simulações do cisalhamento das suspensões de Stokes (do inglês, *shear flow of Stokesian suspensions*). Eles também computaram o STE usando o VRA para o estresse. Os valores calculados do STE para as tensões de cisalhamento e normal foram quase zero, mostrando uma estrutura perfeita nos dados. Observaram então um padrão definido no gráfico do espaço de fase das componentes do estresse.

Peacock (1983) apresentou um análogo bidimensional do teste de Kolmogorov-Smirnov, útil para analisar a distribuição dos dados em duas dimensões, como é o RP. Carr e Schwartz (1998) investigaram os fenômenos de flutuação em plasmas que frequentemente precisam da análise de sinais espaço-temporais. Foi mostrado como esses sinais

<sup>1</sup> Kononov, E. 2002, Visual Recurrence Analysis Software Package, Version 4.7

podem ser analisados usando a decomposição bi-ortogonal, que os divide em modos espacial e temporal ortogonais. Vários parâmetros permitem quantificar a distribuição de peso na decomposição bi-ortogonal que descrevem como a energia é distribuída pelas estruturas significativas. Quando a energia está concentrada em uma única estrutura, teremos entropia muito baixa. Por outro lado, se a energia for distribuída igualmente entre as estruturas significativas, logo, a entropia será muito alta.

## 2.4 ENTROPIA ESPAÇO-TEMPORAL PARA ESTUDAR NUVENS MAGNÉTICAS

No trabalho de Ojeda-Gonzalez *et al.* (2005) foram estudadas séries temporais da componente z do campo magnético e da componente x da velocidade do vento solar medidos *in situ* pelo satélite *WIND* em alguns intervalos correspondentes ao período de 1995 a 2001. Foram escolhidos séries temporais de 20 MCs, 17 DIs excluindo as MCs e 20 períodos de vento solar calmo.

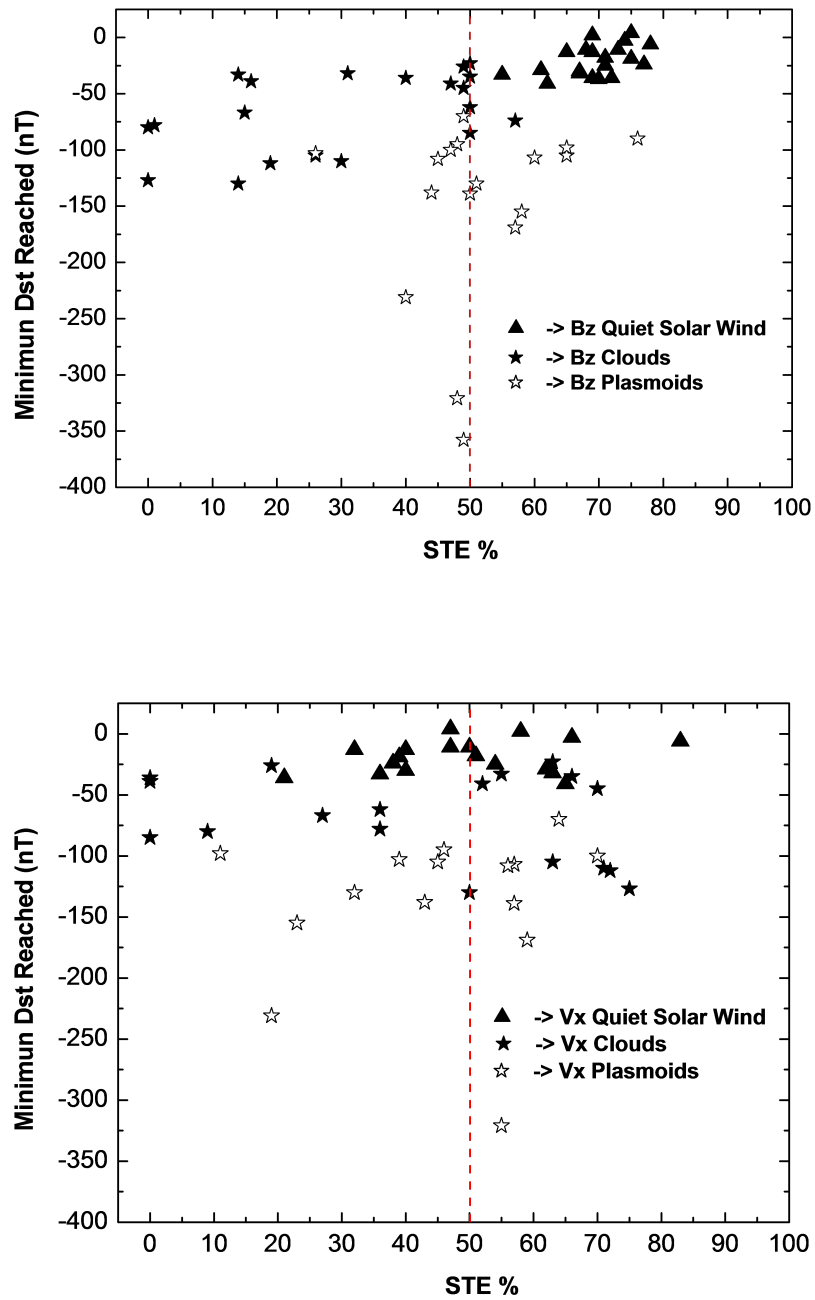
Posteriormente foi calculado o valor de STE para cada série temporal sendo que os resultados obtidos das séries temporais da componente z do IMF estão plotados no painel superior da Figura 1. Os resultados para a componente x da velocidade estão plotados no painel inferior da Figura 1.

Conclui-se que a componente  $B_z$  das MCs apresenta valores de STE que do ponto de vista estatístico são significativamente menores que os valores de STE dos outros eventos.

Motivados pelo resultado apresentado no parágrafo anterior foi que Ojeda-González *et al.* (2013) fizeram um estudo de um total de 41 nuvens identificadas entre os anos de 1998 a 2003, encontrando que 27 das 41 MCs apresentaram valor nulo de STE. Resultado este que contrasta com os valores obtidos para as respectivas bainhas magnéticas de cada uma das MCs. As Figuras 2 e 3 resumem os resultados encontrados por Ojeda-González *et al.* (2013). No artigo, os autores discutem o porque desse resultado. Para isso, eles compararam os valores de entropia que seriam obtidos a partir de uma nuvem ideal, reconstruída a partir da solução analítica do modelo livre de força (do inglês *force-free field*), como representado na Figura 4.

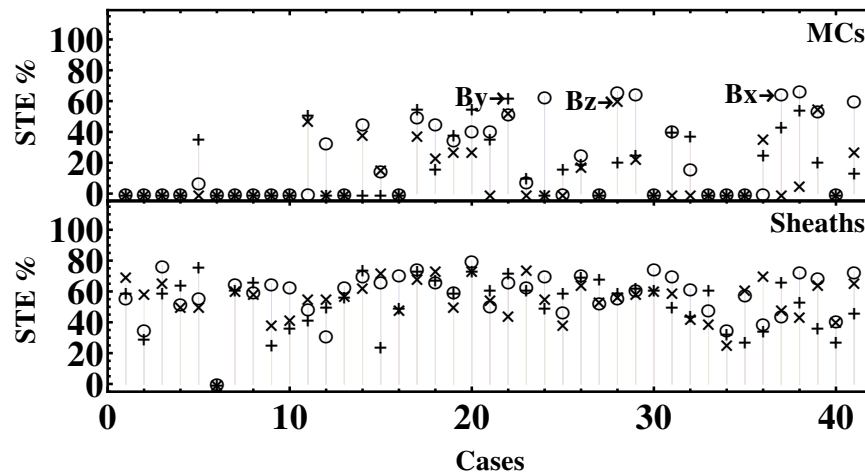
Este modelo representado na Figura 4 chama-se livre de força porque o produto vetorial da densidade de corrente  $\vec{J}$  e o campo magnético  $\vec{B}$  é nulo. A solução analítica do modelo com campo magnético livre de força depende da função de Bessel de primeira

Figura 1 – O painel superior mostra no eixo das abscissas os valores de STE da componente z do campo magnético interplanetário de 20 MCs, 17 DIs excluindo as MCs e 20 períodos de vento solar calmo, no eixo das ordenadas mostra-se o valor mínimo do índice Dst para cada evento. O painel inferior representa um gráfico similar ao da direita mas para os valores de STE da componente x do vento solar.



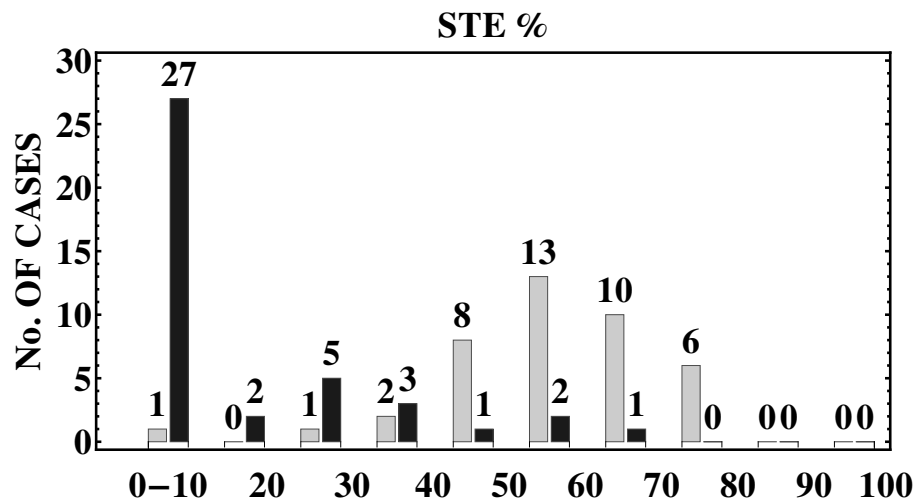
Fonte: Figuras 1 e 2 de Ojeda-Gonzalez *et al.* (2005)

Figura 2 – O painel superior é a representação dos valores de STE das componentes do IMF em 41 MCs observadas *in situ* pelo satélite ACE entre os anos de 1998 a 2003. O painel inferior mostra os valores de STE para as respectivas bainhas magnéticas de cada uma das MCs. O principal resultado observado na figura é o valor nulo de STE em mais da metade das 41 MCs estudadas.



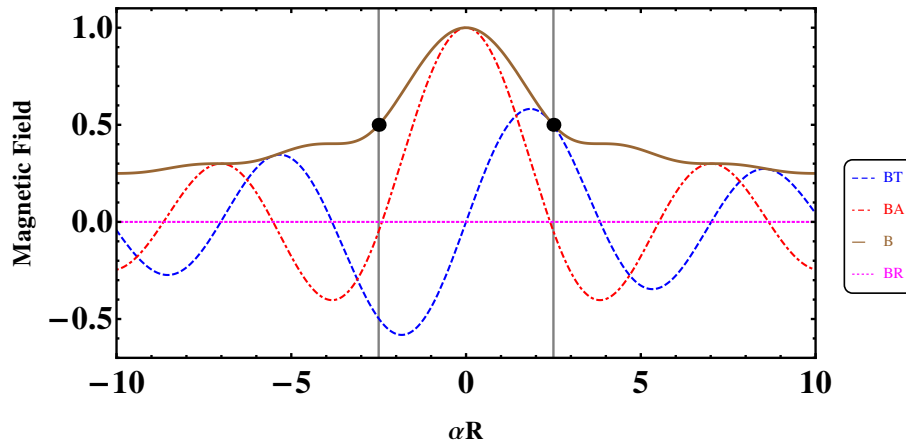
Fonte: Figura 4 de Ojeda-González *et al.* (2013)

Figura 3 – O histograma foi gerado a partir dos valores da componente  $B_z$  plotada na Figura 2. As barras pretas representam as MCs e as barras cinzas as respectivas bainhas magnéticas de cada uma das MCs. Observa-se que 29 nuvem apresentam entropia menor que 20 % e somente 1 bainha magnética encontrasse nesse intervalo.



Fonte: Figura 5 de Ojeda-González *et al.* (2013)

Figura 4 – Representação do modelo com campo magnético livre de força ou *magnetic force-free model* como apresentado no trabalho de Burlaga (1988). As quatro linhas de cores diferentes foram obtidas a partir das componentes axial ( $B_A$ ), tangencial ( $B_T$ ), radial ( $B_R$ ) e total ( $B$ ) do campo magnético obtidas do modelo. As linhas verticais identificam as fronteiras do modelo que se definiu nos pontos onde  $B_A = 0$ , sendo que no sistema de Equações (2.2) considerou-se  $\alpha R = 2, 4$  e  $B/B_0 = 0, 5$  com  $\alpha = 1$ .



Fonte: Figura 11 de Ojeda-González *et al.* (2013)

espécie de ordem zero ( $J_0$ ) e um ( $J_1$ ):

$$\text{Componente Axial : } B_A = B_0 J_0(\alpha R), \quad (2.2)$$

$$\text{Componente Tangencial : } B_T = B_0 H J_1(\alpha R), \quad (2.3)$$

$$\text{Componente Radial : } B_R = 0, \quad (2.4)$$

$$\text{Campo magnético Total : } B = \sqrt{B_A^2 + B_T^2 + B_R^2}, \quad (2.5)$$

sendo  $H$  a helicidade magnética que pode ser  $\pm 1$ ,  $\alpha$  é uma constante,  $B_0$  é o valor do campo magnético no eixo na nuvem e  $R$  o raio da nuvem a partir do eixo. Os autores concluem que os baixos valores de entropia encontrado em mais de 50% das MCs estudadas, justificam-se pelo fato de que ao simular uma nuvem magnética ideal utilizando o modelo com campo magnético livre de força, as componentes dessa nuvem ideal apresentam valores de entropia espaço-temporal iguais a:

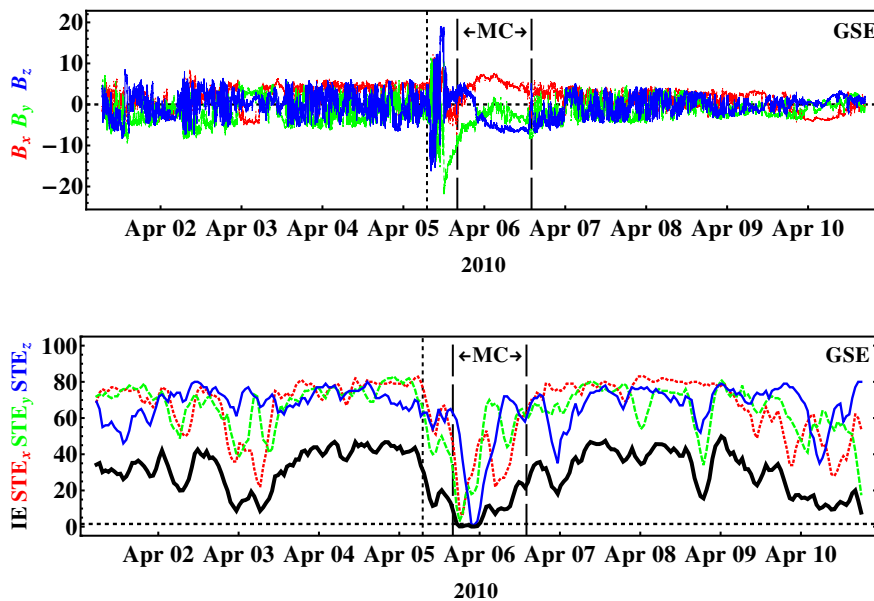
$$\text{STE de } B_A = 27\%, \quad (2.6)$$

$$\text{STE de } B_T = 0\%, \quad (2.7)$$

$$\text{STE de } B_R = 0\%, \quad (2.8)$$

$$\text{STE de } B = 25\%. \quad (2.9)$$

Figura 5 – O painel superior mostra as componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  do IMF medidos *in situ* pelo satélite ACE com resolução temporal de 16 s e em coordenadas GSE (do inglês, Geocentric Solar Ecliptic system). O painel inferior mostra os valores da entropia espaço-temporal (STE) em função do tempo para as séries temporais das componentes do campo magnético: sendo  $STE_{B_x}$  linha pontilhada vermelha,  $STE_{B_y}$  linha tracejada verde e  $STE_{B_z}$  linha fina contínua azul. A curva preta e grossa representa o índice IE calculado ao longo do período analisado. Os tempos de choque, início e fim da MC identificada no artigo, são representados por três linhas verticais.



Fonte: Figura 7 de Ojeda-González *et al.* (2017a)

No artigo Ojeda-González *et al.* (2017a), foi realizada uma pesquisa onde a partir da STE os autores propuseram uma fórmula para calcular um índice de entropia interplanetária (de agora em diante será chamado de índice IE). O índice IE foi definido como sendo o produto da STE de cada uma das componentes do IMF medidos *in situ* em janelas de 11 horas de dados e normalizado pelo fator  $10^4$ . A normalização é conveniente para mostrar o índice IE na mesma escala do valor da STE, que é de 0% a 100%. As janelas de 11 horas são deslocadas através de cada série temporal permitindo fazer um estudo janelado da STE. O índice IE calcula-se por meio da seguinte fórmula:

$$IE = \prod_i \frac{STE_i}{10^4} [\%], \text{ onde } i=[x, y, z]. \quad (2.10)$$

O índice IE deve ser menor que  $\approx 1.5\%$  (onde zero é o melhor resultado) para considerar que uma determinada região de estudo no vento solar seja possivelmente uma forte candidata de ser uma MC.

O valor deste índice está relacionado com duas das três propriedades definidas por Burlaga e Klein (1980), Burlaga *et al.* (1981) para identificar um evento como MC,

porém, paralelamente com o índice IE foi utilizado o método de mínima variância (SONNERUP; CAHILL, 1967; SONNERUP; SCHEIBLE, 1998) e com isso fazendo uma análise visual do comportamento do beta do plasma<sup>2</sup> e da densidade do mesmo. A modo de informação para o leitor, pode-se mencionar que o valor médio da beta do plasma no vento solar em 1 AU é da ordem de 0,8. Esse valor diminui bastante, inferior a 0,1, quando são identificadas MCs, por exemplo.

A partir do índice IE foi possível identificar duas MCs, a primeira foi identificada entre os dias 7 e 8 de Outubro de 2000, e a segunda entre os dias 5 e 6 de Abril de 2010. A modo de exemplo, apresenta-se a Figura 5 onde se evidencia claramente que o índice IE torna-se nulo somente no interior da MC. Além do mais, o índice IE foi calculado ao longo de todo o ano de 2001, mostrando-se efetivo para identificar 70% das MCs identificadas por outros autores.

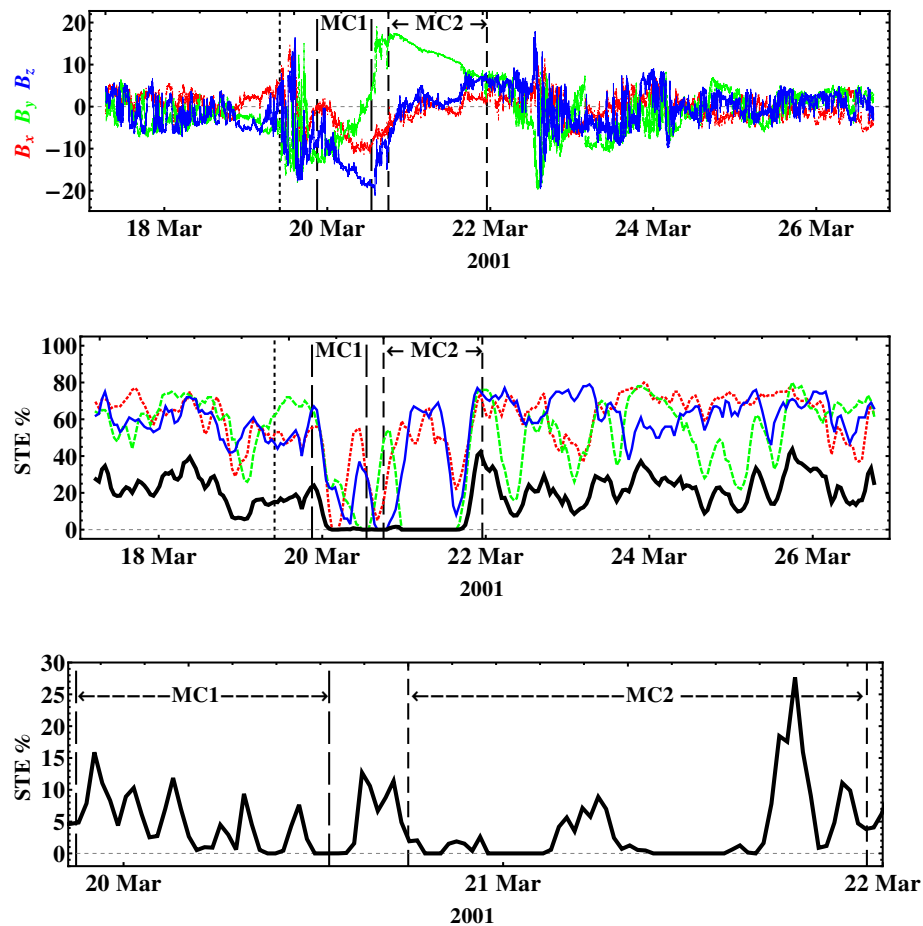
Um outro trabalho do mesmo grupo de pesquisa publicado por Ojeda-González *et al.* (2017b) utilizou um total de seis métodos para estudar um evento complexo de MC observado no meio interplanetário nas proximidades da Terra. O objetivo desse trabalho foi responder se a nuvem observada entre os dias 19 a 22 de Março de 2001 corresponderia com uma nuvem simples ou dupla, como resultado da interação entre duas MCs simples. Um dos métodos utilizados e que resultou de muita utilidade, foi o índice IE calculado a partir da STE como representado na Figura 6. Como resultado do artigo, foi sugerido que o evento observado corresponde com duas MCs, como representado no painel inferior da Figura 6.

Do anteriormente apresentado, fica evidente a necessidade de continuar resolvendo o problema relacionado com o estudo da entropia no vento solar. O índice IE se apresentou como uma ferramenta alternativa muito útil para identificar MCs. No entanto os trabalhos basicamente focaram no estudo da entropia em MCs, faltando uma complementação do mesmo aplicado ao restante dos DIs e utilizando outros métodos que também calculem a entropia em séries temporais sem necessidade de utilizar um software "caixa preta" como o VRA.

---

<sup>2</sup>  $\beta = (\text{pressão cinética}) / (\text{pressão magnética})$

Figura 6 – O painel superior mostra as componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  do IMF medidos *in situ* pelo satélite ACE com resolução temporal de 16 s e em coordenadas GSM (do inglês, Geocentric Solar Magnetospheric system). O painel do meio mostra os valores da entropia espaço-temporal (STE) em função do tempo para as séries temporais das componentes do campo magnético: sendo  $STE_{B_x}$  linha pontilhada vermelha,  $STE_{B_y}$  linha tracejada verde e  $STE_{B_z}$  linha fina contínua azul. A curva preta e grossa representa o índice IE calculado ao longo do período analisado. O painel inferior é um *zoom* na região das MCs para fazer o cálculo do índice IE em janelas de 2.5 h em lugar de 11 h. Os tempos de choque, início e fim das duas MCs identificada no artigo, são representados por três linhas verticais.



Fonte: Figura 2 de Ojeda-González *et al.* (2017b)

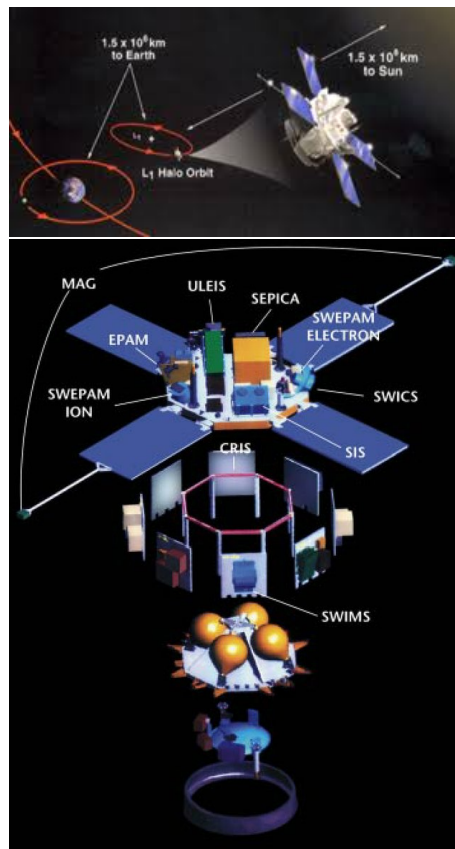
### 3 Dados e Metodologia

Neste capítulo explica-se como é feito o processamento dos dados e detalhes do local onde estão disponíveis esses dados. Após o pré-processamento dos dados, é necessário apresentar os quatro métodos de cálculo da entropia, utilizados para analisar os dados. Por último apresenta-se detalhes de como é realizada a metodologia para escolha do período de estudo com as respectivas datas dos Distúrbios Interplanetários.

#### 3.1 DADOS

Primeiramente precisa-se esclarecer que o presente trabalho não visa identificar os DIs, para isso, são utilizados catálogos disponíveis na literatura. As referências utilizadas para uso dos catálogos é apresentada na última seção deste capítulo. Nesta seção apresenta-se detalhes dos instrumentos e os locais na *web* onde os dados estão disponíveis.

Figura 7 – O painel superior mostra detalhes da órbita do satélite ACE no ponto L1. O painel inferior é uma representação do satélite ACE sinalizando o nome dos dez instrumentos. Desses dez instrumento nesta pesquisa são utilizados dados do instrumento MAG e do SWEPAM ION.



Fonte: Christian e Davis (1997)

A principal fonte de dados que dará sustentação ao trabalho é o satélite ACE (em inglês, *Advanced Composition Explorer*) localizado no ponto de Lagrange L1. Este é o ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra localizado externamente à magnetopausa e cuja órbita é concêntrica com a Terra. Essa localização privilegiada permite que o ACE faça medições *in situ* no vento solar aproximadamente 30 minutos antes que as partículas cheguem a magnetopausa (ver Figura 7, painel superior). (Odim Mendes 1992) Dos dez instrumentos a bordo do ACE nesta pesquisa são usados dois instrumentos. O instrumento MAG, responsabilidade de Smith *et al.* (1998), é formado por um magnetômetro *flux-gate* que mede as componentes dos campo magnético interplanetário. O instrumento SWEPAM, responsabilidade de McComas *et al.* (1998), é formado por um detetor de partículas que mede a velocidade, densidade e temperatura dos prótons (ver Figura 7, painel inferior).

Os dados estão disponíveis na *web* no site <<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>>. Os dados medidos pelos instrumentos MAG e SWEPAM estão disponíveis na primeira e segunda coluna da Tabela que aparece na página web. Após escolher um dos instrumentos, se abre outra janela que permite escolher a resolução temporal de interesse. A modo de exemplo escolhemos dados do MAG com resolução temporal de 16 s do ano de 2001, após essa seleção será aberta uma outra janela para marcar o período de interesse (em dias do ano) e as magnitudes de interesse.

Na Figura 8, foi feita uma imagem da tela do computador selecionando os dados de campo magnético em coordenadas GSM (em inglês, *Geocentric Solar Magnetospheric*) escolhendo como exemplo o mês de maio de 2001. Após marcar os dados de interesse, se procede à realização do download do arquivo que será guardado no computador como extensão ".dat". Para a escolha do dia do ano na Figura 8 é necessário consultar o seguinte calendário: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/Calendar.jsp?view=DOY&year=2001&col=4>>.

Em resumo, do site do ACE foram obtidos três arquivos de dados para o ano de 2001, no total são três arquivos, um para cada componente do IMF. O arquivo está organizado com dado do IMF em coordenadas GSM e com resolução temporal de 16 s. As cinco primeiras colunas de cada arquivo são as seguintes: ano, dia do ano, hora, minuto e segundo. A última coluna corresponde a uma das três componentes do IMF (*i.e.*, Bx, By ou Bz). Posteriormente foi criado um programa utilizando o Software Wolfram Mathematica que processa separadamente cada um dos três arquivos com o objetivo de organizar os dados nos respectivos 12 meses do ano. Por exemplo, para o ano de 2001 foi criada uma pasta com nome "DadoProcessado2001", e no seu interior foram criadas três pastas com nomes "Bx", "By" e "Bz", e no interior de cada pasta foram criadas 12 pastas como segue:

- a) No interior da pasta "Bx" estão as subpastas: BxJan, BxFeb, BxMar, BxApr, BxMay, BxJun, BxJul, BxAug, BxSep, BxOct, BxNov e BxDec;

Figura 8 – Escolha do arquivo de dados do instrumento MAG abordo do satélite ACE que se utiliza neste trabalho para o cálculo da entropia.

Accessing data from: [mag\\_data\\_16sec\\_year2001.hdf](#)

**MAG 16-second Averaged Interplanetary Magnetic Field Data.**

Select the data items you want to retrieve.

For more information, click on items in the first column.

<b>Time (UT)</b>	<input checked="" type="checkbox"/> year	<input checked="" type="checkbox"/> day	<input checked="" type="checkbox"/> hour	<input checked="" type="checkbox"/> min	<input checked="" type="checkbox"/> sec
	<input type="checkbox"/> year (float)	<input type="checkbox"/> day (float)	<input type="checkbox"/> ACEepoch	<input type="checkbox"/> SC clock	
<b>Magnetic Field (nT)</b>	<input type="checkbox"/> B <sub>R</sub> (RTN)	<input type="checkbox"/> B <sub>T</sub> (RTN)	<input type="checkbox"/> B <sub>N</sub> (RTN)		
	<input type="checkbox"/> < B >	<input type="checkbox"/> RTN Lat.	<input type="checkbox"/> RTN Long.		
	<input type="checkbox"/> B <sub>x</sub> (GSE)	<input type="checkbox"/> B <sub>y</sub> (GSE)	<input type="checkbox"/> B <sub>z</sub> (GSE)		
	<input checked="" type="checkbox"/> B <sub>x</sub> (GSM)	<input checked="" type="checkbox"/> B <sub>y</sub> (GSM)	<input checked="" type="checkbox"/> B <sub>z</sub> (GSM)	<input type="checkbox"/> delta-B (rms)	<input type="checkbox"/> sigma-B
<b>Quality flags</b>	<input type="checkbox"/> fraction good	<input type="checkbox"/> # Data points	<input type="checkbox"/> Quality		
<b>Spacecraft Position</b>	<input type="checkbox"/> GSE_x	<input type="checkbox"/> GSE_y	<input type="checkbox"/> GSE_z		
	<input type="checkbox"/> GSM_x	<input type="checkbox"/> GSM_y	<input type="checkbox"/> GSM_z		

or  [check here to select all the data](#)

Starting "YR/DOY":  Ending "YR/DOY":  (Example: 98/37, note: no leading zeros)

Choose Data Format:  X-Y Plot  Text file download  Text on Screen

**Plotting options (ignored for data downloads)**

Multiple Plotting:  Stacked  Overplot **Maximum of 6 allowed.**

Y-axis Scaling:  Logarithmic  Linear

**For MAG data, only linear Y-axis scaling is recommended.**

Y-axis Range:  Same scale for all stacked plots with common units.

Select the X-axis:

[MAG Level2 Data Main Page](#)

[ACE Science Center Home Page](#)

Vdata Name	Class	Number of Records	Number of Fields
MAG_data_16sec	MAG data 16sec	1971001	32

Fonte: <[http://www.srl.caltech.edu/cgi-bin/dib/rundibviewmagl2/ACE/ASC/DATA/level2/mag?mag\\_data\\_16sec\\_year2001.hdf!hdfref;tag=1962,ref=3,s=0](http://www.srl.caltech.edu/cgi-bin/dib/rundibviewmagl2/ACE/ASC/DATA/level2/mag?mag_data_16sec_year2001.hdf!hdfref;tag=1962,ref=3,s=0)>

- b) No interior da pasta “By” estão as subpastas: ByJan, ByFeb, ByMar, BxApr, BxMay, ByJun, ByJul, ByAug, BxSep, ByOct, ByNov e ByDec;
- c) No interior da pasta “Bz” estão as subpastas: BzJan, BzFeb, BzMar, BzApr, BzMay, BzJun, BzJul, BzAug, BzSep, BzOct, BzNov e BzDec.

A série temporal do mês foi particionada em subséries de 2500 pontos cada, fazendo pulos de 200 pontos de uma série de 2500 pontos até o começo da seguinte. Este procedimento é o mesmo utilizado por Ojeda-González *et al.* (2017a). Por exemplo, para meses com 31 dias, são construídas 825 séries temporais, ao mesmo tempo, para meses com 30 dias o número de séries é igual a 798. Em resumo, os arquivos são organizados da seguinte maneira: no interior de pasta, por exemplo, para o ano de 2001 na subpasta “BxJan” tere-

mos os arquivos “ACE2001Bx001.dat”, “ACE2001Bx002.dat”, “ACE2001Bx002.dat”, ..., “ACE2001Bx825.dat”.

Figura 9 – Escolha do arquivo de dados do instrumento MAG abordo do satélite ACE que se utiliza neste trabalho para o cálculo da Alvenicidade.

Accessing data from: [magswe\\_data\\_64sec\\_year2001.hdf](#)

**MAG and SWEPM 64-second Averaged IMF and Solar Wind Ion Parameters.**

Select the data items you want to retrieve.

For more information, click on items in the first column.

<b>Time (UT)</b>	<input checked="" type="checkbox"/> year	<input checked="" type="checkbox"/> day	<input checked="" type="checkbox"/> hour	<input checked="" type="checkbox"/> min	<input checked="" type="checkbox"/> sec	
	<input type="checkbox"/> year (float)	<input type="checkbox"/> day (float)	<input type="checkbox"/> ACE epoch			
<b>Solar Wind Ions</b>	<input type="checkbox"/> H <sup>+</sup> density	<input type="checkbox"/> H <sup>+</sup> temp	<input type="checkbox"/> <sup>4</sup> He/H <sup>+</sup>	<input type="checkbox"/> H <sup>+</sup> speed		
	<input type="checkbox"/> velocity <sub>RTN</sub>	<input type="checkbox"/> velocity <sub>T</sub>	<input type="checkbox"/> velocity <sub>N</sub>	<input type="checkbox"/> velocity <sub>X</sub>	<input type="checkbox"/> velocity <sub>Y</sub>	<input type="checkbox"/> velocity <sub>Z</sub>
	<input checked="" type="checkbox"/> velocity <sub>GSM</sub>	<input checked="" type="checkbox"/> velocity <sub>GSM</sub>	<input checked="" type="checkbox"/> velocity <sub>GSM</sub>			
<b>Magnetic Field (nT)</b>	<input type="checkbox"/> B <sub>R</sub> (RTN)	<input type="checkbox"/> B <sub>T</sub> (RTN)	<input type="checkbox"/> B <sub>N</sub> (RTN)	<input type="checkbox"/> B <sub>X</sub> (GSE)	<input type="checkbox"/> B <sub>Y</sub> (GSE)	<input type="checkbox"/> B <sub>Z</sub> (GSE)
	<input checked="" type="checkbox"/> B <sub>X</sub> (GSM)	<input checked="" type="checkbox"/> B <sub>Y</sub> (GSM)	<input checked="" type="checkbox"/> B <sub>Z</sub> (GSM)			
	<input type="checkbox"/> < B >	<input type="checkbox"/> RTN Long.	<input type="checkbox"/> RTN Lat.	<input type="checkbox"/> delta-B (rms)		
<b>Spacecraft Position</b>	<input type="checkbox"/> GSE <sub>x</sub>	<input type="checkbox"/> GSE <sub>y</sub>	<input type="checkbox"/> GSE <sub>z</sub>	<input type="checkbox"/> GSM <sub>x</sub>	<input type="checkbox"/> GSM <sub>y</sub>	<input type="checkbox"/> GSM <sub>z</sub>
	<input type="checkbox"/> HS <sub>x</sub>	<input type="checkbox"/> HS <sub>y</sub>	<input type="checkbox"/> HS <sub>z</sub>			

or  check here to select all fields

Starting "YR/DOY":  Ending "YR/DOY":  (Example: **98/37**, note: no leading zeros)

**Choose Data Format:**  X-Y Plot  Text file download  Text on Screen

**Plotting options (ignored for data downloads)**

**Multiple Plotting:**  Stacked  Overplot **Maximum of 6 allowed.**

**Y-axis Scaling:**  Logarithmic  Linear

**Y-axis Range:**  Same scale for all stacked plots with common units.

**Select the X-axis:**

**Y-axis label:**

[SWEPM Level2 Data Main Page](#)

[MAG Level2 Data Main Page](#)

[ACE Science Center Home Page](#)

Vdata Name	Class	Number of Records	Number of Fields
MAGSWE_data_64sec	MAGSWE data 64sec	492753	44

Fonte: <[http://www.srl.caltech.edu/cgi-bin/dib/rundibviewmagswel2/ACE/ASC/DATA/level2/magswe?magswe\\_data\\_64sec\\_year2001.hdf!hdfref;tag=1962,ref=3,s=0](http://www.srl.caltech.edu/cgi-bin/dib/rundibviewmagswel2/ACE/ASC/DATA/level2/magswe?magswe_data_64sec_year2001.hdf!hdfref;tag=1962,ref=3,s=0)>

Com os dados organizados pode-se proceder ao processamento com qualquer ferramenta de análise de séries temporais. Por exemplo, se o objetivo é calcular a Entropia Espaço-Temporal, calcula-se um valor de entropia para cada uma das séries temporais organizadas nas subpastas. Continuando com o exemplo da subpasta “BxJan”, teríamos calculado um total de 825 valores de STE. Após calcular cada valor de STE é importante relacioná-lo com uma data. Para isto, é necessário fazer outro programa que referencie cada um dos 825 valores de STE com a data correspondente à data verdadeira da metade da série temporal do qual a entropia foi calculada. Esse passo geralmente é feito no final

do processo quando os resultados são visualizados em gráficos. O trabalho anterior, foi realizado no projeto FAPESP (no. processo 2016/25563-6) e no processamento de dados no trabalho de Ojeda-González *et al.* (2017a). No começo do trabalho, revisitamos o mês de maio de 2001 para entender como é que funciona todo o processo de pré-processamento dos dados. O estudo do mês de maio era a proposta inicial, apresentada na proposta, mas que terminamos por estender o trabalho para todo o período de 1999 a 2001.

Durante o trabalho também teremos interesse em determinar a presença de ondas de Alfvén no vento solar. Para identificar ondas de Alfvén, a série temporal de componentes da velocidade do vento solar ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) e as componentes do campo magnético interplanetário (IMF  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ ) precisam serem processados. Desta maneira, posteriormente pode-se calcular o coeficiente de correlação de Pearson. De acordo com Belcher, Davis Jr. e Smith (1969), o coeficiente de correlação de Pearson pode ser usado como um indicador da existência de ondas de Alfvén se propagando no vento solar. Utilizou-se a metodologia de correlação cruzada de Pearson para intervalos de 4 h (4WPCC) entre as componentes do IMF e as componentes da velocidade do vento solar ( $V_x$ - $B_x$ ,  $V_y$ - $B_y$  e  $V_z$ - $B_z$ ). Esses dados precisam serem obtidos da página do ACE seguindo o seguinte link: <<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>> e selecionando a penúltima linha da tabela que aparecerá na página, exatamente onde diz *MAG/SWEPAM Data*. Os dados são selecionados em coordenadas GSM conforme seleção representada na Figura 9.

Considerando a resolução temporal de 64 segundos, e retardo nulo, medidos pelo satélite ACE, em 4 h de dados, 225 valores em cada série temporal são processados para obtenção de uma média aritmética, que é atribuída às 4 h de dados. E desta maneira, a série temporal é simplificada em vários pontos obtidos por médias aritméticas parciais, de acordo com o intervalo pretendido. O *Software* utilizado foi o *Wolfram Mathematica*, versão para estudante, e os resultados foram assim processados durante 365 dias do período que corresponde ao ano de 2001.

Para calcular a velocidade de Alfvén e a beta do plasma é necessário também utilizar os dados com resolução temporal de 64 s de densidade e temperatura, fornecidos pelo ACE em: <<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>> onde diz *MAG/SWEPAM Data*. Durante o exame de qualificação tínhamos a proposta de calcular a  $\beta$  do plasma e a velocidade de Alfvén, no entanto, com a proposta de trabalhar com o intervalo 1999-2001, foi decidido não incorporar este estudo.

Caso seja necessário fazer uma comparação dos resultados com a atividade geomagnética durante os DIs, dados dos índices geomagnéticos podem ser obtidos da página do instituto de Geomagnetismo, localizada na cidade de Kyoto, Japão, ou seja, *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto* disponível em <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>>.

## 3.2 METODOLOGIA

Nesta seção explica-se por separado os quatro métodos de entropia que são utilizados para realizar o estudo dos DI.

### 3.2.1 ENTROPIA ESPAÇO-TEMPORAL - STE

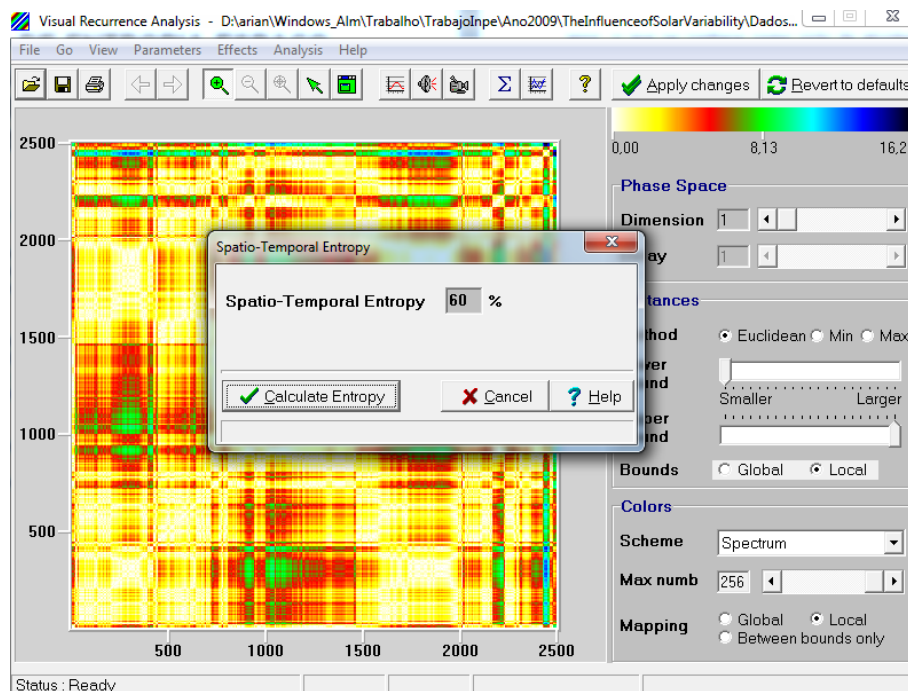
Para calcular a STE foi utilizado o software *Visual Recurrence Analysis (VRA)*. Neste software será carregada a série temporal de Bx, By ou Bz, e imediatamente é mostrada a imagem denominada gráfico de recorrência (RP) (Facchini; Mocenni; Vicino, 2009). Depois a STE é um cálculo que se faz sobre esta imagem, como mostrado na Figura 10.

Tabela 1 – Classificação do sinal para as diferentes faixas de STE.

Sinal	Entropia Espaço-Temporal
Periódico	~ 0 – 20%
Caótico	~ 50%
Aleatório	~ 80 – 100%

Fonte: Ojeda-Gonzalez *et al.* (2005)

Figura 10 – Visualiza-se uma janela com o software VRA no momento em que se fez o cálculo de STE.



Fonte: Ojeda-González *et al.* (2013)

O cálculo da STE pode ser feito sobre séries temporais sintéticas, onde a priori é conhecido se a serie é determinística, caótica ou aleatória. A faixa de valores derivados do

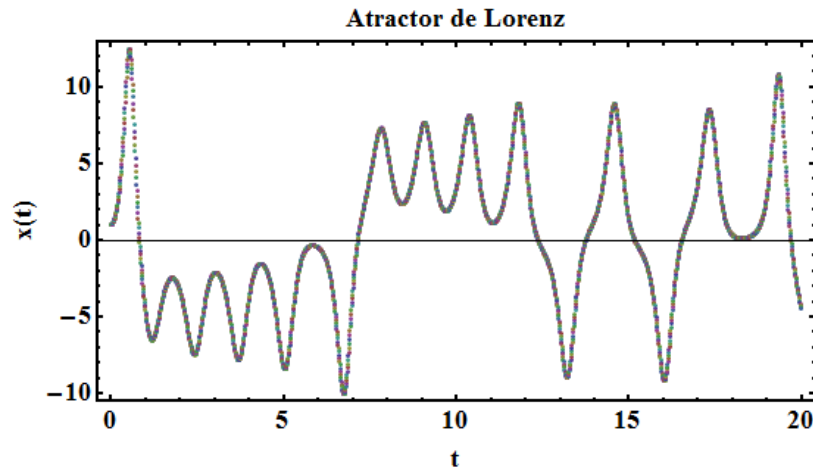
cálculo da entropia se espera que estejam nas faixas mostradas na Tabela 1. O cálculo da STE depende dos valores de:

- (i)  $m \rightarrow$  dimensão de mergulho (em inglês, *embedding dimension*) e
- (ii)  $\tau \rightarrow$  tempo de retardo (em inglês, *embedding time delay*)

com os quais foi construído o plot de recorrência. Os valores automáticos que aparecem no software são  $m = 1$  e  $\tau = 1$ , os quais são fixados para usar em todos os cálculos da STE para continuar com a metodologia do trabalho de Ojeda-Gonzalez *et al.* (2005).

A Equação (2.10) é utilizada para calcular um índice de entropia interplanetária (IE), esse índice é obtido pelo processo de multiplicar os valores da STE em cada uma das três componentes do IMF, para posteriormente ser normalizado por  $10^4$ . Utilizando a Equação (2.10) é obtido um único valor numérico de IE. Esses valores são calculados em séries discretas com 2500 valores cada, o que representa intervalos com janelas de aproximadamente 11 horas e com resolução temporal de 0,89 h. Segundo discutido por Ojeda-González *et al.* (2013), Ojeda-González *et al.* (2017a), o tamanho dessas janela se justifica pela durabilidade média das MC (1 dia) e para diminuir o erro do método STE que está afetado pelo comprimento da série temporal.

Figura 11 – Visualiza-se a série temporal de  $x(t)$  obtida do Atrator de Lorenz representado pela Equação 3.1.



Fonte: O Autor

A dificuldade de utilizar este método é que para estudar por exemplo o mês de janeiro de 2001, deve-se carregar manualmente no *software* todas as séries temporais. Neste caso teríamos para cada uma das três componentes do IMF um total de 825 séries temporais, isto equivale a fazer 2475 vezes o mesmo processo. Somente foi possível utilizar esses dados porque eles tinham sido processados em pesquisas anteriores do grupo de trabalho do orientador. De fato, o intuito de usar outros métodos que também utilizam

como base a entropia de Shannon, foi para automatizar esse processo de cálculo das entropias. Com esse intuito apresentam-se as próximas três subseções com três métodos de cálculo da entropia, baseados na fórmula de Shannon.

A modo de teste, pode-se gerar uma série temporal a partir do Atrator de Lorenz:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \sigma_0[y(t) - x(t)], \quad (3.1)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = x(t)[\rho_0 - z(t)] - y(t), \quad (3.2)$$

$$\frac{dz(t)}{dt} = x(t)y(t) - \beta_0 z(t). \quad (3.3)$$

Sendo que:  $\sigma_0$  (número de Prandtl),  $\rho_0$  (número de Rayleigh) e  $\beta_0$  são todos parâmetros adimensionais relacionados com a forma das órbitas deste atrator, utilizado para estudar Caos. Com os valores  $\sigma_0 = 3$ ,  $\rho_0 = 26,5$  e  $\beta_0 = 1$  o sistema é caótico e pode-se gerar uma série temporal de  $x(t)$ . Neste caso foi gerado uma série temporal de 2500 pontos, fazendo  $t$  variar de 0 até 20 em intervalos de 0.008 (ver Figura 11).

A STE da série temporal representada na Figura 11 é de 60%. Variando no Atrator de Lorenz o valor de  $\rho_0$  se obtém órbitas periódicas. Neste caso fazendo  $\rho_0 = 22$ , o valor da STE diminui para 49%.

### 3.2.2 ENTROPIA ESPECTRAL - SE

A entropia espectral (em inglês, *Spectral Entropy*) mensura a irregularidade, complexidade ou a quantidade de desordem da série temporal (NUNES; ALMEIDA; SLEIGH, 2004). Os passos básicos para calcular a entropia espectral são os que seguem:

- Calcular o espectro de potência do sinal usando transformada rápida de Fourier (em inglês, *fast Fourier transform* ou FFT);
- Calcular a densidade espectral (em inglês, *power spectral density* ou PSD) utilizando o espectro de potência ou utilizando qualquer outra técnica;
- Normalizar a densidade espectral entre  $[0, 1]$ , de modo que ela pode ser tratada como uma função de densidade de probabilidade  $p_i$ ;
- Calcular a Entropia Espectral  $H(s) = -\sum p_i \log_2(p_i)$ .

Para fazer os cálculos da SE foi utilizado o seguinte código em MatLab, disponível em <<https://dsp.stackexchange.com/questions/10137/spectral-entropy-calculation-in-matlab>>. Foi possível adaptá-lo para utilizá-lo também em Octave que é um *software* livre. Neste caso teremos que chamar no programa principal a função *hannoctave.m* no lugar de *hann.m*.

A entropia espectral da série temporal representada na Figura 11 é de 47,0%. E fazendo  $\rho_0 = 22$  o valor da SE diminui para 21,8%.

### 3.2.3 ENTROPIA NA ANÁLISE DE QUANTIFICAÇÃO DE RECORRÊNCIA - ENTR

A análise de quantificação de recorrência é um método em que se extraem informações do gráfico de recorrência que por sua vez, são construídos a partir de séries temporais (ZBILUT; WEBBER, 1992; WEBBER; ZBILUT, 1994). Um gráfico (ou plot) de recorrência (RP) é uma matriz quadrada de ordem N preenchida com os valores das distâncias euclidianas entre os pontos da série temporal. A partir do RP também pode-se calcular uma outra entropia. Webber e Zbilut (1994) propuseram um conjunto de medidas de quantificação do RP, baseadas principalmente na distribuição estatística das estruturas das linhas diagonais no RP. As variáveis de recorrência são calculadas a partir da área triangular superior do gráfico de recorrência, excluindo a diagonal central, porque o gráfico é simétrico sobre a diagonal principal. A entropia (ENTR) é uma das magnitudes que se calcula do RP, isto é, a entropia de informação de Shannon calculada para a distribuição de probabilidade das linhas diagonais do RP. A ENTR mede a distribuição de frequência dos comprimentos das linhas diagonais. Ela reflete a complexidade da estrutura determinística no sistema. O cálculo baseia-se na seguinte equação:

$$ENTR = - \sum_{k=L_{min}, p(k) \neq 0}^{L_{max}} p(k) \log_2(p(k)), \quad (3.4)$$

em que,

$$p(k) = \frac{\text{número de linhas diagonais de comprimento } k \text{ no gráfico de recorrência}}{\text{número total de linhas diagonais no gráfico de recorrência}}. \quad (3.5)$$

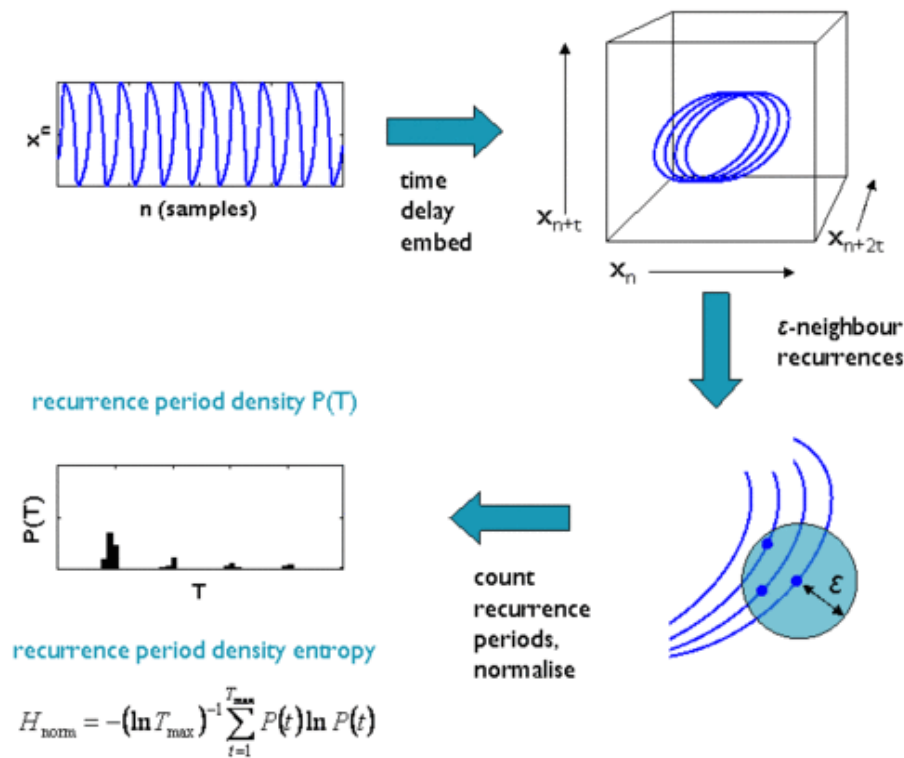
Para o cálculo da ENTR utilizam-se as funções em MatLab (adaptadas ao Octave) disponíveis na página de Charles L. Webber, Jr. no seguinte link <<http://cwebber.sites.luc.edu/>>. Primeiramente, deve-se chamar a função *RPplot.m*, entrando os valores da série temporal, e quatro parâmetros de entrada como segue:

- (i)  $m \rightarrow$  dimensão de mergulho;
- (ii)  $\tau \rightarrow$  tempo de retardo;
- (iii)  $\epsilon \rightarrow$  raio dos pontos vizinhos no Plot de Recorrência (em inglês, *recurrence neighbourhood radius*);
- (iv) *index*  $\rightarrow$  este valor quando zero, significa que deve-se calcular a distância euclidiana entre todos os pontos no RP, caso seja um, se deve utilizar somente a máxima distância.

Em nosso caso foi usado  $m = 1$ ,  $\tau = 1$ ,  $\epsilon = 0,5$  e  $index = 0$ . A função *RPplot.m* devolve o RP em forma de matriz quadrada e uma outra matriz quadrada com a distribuição de distâncias no RP. Posteriormente, precisa-se entrar com a matriz do RP na função *Recu\_RQA.m*, informando que ela seja processada como sendo uma matriz simétrica (ou seja,  $I = 0$ ). A função *Recu\_RQA.m* faz o cálculo de quatro parâmetros, um deles será a ENTR.

Esta entropia (ENTR) foi utilizado com sucesso por Mendes *et al.* (2017) para estudar eventos geomagnéticos chamados de HILDCAA (do inglês, *high-intensity, long-duration continuous auroral activity events*). O valor de esta entropia não está normalizado entre 0% e 100% como os métodos apresentados anteriormente. Por exemplo, para a série temporal representada na Figura 11 o valor da ENTR é 4,3. Para  $\rho_0 = 22$  o valor da ENTR diminui para 3,9.

Figura 12 – Descrição pictórica dos cálculos necessários para encontrar o valor RPDE.



Fonte: Little *et al.* (2007)

### 3.2.4 DENSIDADE DE ENTROPIA EM PERÍODO DE RECORRÊNCIA - RPDE

A densidade de entropia em período de recorrência (em inglês, *recurrence period density entropy* ou RPDE) é um método, nas áreas de sistemas dinâmicos, processos estocásticos e análise de séries temporais, para determinar a periodicidade, ou repetição de um sinal (LITTLE *et al.*, 2007). A RPDE é útil para caracterizar o grau ao qual uma série temporal repete a mesma sequência, e é, por conseguinte, semelhante à autocorrelação

linear, excepto que ele mede repetitividade no espaço de fase do sistema, e é, portanto, uma medida baseada na dinâmica do sistema subjacente que gerou o sinal. O valor RPDE  $H_{norm}$  é um escalar na faixa de zero a um. Para sinais puramente periódicas,  $H_{norm} = 0$ , enquanto que para sinais puramente aleatória, como por exemplo um ruído branco uniforme,  $H_{norm} = 1$ . Neste trabalho utilizaremos este valor no intervalo de 0 a 100%, ou seja, o resultado final fornecido pelo programa será multiplicado por 100%. A Figura 12 mostra um diagrama, utilizado por Little *et al.* (2007), com os passos necessários para calcular a RPDE. O código fonte em *MatLab* que também pode ser executado em *Octave* encontra-se em <<http://www.maxlittle.net/software/>>.

Este método depende de quatro parâmetros de entrada, em que três deles foram definidos na subseção anterior:

- (i)  $m \rightarrow$  dimensão de mergulho;
- (ii)  $\tau \rightarrow$  tempo de retardo;
- (iii)  $\epsilon \rightarrow$  raio dos pontos vizinhos no Plot de Recorrência;
- (iv)  $T_{max} \rightarrow$  tempo de recorrência máximo (em inglês, *maximum recurrence time*).

Na Seção 3.2.1 foi dito que a STE também depende de  $m$  e  $\tau$ , por esse fato é que para a RPDE utilizam-se os mesmos valores ( $m = 1$ , e  $\tau = 1$ ) para homogenizar os resultados. Fixando  $m$  e  $\tau$ , os valores de  $\epsilon$  e  $T_{max}$  são gerados automaticamente, sendo  $\epsilon = 0.12$  e  $T_{max} = -1$ . O valor  $T_{max} = -1$  significa que o programa considerará todos os tempos de recorrência para calcular a entropia.

A RPDE da série temporal representada na Figura 11 é de 72,8%. Para  $\rho_0 = 22$  o valor da RPDE diminui para 64,3%.

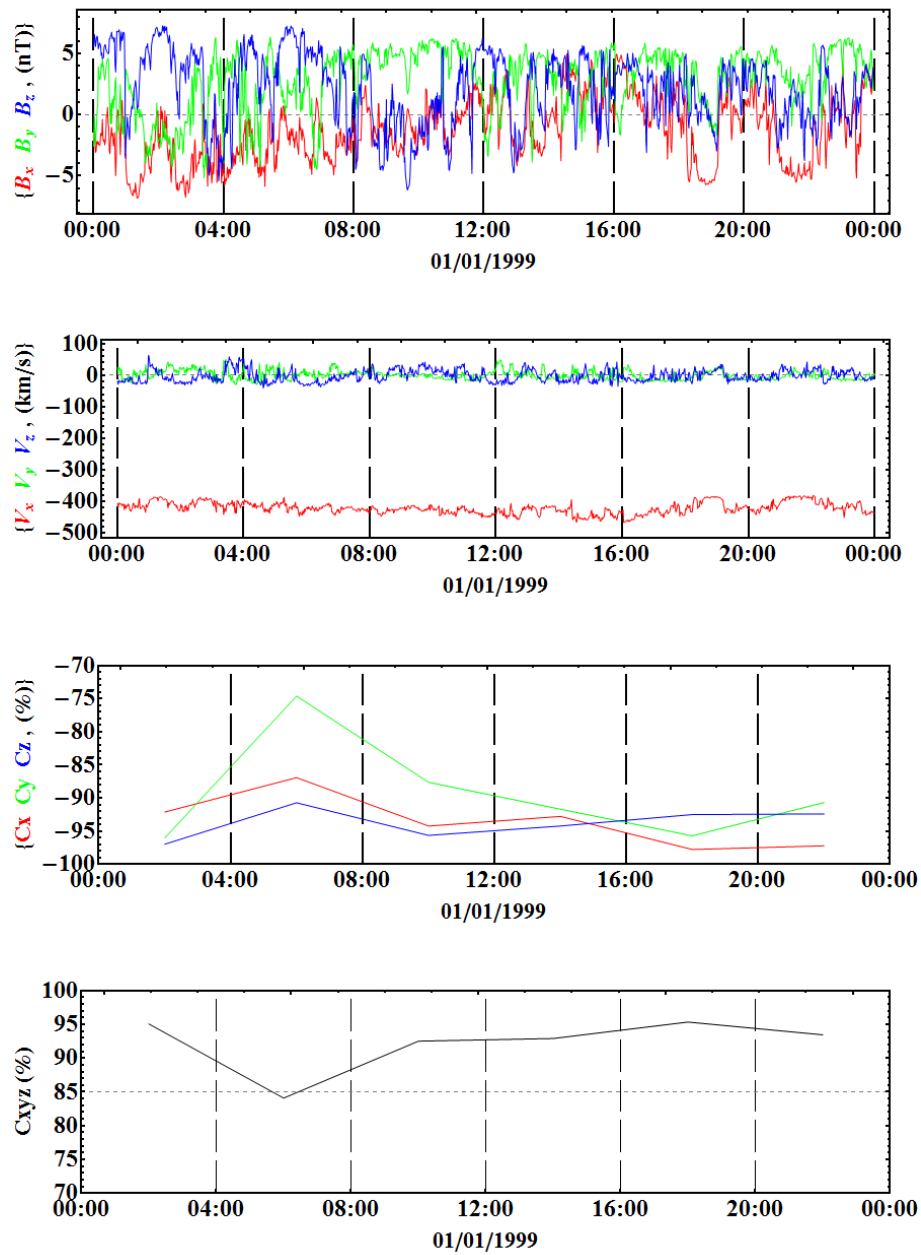
### 3.3 EXEMPLO METODOLÓGICO

Nesta seção, a modo de exemplo demonstrativo, a nossa metodologia será aplicada para um intervalo de tempo do vento solar. A seção é dividida em duas subseções: na primeira, explica-se como calcular a Alfvénicidade em um intervalo de um dia; na segunda, calculam-se os quatro métodos de entropia para um intervalo de 11,11 h (2500 pontos) do IMF.

#### 3.3.1 CÁLCULO DA ALFVENICIDADE

A Figura 13 está constituída por quatro painéis com o intuito de explicar cada um dos passos para identificar intervalos Alfvénicos. Para fazer este exemplo foram escolhidas as componentes do IMF e do vetor velocidade dos prótons em coordenadas GSM nas 24

Figura 13 – Figura resumo que explica o método para detectar intervalos Alfvênicos no vento solar na data de 01/01/1999. Os painéis de cima para baixo representam: as componentes do IMF, componentes da velocidade, as respectivas correlações por componentes centralizadas no meio do intervalo e o valor médio das correlações. O valor final que se utiliza na identificação de intervalos Alfvênicos é o representado no painel inferior.



Fonte: O Autor

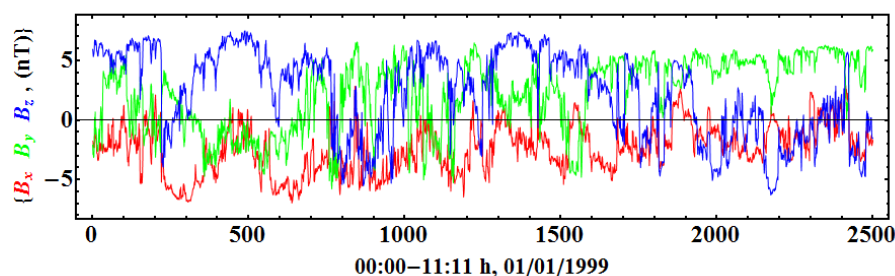
horas do dia primeiro de janeiro de 1999. No dois painéis superiores são representados os dados do IMF e da velocidade em cores vermelho (x), verde (y) e azul (z). As linhas verticais representam intervalos de quatro horas em que se calculará a correlação linear entre cada uma das componentes do IMF e da velocidade. O cálculo da correlação linear centralizado em cada intervalo de quatro horas é representado no terceiro painel. Este valor pode ser positivo ou negativo (anti-correlação), neste caso o resultado foi negativo. O sinal depende da orientação do IMF que pode estar apontando para a heliosfera ou para o sol. No último painel calculamos o valor médio do módulo da correlação das três componente em cada intervalo. O leitor pode notar que este resultado sempre será positivo com valores entre 0 e 100%.

A durabilidade do valor médio da correlação acima de um determinado limiar por um intervalo de tempo predefinido será utilizado como critério para a identificação de intervalos Alfvênicos. Posteriormente poderemos calcular a entropia nesses intervalos Alfvênicos.

### 3.3.2 CÁLCULO DA ENTROPIA

Para mostrar como acontece todo o procedimento metodológico para o cálculo da entropia das componentes do IMF estudam-se as primeiras 11 h horas do dia 1<sup>o</sup> de janeiro de 1999. Esta janela é obtida por meio do site do satélite ACE utilizando os dados com resolução temporal de 16 s e em coordenadas GSM. Este intervalo de série temporal com 2500 pontos representa-se na Figura 14. Cada componente do IMF foi representado em uma cor diferente, sendo: vermelho ( $B_x$ ), verde ( $B_y$ ) e azul ( $B_z$ ).

Figura 14 – Componentes do IMF referentes as primeiras 11 horas e 11 minutos do mês de janeiro de 1999. Estas séries temporais tem comprimento de 2500 valores e dados com resolução temporal de 16 s. A partir de este tipo de janela de dados é que se calcula a entropia.



Fonte: O Autor

A Tabela 2 sumariza os valores de entropia obtidos após aplicar os quatro métodos de cálculo de entropia em cada uma das três componentes do IMF da Figura 14. As duas últimas linhas da figura são úteis para entender como se procede para o cálculo do índice

de entropia interplanetária (IE). Este índice se expressa em porcentagem para a STE, SE e RPDE. Para os valores de ENTR não se expressa em porcentagem porque o método utilizado não fornece o valor dessa maneira, e por esse fato a normalização de  $10^4$  dos métodos STE e SE mudou para  $5 \times 10^{-1}$ . No caso do método RPDE, apesar de que o valor é fornecido em porcentagem, foi necessário normalizar por  $5 \times 10^3$  para uma melhor visualização dos resultados. Esta mudança na normalização não afeta a interpretação do resultado, matematicamente ela somente faz um deslocamento dos valores para uma melhor visualização.

Tabela 2 – Os quatro métodos de cálculo da entropia de Shannon são aplicados nas séries temporais das componentes do IMF representadas na Figura 14. Na penúltima coluna se mostra a fórmula utilizada para calcular o índice de entropia interplanetária (IE). A última coluna mostra o valor do IE para cada um dos métodos.

<b>IMF</b>	<b>STE (%)</b>	<b>SE (%)</b>	<b>ENTR</b>	<b>RPDE (%)</b>
$B_x$	78,0	85,3	1,6	53,2
$B_y$	68,0	86,8	2,0	54,4
$B_z$	70,0	84,0	2,2	55,9
Eq. de $IE$	$\prod_i \frac{STE_i}{10^4}$	$\prod_i \frac{SE_i}{10^4}$	$\prod_i \frac{ENTR_i}{5 \times 10^{-1}}$	$\prod_i \frac{RPDE_i}{5 \times 10^3}$
$IE =$	37,1	62,2	14,1	32,4

Fonte: O Autor

## 4 Resultados e Discussão

Neste capítulo discutiremos os resultados obtidos por meio histogramas estatísticos a dinâmica dos distúrbios utilizando os quatro métodos descritos no capítulo 3. Para tal construção estatística foi usada uma curva Gaussiana regida pela expressão:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (4.1)$$

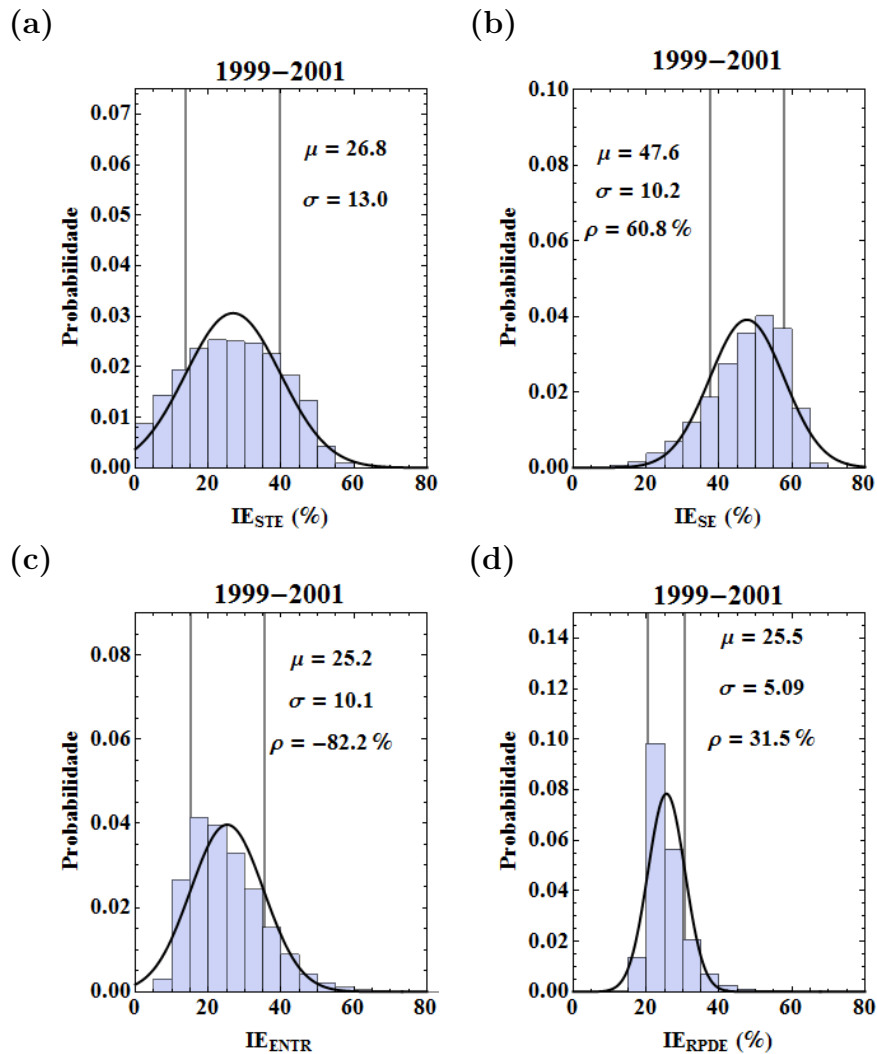
em que  $\mu$  representa o valor médio e  $\sigma$  o desvio padrão. Esta função terá um único valor máximo centralizado em  $x = \mu$ . O desvio padrão será responsável pela compacticidade da função. A partir dessa expressão foi calculada a probabilidade dos eventos estudados e gerada uma curva Gaussiana com valor médio e desvio padrão superposta com o respectivo histograma no mesmo gráfico.

### 4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA ENTROPIA DO IMF

O intuito de esta seção é estudar a distribuição estatística que segue o IE em cada um dos quatro métodos de entropia apresentados no Capítulo 3. Seguindo o mesmo procedimento apresentado na Tabela 2, foi calculado o IE para todo o período de dados do ACE desde 1999 a 2001. A Figura 15 mostra quatro painéis correspondentes a cada um dos métodos como segue: painel a) IE para a STE; b) IE para a SE; c) IE para a ENTR; d) IE para a RPDE. Em cada painel foi visualizado a distribuição Gaussiana dos valores do IE obtidos a partir da Equação 4.1. O valor médio ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ), ambos utilizados para obter a distribuição Gaussiana, são mostrados no interior de cada um dos painéis. O valor  $\rho$  mostrado nos painéis b), c) e d) representa o cálculo da correlação linear da série temporal de cada IE de um determinado método (SE, ENTR ou RPDE) em relação ao valor de IE da STE. O cálculo de  $\rho$  objetiva comparar cada método com o STE, pelo fato que este último é o mais utilizado para estudar MCs. Além do mais, pretende-se deixar de utilizar a STE pela impossibilidade de automação do processo, sendo que ela (a STE) está implementada em um *software* fechado ("caixa preta").

Na distribuição Gaussiana os valores  $\mu - \sigma < x < \mu + \sigma$  estatisticamente representam 67,26% dos dados, já os valores  $\mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma$  equivalem a 95,44% dos dados. Esta característica oriunda da Gaussiana, pode ser importante para definir limiares tanto de baixa como de alta entropia, nas caldas da distribuição. A nossa hipótese é encontrar por exemplo, MCs com baixa STE, portanto seus valores deverão estar na calda esquerda da Gaussiana. Por outro lado, os intervalos Alfênicos deverão mostrar um comportamento bem diferente, ou seja, para altos valores de STE, deveremos ter concentração dos dados na calda direita da Gaussiana. As linhas verticais nos painéis da Figura 15 são limiares feitos a partir da relação  $\mu \pm \sigma$ .

Figura 15 – Esta figura agrupa os histogramas, com a respectiva distribuição Gaussiana, construídos a partir do cálculo do IE das componentes do IMF entre os anos 1999-2001. Cada painel foi construído com um dos métodos de entropia como segue: a) STE; b) SE; c) ENTR e d) RPDE. No interior de cada um dos gráficos existem informações importantes:  $\mu$  é o valor médio de IE em cada histograma e  $\sigma$  o desvio padrão,  $\rho$  representa a correlação linear de cada método em relação ao STE. As linhas verticais é um limiar obtido fazendo  $\mu \pm \sigma$ .



Fonte: O Autor

Na Figura 15a, observa-se que o  $IE_{STE}$  tem  $\mu = 26,8\%$  e  $\sigma = 13,0\%$  e os valores estão bem distribuídos por meio da Gaussiana. Existe uma pequena tendência de existir um número maior de valores do  $IE_{STE}$  à esquerda da média. A nossa hipótese em relação ao anterior é que estamos estudando um período de máximo de atividade solar, com um expressivo aumento dos DIs representados pelos ICMEs, com e sem a presença de MCs. Porém, essa quantidade de ICMEs devem ter baixa entropia e conseqüentemente, um acúmulo de intervalos com baixa entropia.

Na Figura 15b, os valores de  $IE_{SE}$  apresentam  $\mu = 47,6\%$  e  $\sigma = 10,2\%$ , ou seja, uma gaussiana que se comparada com o painel a) mostra um maior deslocamento à direita, sendo mais compacta. Existem barras do histograma que à direita do valor médio ultrapassam a curva gaussiana. E se evidenciam mais eventos nos extremos da calda esquerda que da direita, ou seja, existem eventos com uma marcada tendência de terem valores baixos do  $IE_{SE}$ . O coeficiente de correlação linear  $\rho = 60,8\%$  mostra uma tendência similar do  $IE_{SE}$  com o  $IE_{STE}$ . Porém, a interpretação do resultado derivado de ambos os métodos será muito similar.

Na Figura 15c, o que primeiramente chama a atenção é que o histograma parece que foi espelhado do painel b) a partir da média. Neste caso, existem barras do histograma que se afastam do comportamento gaussiano para valores inferiores a média e temos maiores quantidades de barras na calda da direita. O valor médio  $\mu = 25,2$  ficou próximo do valor obtido no painel a), mas lembramos que neste caso ele não representa uma porcentagem. O desvio padrão  $\sigma = 10,1$  ficou próximo do valor obtido no painel b). O valor  $\rho = -82,2\%$  significa que este método tem uma marcada relação com o  $IE_{STE}$ , mas com uma interpretação diferente. Valores pequenos de ENTR significam desordem e valores grandes estão relacionados com a ordem, organização e periodicidade na série temporal. Esta interpretação, que até pode parecer confusa, mas ela já tinha sido explicada no trabalho de Mendes *et al.* (2017). Segundo o valor do módulo de  $\rho$ , pode-se dizer que este método torna-se mais robusto para substituir a STE na automação do processo de cálculo da entropia no IMF.

Por último, na Figura 15d o  $IE_{RPDE}$  apresenta valores com  $\mu = 25,5\%$  e  $\sigma = 5,1\%$ . Em relação ao valor médio, pode-se dizer que este método mostra um valor similar ao  $IE_{STE}$  e  $IE_{ENTR}$ . No entanto, o  $\sigma$  diminuiu à metade, tornando o histograma muito compacto para a análise dos resultados. O coeficiente de correlação linear do  $IE_{RPDE}$  em relação ao  $IE_{STE}$  apresentou um valor de correlação baixa.  $31,5\%$ .

Em resumo, foi observado que o método STE é o que melhor se aproxima a uma distribuição Gaussiana. Os métodos SE e ENTR apresentam uma boa correlação linear quando comparado com a STE. Apesar do método ENTR estar anticorrelacionado com a STE, ele se apresentou melhor para substituir o STE no caso que se pretenda fazer uma automação. Os resultados do método RPDE foram os piores. Continuaremos com este

análise na Seção 4.3, mas fazendo o estudo da entropia separadamente no interior dos DIs.

## 4.2 ESTUDO DA ALFVENICIDADE

Na literatura consultada não encontramos catálogos de intervalos Alfvênicos de longa duração identificados entre os anos de 1999 a 2001. Para realizar o cálculo da entropia em um feixe Alfvênico, se faz necessário ter um intervalo desse feixe com um determinado comprimento ou durabilidade.

Para identificar os feixes Alfvênicos fixamos duas condições: *i*) implementando a metodologia explicada na Figura 13, fixamos um limiar de correlação maior ou igual que 85% para definir um intervalo de 4 horas como Alfvênico, esta escolha está fundamentada pelos trabalhos de Belcher, Davis Jr. e Smith (1969), Belcher e Davis Jr. (1971), Tsurutani *et al.* (1990), Tsurutani *et al.* (2011), Prestes, Klausner e Ojeda-González (2017); *ii*) a condição anterior deverá permanecer por um intervalo de até 48 horas ou mais. Considerando essas duas condições, foram identificados como resultado deste trabalho, os intervalos Alfvênico apresentados na Tabela 3 (no Apêndice).

Na Tabela 3 são apresentadas as datas de começo e fim de cada evento. Estes intervalos puramente Alfvênicos de longa duração não são comuns de serem encontrados no vento solar. Eles fisicamente dependem de grandes buracos coronais presentes em baixa e média latitude na atmosfera solar, que irão emitir feixes de vento solar rápido até o ponto de Lagrange L1. No total foram identificados 18 eventos puramente Alfvênicos de longa duração, sendo oito eventos em 1999, oito em 2000 e dois em 2001. A identificação das datas destes DIs permitirá fazer um estudo da entropia na próxima seção.

Motivados com a identificação dos dezoito intervalos Alfvênicos de longa duração, também pensamos na procura de eventos também de longa duração, mas com uma baixa correlação entre as componentes da velocidade e o IMF. Estes eventos foram batizados neste trabalho como eventos não-Alfvênicos de longa duração. Para identificá-los deve-se cumprir que: *i*) o valor de correlação linear entre as componentes da velocidade e o IMF deverá ser menor ou igual que 60% para definir um intervalo de 4 horas como não-Alfvênico; *ii*) a condição anterior deverá permanecer por um intervalo de até 48 horas ou mais. Gostaríamos de esclarecer que estas condições poderiam ser refinadas futuramente em um estudo mais aprofundado, mas que no momento sai do escopo desta dissertação. As datas de começo e fim dos eventos não-Alfvênicos de longa duração estão listados na Tabela 4. No total foram identificados vinte eventos, sendo três eventos em 1999, sete em 2000 e dez em 2001. Na próxima seção faremos um estudo da entropia nestes eventos.

### 4.3 ESTUDO ESTATÍSTICO DA ENTROPIA EM DIS

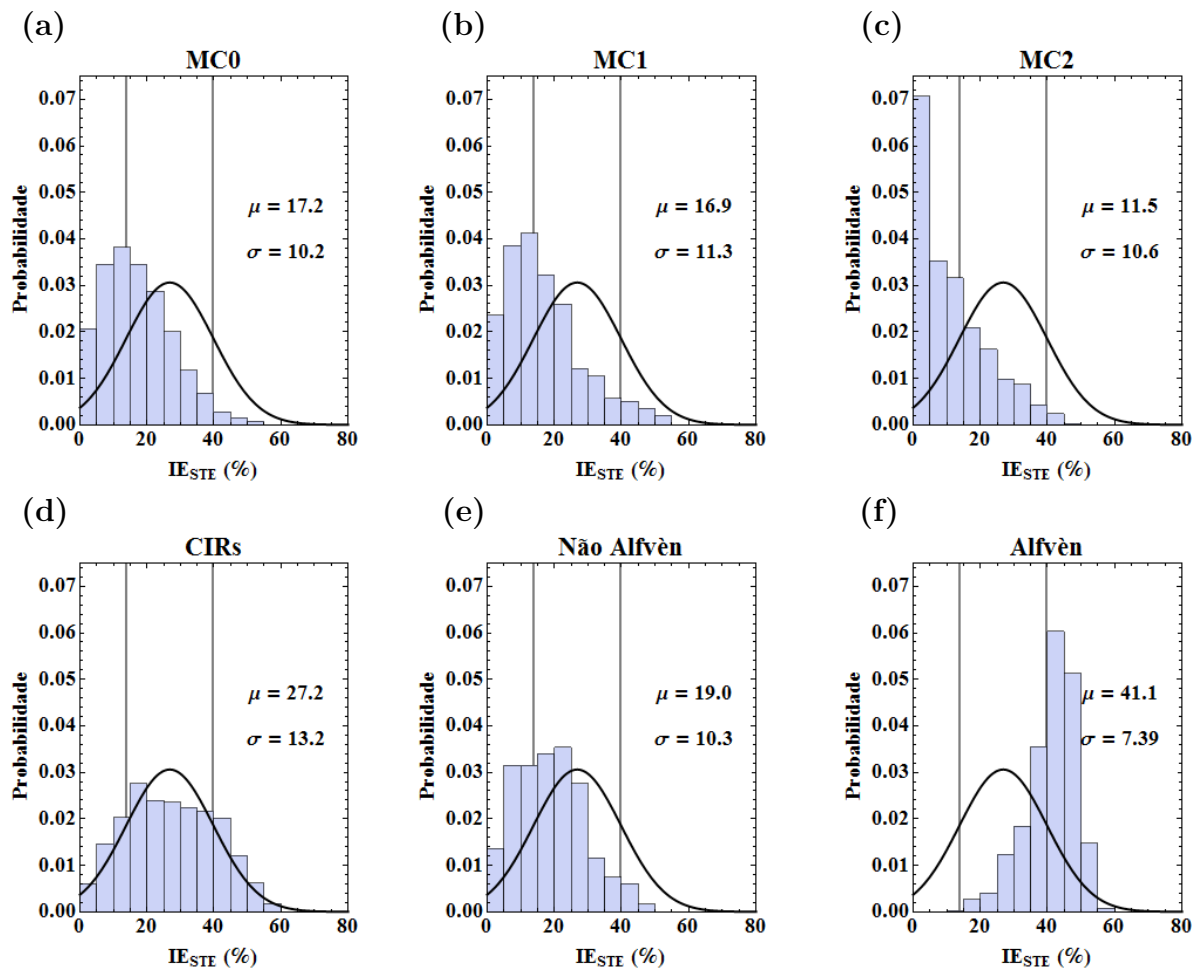
Nesta seção será discutida e avaliada os valores de entropia utilizando os quatro métodos, mas separando os intervalos correspondentes a cada DI. Lembrando que no Capítulo 1 tínhamos classificado os DIs como: *i*) intervalos Alfvênicos; *ii*) ICMEs; *iii*) CIRs; *iv*) *flux-ropes*; *v*) MCs; *vi*) HCS; e *vii*) choques. Dos sete DIs enumerados, as HCS e os choques não poderão ser estudados com nossa metodologia. Eles acontecem num determinado instante de tempo e não podemos formar séries temporais com um comprimento adequado para calcular a entropia. Desta forma, dos sete tipos diferentes de DIs citados no começo do trabalho iremos estudar somente cinco com as seguintes especificações:

- Os ICMEs, MCs e *flux-ropes* serão obtidos do mesmo catálogo publicado por Richardson e Cane (2010) (RC). É muito importante que o leitor entenda como um catálogo de ICMEs pode-se também utilizar para estudar MCs e *flux-ropes*. No catálogo de RC são fornecidos uma lista de ICMEs nos quais não são identificados características de MC, eles chamam esses ICMEs de MC0. Além do mais, existem alguns ICMEs em que unicamente se observa uma rotação do campo magnético sem as outras características citadas por Burlaga e Klein (1980), Burlaga *et al.* (1981) utilizadas para definir uma MC. Este tipo de estruturas podem-se chamar de *flux-ropes*, mas RC as nomeia de MC1. É importante esclarecer que existem *flux-ropes* em menores escalas (até  $\approx 2$  horas de duração, por exemplo) (HU *et al.*, 2004), mas que neste caso de curta duração, em dados com resolução de 16 s, não temos séries temporais com tamanho adequado (mais de 600 pontos) para estudar a entropia. Os ICMEs com MC, RC as nomeia de MC2. Todos este eventos identificados como MC0, MC1 ou MC2 nos anos de 1999 a 2001 são listados na Tabela 5. No total temos 132 eventos, sendo 82 MC0 (ICMEs), 16 MC1 (*flux-ropes*) e 34 MC2 (MCs);
- Para estudar os CIRs, foi utilizado o catálogo de Jian *et al.* (2006). A lista de eventos CIRs está listada na Tabela 6. No total temos 100 eventos CIRs entre os anos 1999 a 2001;
- Os eventos Alfvênicos de longa duração identificados por nós na seção anterior, como foi dito, foram listados na tabela 3;
- Os eventos não-Alfvênicos de longa duração identificados por nós na seção anterior estão listados na tabela 4. Estes eventos não devem ser considerados como DIs, eles estão sendo estudados para utiliza-los como padrão de comparação.

#### 4.3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES DA STE

Nesta seção iremos estudar a distribuição estatística que segue o índice de entropia IE para o método da entropia espaço-temporal (STE), conforme apresentado no

Figura 16 – Esta figura agrupa os histogramas, com a respectiva distribuição gaussiana, construídos a partir do cálculo do IE das componentes do IMF nas datas com a presença de DIs entre os anos 1999-2001. Cada painel foi construído para o método da entropia espaço-temporal (STE) separando valores para cada tipo de DI estudado como segue: a) ICMEs (MC0); b) *flux-ropes* (MC1); c) MCs (MC2); d) CIRs; e) eventos não-Alfvênicos de longa duração; f) eventos Alfvênicos de longa duração. No interior de cada um dos gráficos existem informações importantes:  $\mu$  é o valor médio de IE em cada histograma e  $\sigma$  o desvio padrão. As linhas verticais é um limiar obtido fazendo  $\mu \pm \sigma$ .



Fonte: O Autor

Capítulo 3. Seguindo o mesmo procedimento apresentado na penúltima linha-segunda coluna da Tabela 2, foi calculado o  $IE_{STE}$  somente para as datas de um determinado DI no período de dados do ACE desde 1999 a 2001. A Figura 16 mostra seis painéis correspondentes ao método STE como segue: a)  $IE_{STE}$  considerando ICME sem nuvem magnética (MC0); b)  $IE_{STE}$  considerando ICME com *flux-rope* (MC1); c)  $IE_{STE}$  considerando ICME com nuvem magnética (MC2); d)  $IE_{STE}$  para eventos CIRs; e)  $IE_{STE}$  para eventos não-Alfvênicos de longa duração; f)  $IE_{STE}$  para eventos Alfvênicos de longa duração. Em cada painel está representado a distribuição gaussiana dos valores do  $IE_{STE}$  obtidos a partir da Equação 4.1. Com o objetivo de fazer comparações, foi mantido em todos os painéis a curva Gaussiana inicialmente calculada na Figura 15a. Os valores de  $\mu$  e  $\sigma$  de cada um dos painéis, são mostrados no interior de cada figura.

A curva Gaussiana referente à Figura 15a possui  $\mu = 26,8\%$  e  $\sigma = 13,0\%$  e será utilizado como comparação. Na Figura 16a, observa-se que o  $IE_{STE}$  para MC0, possui  $\mu = 17,2\%$  e  $\sigma = 10,2\%$  com tendência dos valores a serem distribuídos na cauda da esquerda da Gaussiana confirmando a presença de baixos valores de  $IE_{STE}$  nos ICMEs. Este resultado era esperado, porque os ICMEs, desde a gênese na atmosfera solar, eles são eventos causados pela reestruturação do campo magnético como resultado do fenômeno da reconexão magnética.

Na Figura 16b, os valores de  $IE_{STE}$  apresentam  $\mu = 16,9\%$  e  $\sigma = 11,3\%$  nos *flux-ropes* (MC1). Ou seja, a distribuição dos valores de  $IE_{STE}$  é bem similar ao painel a), mas o valor médio mostra um valor com taxa de 0,3% menor, no entanto, este valor é estatisticamente insignificativo. Os dados também aparecem mais espalhados em relação à média, quando comparado com o painel a).

Na Figura 16c, os valores de  $IE_{STE}$  apresentam  $\mu = 11,5\%$  e  $\sigma = 10,6\%$  para as MCs (MC2). Neste histograma a distribuição se afasta completamente da Gaussiana. O valor médio  $\mu = 11,5\%$  é bem menor que a média da Gaussiana e das médias dos painéis a) e b). É chamativo o valor do limiar  $\mu - \sigma = 13,8\%$  na calda esquerda da Gaussiana que neste caso, por primeira vez, é maior que o valor médio (11,5%) dos dados. Ou seja, confirmando a hipótese de que para baixos valores de entropia é certa a existência de nuvens magnéticas.

Na Figura 16d, os valores de  $IE_{STE}$  apresentam  $\mu = 27,2\%$  e  $\sigma = 13,2\%$  para os CIRs. Essa distribuição é semelhante a 15a, mas esperava-se que os valores de entropia fossem bem maiores pela provada existência de ondas de Alfvén nos CIRs (TSURUTANI *et al.*, 1990; TSURUTANI *et al.*, 2011; PRESTES; KLAUSNER; OJEDA-GONZÁLEZ, 2017). A explicação encontrada para este fato é que as ondas de Alfvén correspondem a intervalos de curta duração, estando mais no interior do feixe de vento solar rápido. De forma geral, um CIR é a junção de um feixe de vento solar rápido (Alfvênico e de alta entropia) e um feixe lento (possivelmente não Alfvênico e de baixa entropia), e como resul-

tado ele apresenta valores de entropia distribuídos similarmente à Figura 15a. É chamativo nestes eventos que a distribuição das barras do histogramas mostram um comportamento Gaussiano.

A Figura 16e mostra valores com  $\mu = 19,0\%$  e  $\sigma = 10,3\%$  para os eventos não-Alfênicos de longa duração. Neste caso, o valor médio é menor que a média do  $IE_{STE}$  da Figura 15a, mas maior que a média dos ICMEs. Este comportamento se explica porque os eventos não-Alfênicos de longa duração são característicos de intervalos de vento solar "calmos" ou não-perturbados. Para chegar na conclusão da sentença anterior se fez uma inspeção visual dos dados do vento solar medidos pelo satélite ACE nesses intervalos não-Alfênicos. É chamativo nestes eventos que a distribuição das barras dos histogramas mostram um comportamento pouco Gaussiano.

Na Figura 16f teremos  $\mu = 41,1\%$  e  $\sigma = 7,4\%$  para os eventos Alfênicos de longa duração. Neste histograma a distribuição se afasta completamente da média para a cauda da direita mas ainda pode-se observar uma forma Gaussiana na distribuição das barras do histograma. É chamativo o valor do limiar  $\mu + \sigma = 39,8\%$  na cauda direita da Gaussiana que neste caso, por primeira vez, é menor que o valor médio ( $41,1\%$ ) dos dados. Além do mais, o desvio padrão de  $7,4\%$  é o menor entre todos os painéis da figura. Isto mostra uma concentração dos valores de entropia dos eventos Alfênicos de longa duração em torno da média da distribuição. Ou seja, com este resultado fica bem estabelecido o aumento das flutuações do IMF característicos dos intervalos Alfênicos. A morfologia magnética das MCs e ondas de Alfvén são completamente opostas e o  $IE_{STE}$  foi capaz de identificar este comportamento de maneira muito eficiente.

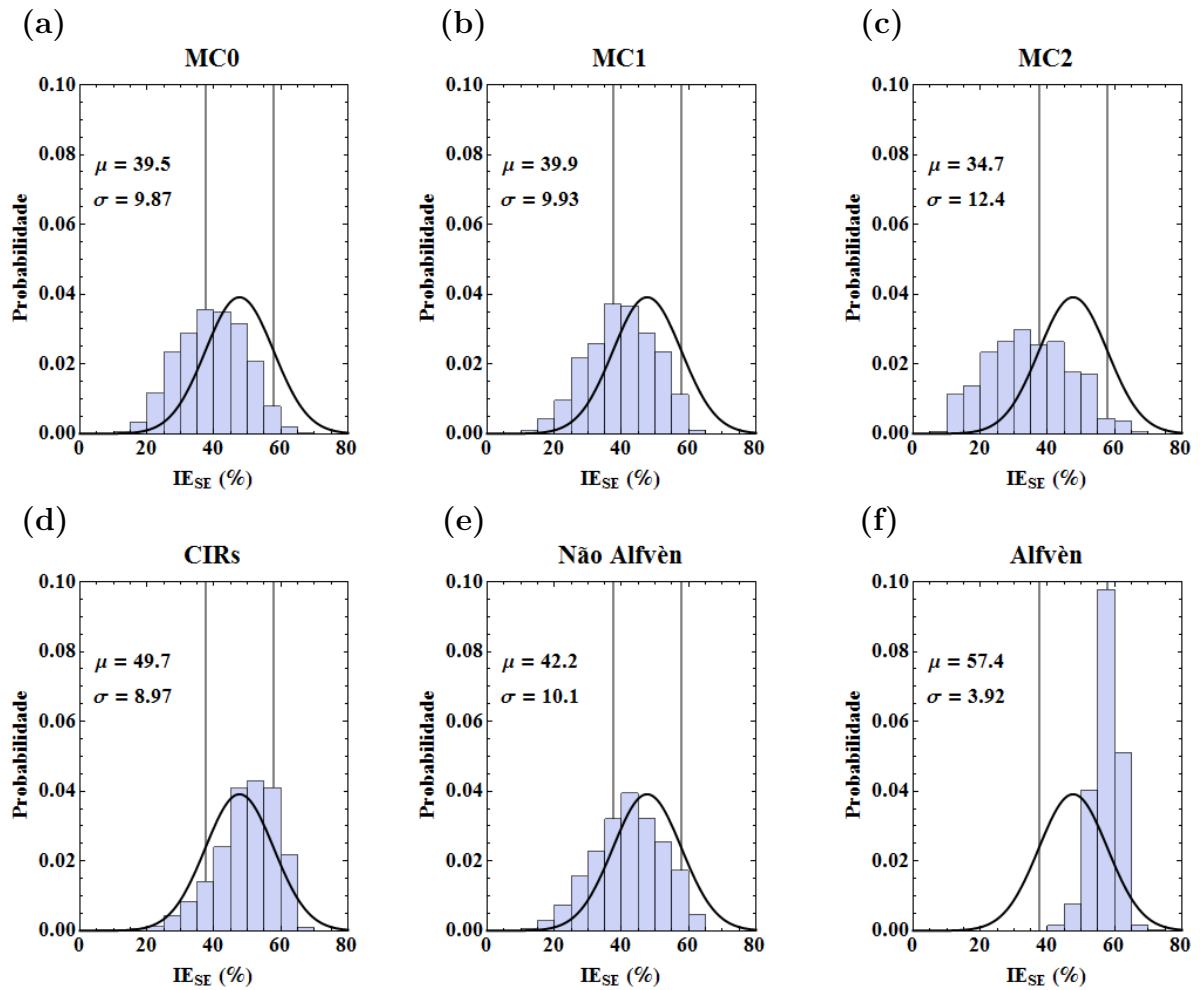
Nas próximas sub-seções estaremos comprovando se os outros três métodos também conseguem identificar estatisticamente as características dos distúrbios discutidos em esta sub-seção. Comprovado isto, poderemos futuramente automatizar estas ferramentas para identificar os DIs.

### 4.3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICO DOS VALORES DA SE

Nesta seção iremos estudar a distribuição estatística que segue o índice de entropia  $IE_{SE}$  para o método da entropia espectral. A Figura 17 apresenta seis painéis com os mesmo DIs mostrados na Figura 16. Em cada painel está representado a distribuição gaussiana dos valores do  $IE_{SE}$  obtidos a partir da curva Gaussiana inicialmente calculada na Figura 15b.

É importante lembrar que a curva Gaussiana da Figura 15b possui  $\mu = 47,6\%$  e  $\sigma = 10,2\%$ . Na Figura 17a, observa-se que o  $IE_{SE}$  para MC0, possui  $\mu = 39,5\%$  e  $\sigma = 9,9\%$  com tendência dos valores a serem distribuídos na calda da esquerda da Gaussiana, similar ao que foi discutido em 16a.

Figura 17 – Cada painel desta figura é similar a Figura 16 mas mostrando os resultados para o método SE, ou seja  $IE_{SE}$ .



Fonte: O Autor

Na Figura 17b, os valores de  $IE_{SE}$  apresentam  $\mu = 39,9\%$  e  $\sigma = 9,9\%$  nos *flux-ropes* (MC1). Esta distribuição de valores de  $IE_{SE}$  é bem similar ao painel a). Além do mais, pode-se notar que em ambos painéis as barras dos histogramas mostram um comportamento Gaussiano.

Na Figura 17c, os valores de  $IE_{SE}$  apresentam  $\mu = 34,7\%$  e  $\sigma = 12,4\%$  para as MCs (MC2). Neste histograma, diferente de 16c, a distribuição mantém a forma Gaussiana. O valor médio  $\mu = 34,7\%$  é bem menor que a média da Gaussiana padrão ( $\mu = 47,6\%$ ) e as médias dos painéis a) e b). Aqui é chamativo o fato que o valor do limiar  $\mu - \sigma = 37,4\%$  na calda esquerda da Gaussiana, por primeira vez, é maior que o valor médio ( $34,7\%$ ) dos dados. No entanto, em comparação com os painéis a) e b), os dados estão distribuídos mais espalhados em relação à média porque o desvio padrão é maior. Por causa deste aumento no desvio padrão, o  $IE_{SE}$  seria menos exato na identificação das MCs que o  $IE_{STE}$ . Ainda assim, este método também se mostrou estatisticamente

robusto para estudar MCs.

Na Figura 17d, os valores de  $IE_{SE}$  apresentam  $\mu = 49,7\%$  e  $\sigma = 9,0\%$  para os CIRs. Essa distribuição é semelhante à Gaussiana da figura. A discussão deste resultado levaria à mesma explicação apresentada para a Figura 16d.

A Figura 17e mostra valores com  $\mu = 42,2\%$  e  $\sigma = 10,1\%$  para os eventos não-Alfvênicos de longa duração. Neste caso, o valor médio é menor que a média do  $IE_{SE}$  da Figura 15b ( $\mu = 47,6\%$ ), no entanto é maior que a média dos ICMEs, *flux-ropes* e MCs dos painéis a), b) e c). A discussão deste resultado levaria à mesma explicação apresentada para a Figura 16e, com a única diferença que neste caso a distribuição das barras dos histogramas mostram um comportamento Gaussiano.

Na Figura 17f teremos  $\mu = 57,4\%$  e  $\sigma = 3,9\%$  para os eventos Alfvênicos de longa duração. Neste histograma a distribuição se afasta completamente da média para a cauda da direita mas ainda pode-se observar uma forma Gaussiana na distribuição das barras do histograma. É chamativo o valor do limiar  $\mu + \sigma = 57,8\%$  na calda direita da Gaussiana que neste caso está bem próximo do valor médio ( $57,4\%$ ) dos dados. Além do mais, o desvio padrão de  $3,9\%$  é o menor entre todos os painéis da figura. No estudo da Figura 16f foi observado um comportamento similar no valor de  $\sigma$ , mas neste caso obtemos um valor menor. Ou seja, o  $IE_{SE}$  é mais robusto para identificar eventos Alfvênicos de longa duração que o  $IE_{STE}$ . A discussão física deste resultado é basicamente a mesma que o apresentado na explicação de 16f na subseção anterior.

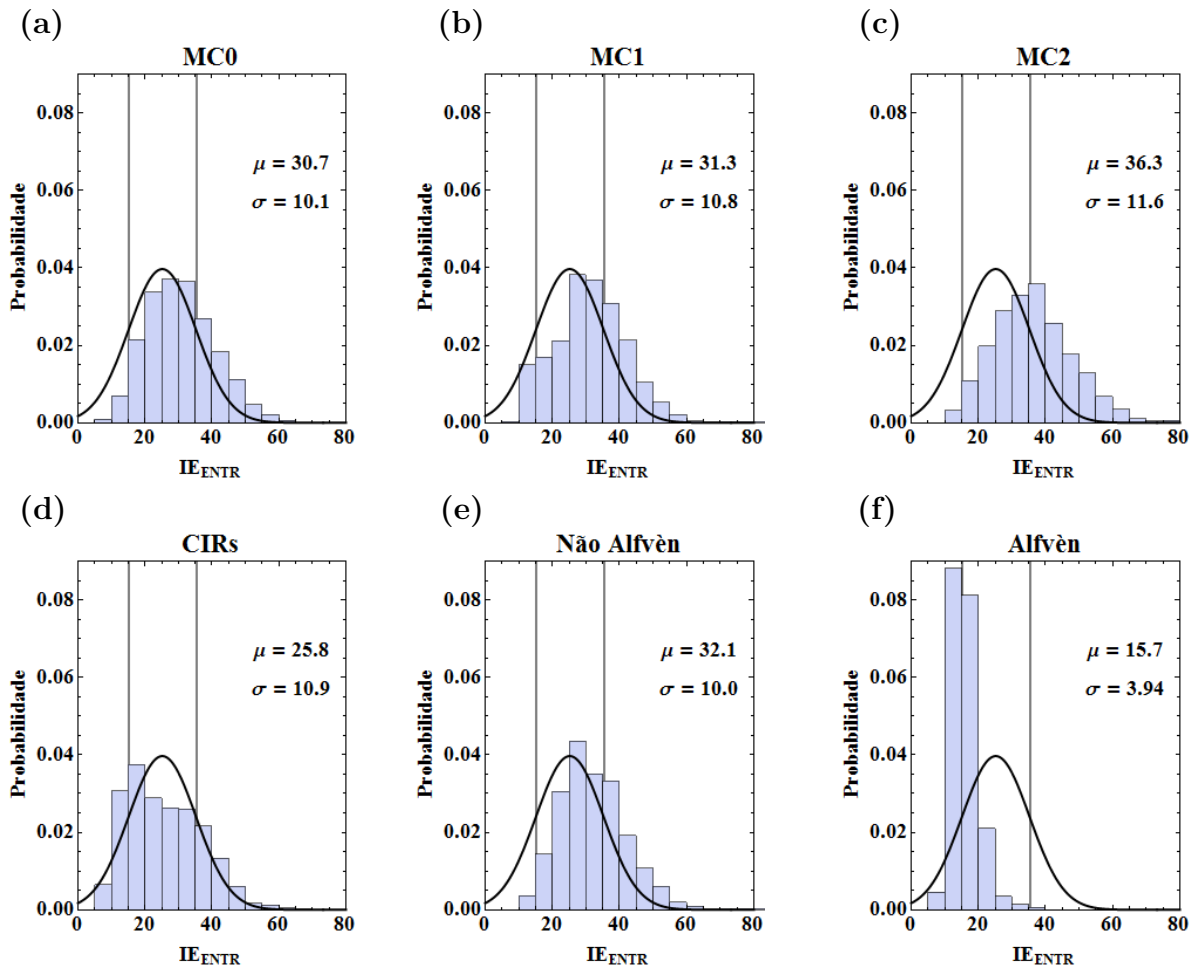
Fazendo um breve sumário, pode-se dizer que o  $IE_{SE}$  mostrou resultados semelhantes ao  $IE_{STE}$ . O  $IE_{STE}$  foi melhor para identificar ICMEs, *flux-ropes* e MCs. No entanto, o  $IE_{SE}$  se mostrou melhor para estudar eventos Alfvênicos de longa duração. De forma geral, o  $IE_{SE}$  diferente do  $IE_{STE}$ , segue uma distribuição Gaussiana para qualquer um dos DIs aqui estudados.

### 4.3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICO DOS VALORES DA ENTR

Apresenta-se a distribuição estatística que segue  $IE_{ENTR}$  obtido a partir do método da entropia na análise de quantificação de recorrência ou ENTR. A Figura 18 mostra seis painéis com os mesmo DIs estudados em 16 e 17. A curva Gaussiana mostrada em cada painel corresponde à Figura 15c obtida a partir de  $\mu = 25,2$  e  $\sigma = 10,1$ . Lembrando que esta entropia não se expressa em porcentagem e ela apresenta correlação negativa em relação aos métodos  $IE_{STE}$  e  $IE_{SE}$ , respectivamente.

Na Figura 18a temos  $\mu = 30,7$  e  $\sigma = 10,1$  para ICMEs. Resultado similar com  $\mu = 31,3$  e  $\sigma = 10,8$  apresenta-se em 18b (*flux-ropes*). Em ambos os painéis as barras dos histogramas seguem a forma de uma distribuição Gaussiana. Aqui o aumento do  $IE_{ENTR}$  tem a mesma interpretação que a diminuição do  $IE_{STE}$  e  $IE_{SE}$ , respectivamente. No

Figura 18 – Cada painel desta figura é similar a Figura 16 mas mostrando os resultados para o método ENTR, ou seja  $IE_{ENTR}$ .

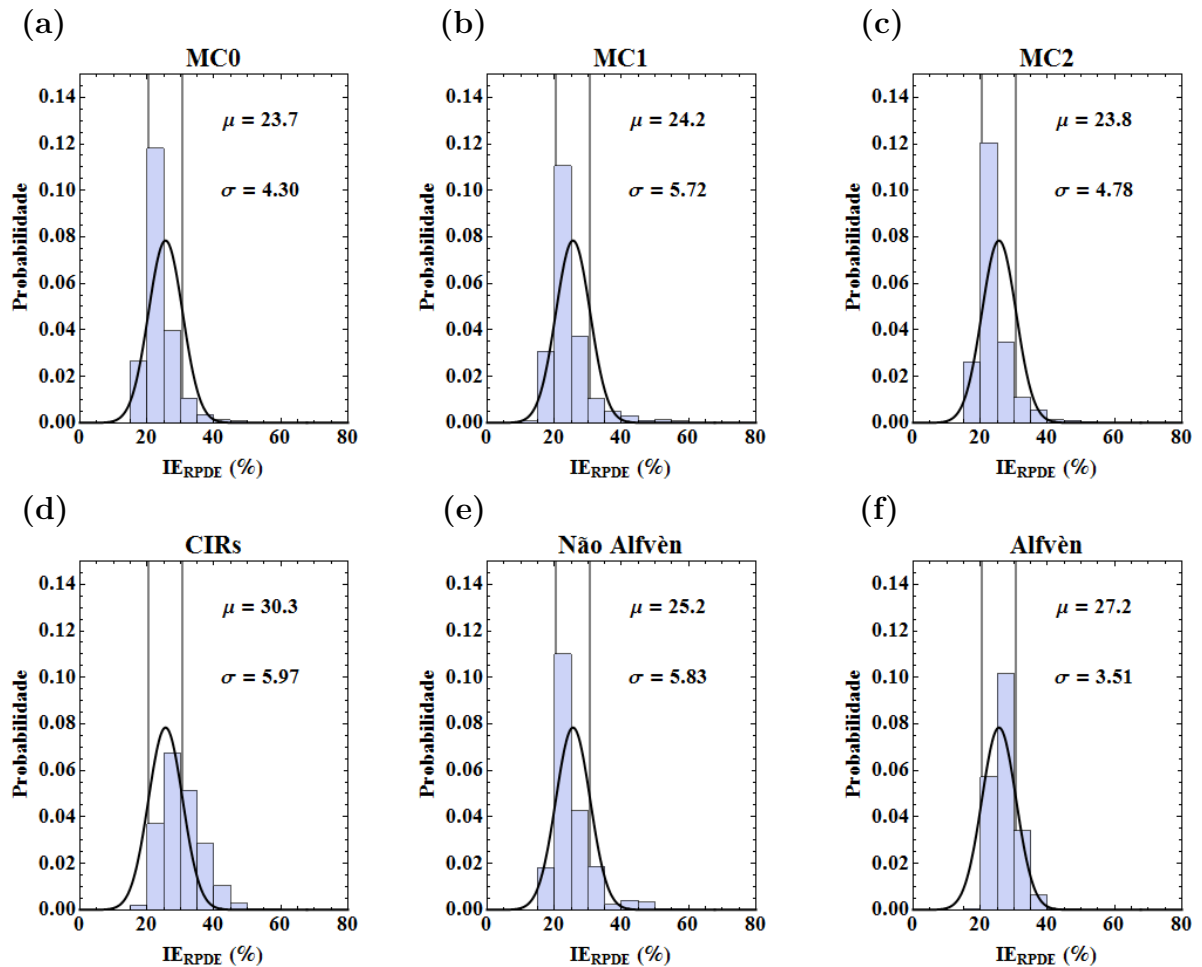


Fonte: O Autor

entanto, ainda estes valores não são maiores que o limiar  $\mu + \sigma = 35,3$ . Na Figura 18c (MCs), temos  $\mu = 36,3$  maior que o limiar na calda da direita da distribuição Gaussiana. O resultado obtido em similar foi encontrado em 16c, já em 17c o valor ficou próximo ao obtido pelo método (ENTR), mas ultrapassando o limiar de uma das caudas. O valor do desvio padrão teve um ligeiro aumento ( $\sigma = 11,6$ ) em comparação com os valores dos painéis a) e b). Este comportamento é similar à 17c e diferente de 16c.

Na Figura 18d temos  $\mu = 25,8$  e  $\sigma = 10,9$  para CIRs. Este é o único painel em que as barras dos histogramas mostram uma distribuição diferente da Gaussiana. Em 18e os resultados são  $\mu = 32,1$  e  $\sigma = 10,0$  para eventos não-Alfvénicos de longa duração. Por último, em 18f temos  $\mu = 15,7$  e  $\sigma = 3,9$  para eventos Alfvénicos de longa duração. Os três painéis acompanham o raciocínio discutido em 16 e 17. Ou seja, este método também se mostrou robusto para caracterizar MCs e eventos Alfvénicos de longa duração.

Figura 19 – Cada painel desta figura é similar a Figura 16 mas mostrando os resultados para o método RPDE, ou seja  $IE_{RPDE}$ .



Fonte: O Autor

#### 4.3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICO DOS VALORES DA RPDE

Apresenta-se a distribuição estatística que segue  $IE_{RPDE}$  obtido a partir do método da densidade de entropia em período de recorrência ou RPDE. Foi discutido que este método é pouco correlacionado quando comparado com o  $IE_{STE}$ , ainda assim resulta interessante estudar seu comportamento estatístico em cada um dos DIs. A Figura 19 mostra seis painéis com os mesmos DIs estudados em 16, 17 e 18. A curva Gaussiana mostrada em cada painel corresponde à Figura 15d obtida a partir de  $\mu = 25,5\%$  e  $\sigma = 5,1\%$ .

Os valores médios e desvio padrão nos três primeiros painéis da Figura 19 são os seguintes: a)  $\mu = 23,7\%$  e  $\sigma = 4,3\%$ ; b)  $\mu = 24,2\%$  e  $\sigma = 5,7\%$ ; c)  $\mu = 23,8\%$  e  $\sigma = 4,7\%$ . Estes valores tiveram uma pequena diminuição quando comparados com a média da distribuição Gaussiana em 15d. O limiar  $\mu - \sigma = 20,4$  ainda fica longe dos valores da média dos três painéis, porém, considera-se que essa diminuição é estatisticamente

insignificante e que este método não resulta eficaz para caracterizar nenhum dos três DIs apresentados nesses três painéis. As barras dos histogramas tem forma de distribuição Gaussiana nos três painéis.

Os valores médios e desvio padrão nos três últimos painéis da Figura 19 são os seguintes: d)  $\mu = 30,3\%$  e  $\sigma = 6,0\%$ ; e)  $\mu = 25,2\%$  e  $\sigma = 5,8\%$ ; f)  $\mu = 27,2\%$  e  $\sigma = 3,5\%$ . Os eventos não-Alfvênicos de longa duração do painel e), como esperado, mantiveram valores muito próximos da distribuição Gaussiana de todos os  $IE_{RPDE}$ . Os CIRs (painel e) e eventos Alfvênicos de longa duração (painel f) tiveram um aumento no valor de  $\mu$ . Por primeira vez quando comparado com  $IE_{STE}$ ,  $IE_{SE}$  e  $IE_{ENTR}$ , o valor da média dos CIRs ficou mais afastada do valor médio da Gaussiana que os eventos Alfvênicos. Os eventos Alfvênicos não ultrapassaram o limiar  $\mu + \sigma = 30,6\%$  e por primeira vez os CIRs, com  $\mu = 30,3\%$ , chegaram bem próximos desse valor.

Este método acompanhou as tendências identificadas nos métodos STE, SE e ENTR mas seus resultados não são estatisticamente significativos para caraterizar DIs.

## 5 Conclusões

Quando existe ejeção de matéria vinda da coroa solar podemos ter alguns distúrbios no meio interplanetário como intervalos Alfvênicos, ICMEs, CIRs, *flux-ropes*, MCs, HCS e choques. Neste trabalho para melhor caracterização dos distúrbios utilizamos uma grandeza física chamada entropia que avalia a ordem e desordem de um sistema.

Ao final podemos concluir:

1. Entre os anos de 1999 a 2001 existem dezoito intervalos Alfvênicos com durabilidade maior que dois dias e vinte intervalos não-Alfvênicos também de longa duração;
2. A correlação linear do  $IE_{STE}$  com  $IE_{SE}$ ,  $IE_{ENTR}$ , e  $IE_{RPDE}$  foi de 60,8%, -82,2% e 31,5%, respectivamente;
3. No estudo dos DIs, o  $IE_{SE}$  e  $IE_{ENTR}$  mostraram resultados semelhantes ao  $IE_{STE}$  na caracterização dos eventos. No entanto, o  $IE_{STE}$  foi melhor para identificar ICMEs, *flux-ropes* e MCs. O  $IE_{SE}$  se mostrou melhor para estudar eventos Alfvênicos de longa duração. De forma geral, o  $IE_{SE}$  e  $IE_{ENTR}$  diferentes do  $IE_{STE}$ , seguem uma distribuição Gaussiana para qualquer um dos DIs aqui estudados.
4. Dos métodos utilizados apenas o RPDE não apresentou valores do  $IE_{RPDE}$  estatisticamente significativos para caracterizar os DIs;
5. Esperava-se ondas de Alfvén dentro dos CIRs o que não foi evidenciado pelos histogramas uma vez que os mesmos ficaram praticamente com a mesma distribuição dos eventos em conjunto;
6. Este trabalho não identifica os distúrbios; apenas caracteriza os mesmos por ser puramente estatístico;
7. O método de entropia ENTR apresentou correlação negativa por conta do programa computacional que foi utilizado no cálculo da entropia;
8. O trabalho deixa em aberto a possibilidade de utilizar de forma automática o  $IE_{SE}$  e  $IE_{ENTR}$  para estender o estudo estatístico em outros anos.
9. O estudo do pico de máximo do ciclo solar 23 permitiu analisar uma quantidade estatisticamente significativa de DIs, impossíveis de estarem presentes em um período de mínimo de atividade solar.

## Referências

- ALEXA, O. *et al.* Recurrence plot for parameters analysing of internal combustion engine. In: *Materials Science and Engineering Conference Series*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 95, p. 012121. Citado na página 29.
- ALFVÉN, H. Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves. *Nature*, v. 150, n. 3805, p. 405–406, Oct 1942. Citado 3 vezes nas páginas 19, 27 e 28.
- BELCHER, J. W.; DAVIS JR., L. Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium, 2. *J. Geophys. Res.*, v. 76, p. 3534, 1971. Citado 3 vezes nas páginas 19, 28 e 54.
- BELCHER, J. W.; DAVIS JR., L.; SMITH, E. J. Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium: Mariner 5. *J. Geophys. Res.*, v. 74, p. 2302, 1969. Citado 4 vezes nas páginas 19, 28, 41 e 54.
- BITTENCOURT, J. *Fundamentals of Plasma Physics*. Third. Verlag New York, Inc: Originally published by Pergamon Press, New York, 1986, 2004. ISBN 0-387-20975-1. Citado na página 28.
- BOFFETTA, G. *et al.* Predictability: a way to characterize complexity. *Phys. Rep.*, v. 356, n. 6, p. 367–474, Jan 2002. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 28.
- BOTHMER, V.; SCHWENN, R. Eruptive prominences as sources of magnetic clouds in the solar wind. *Space Sci. Rev.*, v. 70, n. 1-2, p. 215–220, Oct 1994. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- Bothmer, V.; Schwenn, R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind. *Annales Geophysicae*, v. 16, n. 1, p. 1–24, jan. 1998. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- Burlaga, L. *et al.* Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations. *J. Geophys. Res.*, v. 86, n. A8, p. 6673–6684, ago. 1981. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 34 e 55.
- Burlaga, L. F. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha. *J. Geophys. Res.*, v. 93, n. A7, p. 7217–7224, jul. 1988. Citado 4 vezes nas páginas 9, 19, 20 e 33.
- BURLAGA, L. F. Interplanetary magnetohydrodynamics. *Interplanetary magnetohydrodynamics*, v. 3, Jan 1995. Citado na página 19.
- Burlaga, L. F.; Behannon, K. W. Magnetic Clouds - Voyager Observations Between 2AU and 4AU. *Solar Phys.*, v. 81, n. 1, p. 181–192, nov. 1982. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- BURLAGA, L. F.; KLEIN, L. W. Magnetic clouds in the solar wind. *NASA Tech. Memo*, n. 80668, p. 1–15, mar. 1980. Disponível em: <[http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800013734\\_1980013734.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800013734_1980013734.pdf)>. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 34 e 55.

- CANE, H. V.; RICHARDSON, I. G. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996-2002. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 108, p. 1156, abr. 2003. Citado na página 19.
- Carr, T. W.; Schwartz, I. B. On measures of disorder in globally coupled oscillators. *Physica D Nonlinear Phenomena*, v. 115, n. 3-4, p. 321-340, maio 1998. Citado na página 29.
- CHIAN, A. C. L. *et al.* On the chaotic nature of solar-terrestrial environment: Interplanetary Alfvén intermittency. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 111, n. A7, p. A07S03, Jul 2006. Citado na página 29.
- CHRISTIAN, E. R.; DAVIS, A. J. *Advanced Composition Explorer (ACE) Mission Overview*. [S.l.], 1997. Disponível em: <[http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace\\_mission.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html)>. Acessado em 22 de novembro de 2020. Citado na página 37.
- CRISAN, M. New aspects of phoneme synthesis based on chaotic modeling. In: ZHANG, T. (Ed.). *Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 605-614. ISBN 978-3-642-27334-6. Citado na página 29.
- CROOKER, N. U. *et al.* Heliospheric plasma sheets. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 109, n. A3, p. A03107, Mar 2004. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- Dasan, J. *et al.* Stress fluctuations in sheared Stokesian suspensions. *Phys. Rev. E*, v. 66, n. 2, p. 021409, ago. 2002. Citado na página 29.
- ECHER, E.; ALVES, M.; GONZALEZ, W. A statistical study of magnetic cloud parameters and geoeffectiveness. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 67, n. 10, p. 839-852, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136468260500060X>>. Citado na página 18.
- ECHER, E. *et al.* Long-term correlation between solar and geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 66, p. 1019-1025, ago. 2004. Citado na página 18.
- ECHER, E. *et al.* Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) during solar cycle 23 (1996-2006). *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 113, n. A5, p. A05221, May 2008. Citado na página 18.
- Facchini, A.; Mocenni, C.; Vicino, A. Generalized recurrence plots for the analysis of images from spatially distributed systems. *Physica D Nonlinear Phenomena*, v. 238, n. 2, p. 162-169, jan. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 42.
- GONZALEZ, W. D. *et al.* What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, v. 99, n. A4, p. 5771-5792, Apr 1994. Citado na página 18.
- GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ( $Dst < -100$  nT). *Planetary and Space Science*, v. 35, n. 9, p. 1101-1109, 1987. ISSN 0032-0633. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032063387900158>>. Citado na página 24.

- GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, A. L. Clúa de. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.*, v. 88, p. 529–562, Apr 1999. Citado na página 18.
- GOSLING, J. T.; MCCOMAS, D. J.; PHILLIPS, J. L. Coronal Mass Ejections - the Link Between Solar and Geomagnetic Activity. In: \_\_\_\_\_. *Eruptive Solar Flares. Proceedings of Colloquium #133 of the International Astronomical Union, held at Iguazu, Argentina, August 2-6, 1991. Editors, Z. Svestka, B.V. Jackson, M.E. Machado. Publisher, Springer-Verlag, New York, 1992. ISBN # 3-540-55246-4. LC # QB 526.F6 I28 1991, P. 385, 1992. [S.l.: s.n.], 1992. v. 399, p. 385. Citado na página 19.*
- HERMANN, S. Exploring sitting posture and discomfort using nonlinear analysis methods. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, v. 9, p. 392–401, 2005. Citado na página 29.
- HU, Q. *et al.* Multiple flux rope magnetic ejecta in the solar wind. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 109, n. A18, p. 3102, mar. 2004. Citado na página 55.
- JIAN, L. *et al.* Properties of Stream Interactions at One AU During 1995–2004. *Solar Phys.*, v. 239, n. 1-2, p. 337–392, Dec 2006. Citado 5 vezes nas páginas 12, 23, 55, 78 e 81.
- KELLEY, M. C.; HEELIS, R. A. Book. *The Earth's ionosphere : plasma physics and electrodynamics / Michael C. Kelley, with contributions from Rodney A. Heelis.* [S.l.]: Academic Press, San Diego :, 1989. xii, 487 p. : p. ISBN 0124040136 0124040128. Citado 3 vezes nas páginas 18, 20 e 26.
- KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. Book-Received - Introduction to Space Physics. *Science*, v. 269, p. 862, Aug 1995. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- KOLMOGOROV, A. N. A new metric invariant of transitive dynamical systems and automorphisms of Lebesgue apaceKol. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, v. 119, p. 861–864, 1958. Disponível em: <<http://www.mathnet.ru/links/5ef94fffa2bbd7b873208bf4f17d92d8/tm2213.pdf>>. Citado na página 28.
- LITTLE, M. A. *et al.* Exploiting Nonlinear Recurrence and Fractal Scaling Properties for Voice Disorder Detection. *BioMedical Engineering OnLine*, v. 6, n. 23, p. 1–19, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 22, 29, 46 e 47.
- LIU, Y. C. M. *et al.* A statistical analysis of heliospheric plasma sheets, heliospheric current sheets, and sector boundaries observed in situ by STEREO. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 119, n. 11, p. 8721–8732, Nov 2014. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- MARWAN, N. A historical review of recurrence plots. *European Physical Journal Special Topics*, v. 164, n. 1, p. 3–12, Oct 2008. Citado na página 29.
- MCCOMAS, D. J. *et al.* Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer. *Space Sci. Rev.*, v. 86, p. 563–612, Jul 1998. Citado na página 38.
- MENDES, O. *et al.* Characterization of high-intensity, long-duration continuous auroral activity (HILDCAA) events using recurrence quantification analysis. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 24, n. 3, p. 407–417, Aug 2017. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 53.

- NUNES, R. R.; ALMEIDA, M. P. d.; SLEIGH, J. W. Entropia espectral: um novo método para adequação anestésica. *Revista Brasileira de Anestesiologia*, scielo, v. 54, p. 404 – 422, 06 2004. ISSN 0034-7094. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-70942004000300013&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-70942004000300013&nrm=iso)>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 44.
- OFMAN, L.; DAVILA, J. M. Alfvén wave heating of coronal holes and the relation to the high-speed solar wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 100, n. A12, p. 23413–23425, 1995. ISSN 2156-2202. Citado na página 19.
- OJEDA-GONZALEZ, A. *et al.* Analysis of behavior of solar wind parameters under different IMF conditions using nonlinear dynamics techniques. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 67, p. 1859–1864, Dec 2005. Citado 7 vezes nas páginas 19, 22, 29, 30, 31, 42 e 43.
- OJEDA-GONZÁLEZ, A. *et al.* Nonlinear fluctuation analysis for a set of 41 magnetic clouds measured by the Advanced Composition Explorer (ACE) spacecraft. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 21, n. 5, p. 1059–1073, Oct 2014a. Citado na página 19.
- OJEDA-GONZÁLEZ, A. *et al.* Daubechies wavelet coefficients: a tool to study interplanetary magnetic field fluctuations. *Geofísica Internacional*, v. 53, n. 2, p. 101 – 115, 2014b. ISSN 0016-7169. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016716914714941>>. Citado na página 19.
- OJEDA-GONZÁLEZ, A. *et al.* Characterization of the Complex Ejecta Measured In Situ on 19 - 22 March 2001 by Six Different Methods. *Solar Phys.*, v. 292, n. 11, p. 160, Nov 2017b. Citado 6 vezes nas páginas 18, 19, 20, 22, 35 e 36.
- OJEDA-GONZÁLEZ, A. *et al.* An Alternative Method for Identifying Interplanetary Magnetic Cloud Regions. *Astrophys. J.*, v. 837, n. 2, p. 156, Mar 2017a. Citado 7 vezes nas páginas 19, 20, 22, 34, 39, 41 e 43.
- OJEDA-GONZÁLEZ, A. *et al.* Spatio-temporal entropy analysis of the magnetic field to help magnetic cloud characterization. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 118, n. 9, p. 5403–5414, Sep 2013. Citado 7 vezes nas páginas 19, 22, 30, 32, 33, 42 e 43.
- PARKER, E. Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *Astrophysical Journal*, v. 128, p. 664, 1958. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- PEACOCK, J. A. Two-dimensional goodness-of-fit testing in astronomy. *Royal Astronomical Society*, v. 202, n. 1983, p. 615–627, fev. 1983. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1983MNRAS.202..615P>>. Citado na página 29.
- PRESTES, A.; KLAUSNER, V.; OJEDA-GONZÁLEZ, A. High-intensity, long-duration, continuous AE activity events associated with Alfvénic fluctuations in 2003. *Annales Geophysicae*, v. 35, n. 6, p. 1231–1240, Nov 2017. Citado 3 vezes nas páginas 19, 54 e 57.
- RENYI, A. On a theorem of Erdos and its application in information theory. *Mathematica*, v. 1, p. 341–344, 1959. Citado na página 28.
- RICHARDSON, I. G.; CANE, H. V. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties. *Solar Phys.*, v. 264, p. 189–237, jun. 2010. Citado 5 vezes nas páginas 12, 23, 55, 74 e 77.

- RICHARDSON, I. G.; CLIVER, E. W.; CANE, H. V. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind. *J. Geophys. Res.*, v. 105, n. A8, p. 18,203–18,213, Aug 2000. Citado na página 19.
- SCHWENN, R. Space weather: The Solar Perspective. *Living reviews in solar physics*, v. 3, n. 2, p. 1–72, 2006. Citado na página 19.
- SHANNON, C.; WEAVER, W. The Mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, University of Illinois Press: Urbana, IL, v. 27, p. 379–423, 623–656, jul. 1948. Disponível em: <<http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 28.
- SHEELEY N. R., J. *et al.* A pictorial comparison of interplanetary magnetic field polarity, solar wind speed, and geomagnetic disturbance index during the sunspot cycle. *Solar Phys.*, v. 52, n. 2, p. 485–495, May 1977. Citado na página 19.
- SHEELEY N. R., J.; HARVEY, J. W.; FELDMAN, W. C. Coronal holes, solar wind streams, and recurrent geomagnetic disturbances: 1973 1976. *Solar Phys.*, v. 49, n. 2, p. 271–278, Aug 1976. Citado na página 19.
- SINAI, Y. G. On the concept of entropy of a dynamical system. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, v. 124, p. 768–771, 1959. Citado na página 28.
- SMITH, C. W. *et al.* The ACE Magnetic Fields Experiment. *Space Sci. Rev.*, v. 86, p. 613–632, Jul 1998. Citado na página 38.
- SONNERUP, B.; CAHILL, L. Magnetopause structure and attitude from Explorer 12 observations. *Journal of Geophysical Research*, v. 72, p. 171, 1967. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1967/JZ072i001p00171.shtml>>. Citado na página 35.
- SONNERUP, B. U. Ö.; SCHEIBLE, M. Minimum and Maximum Variance Analysis. *ISSI Scientific Reports Series*, v. 1, p. 185–220, 1998. Citado na página 35.
- TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Mathematics*, v. 898, p. 366–381, 1981. Citado na página 29.
- TANSKANEN, E. I. *et al.* Solar Cycle Occurrence of Alfvénic Fluctuations and Related Geo-Efficiency. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 122, n. 10, p. 9848–9857, Oct 2017. Citado na página 19.
- TSURUTANI, B. T. *et al.* The properties of two solar wind high speed streams and related geomagnetic activity during the declining phase of solar cycle 23. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 73, n. 1, p. 164–177, Jan 2011. Citado 4 vezes nas páginas 19, 28, 54 e 57.
- TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The cause of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAAs): Interplanetary Alfvén wave trains. *Planet. Space Sci.*, v. 35, n. 4, p. 405–412, Apr 1987. Citado na página 19.
- TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. Great magnetic storms. *Geophysical Research Letters*, v. 19, n. 1, p. 73–76, 1992. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1992/91GL02783.shtml>>. Citado na página 18.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The Interplanetary causes of magnetic storms: A review. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, v. 98, p. 77–89, Jan 1997. Citado na página 18.

TSURUTANI, B. T. *et al.* Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle. *J. Geophys. Res.*, v. 100, n. A11, p. 21717–21734, Nov 1995. Citado na página 19.

TSURUTANI, B. T. *et al.* Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 111, n. A7, p. A07S01, Jul 2006. Citado na página 19.

TSURUTANI, B. T. *et al.* Origin of Interplanetary Southward Magnetic Fields Responsible for Major Magnetic Storms Near Solar Maximum (1978-1979). *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 8519–8531, 1988. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 24.

TSURUTANI, B. T. *et al.* Interplanetary Alfvén waves and auroral (substorm) activity: IMP 8. *J. Geophys. Res.*, v. 95, n. A3, p. 2241–2252, Mar 1990. Citado 4 vezes nas páginas 19, 28, 54 e 57.

TU, C.-y. The damping of interplanetary Alfvénic fluctuations and the heating of the solar wind. *J. Geophys. Res.*, v. 93, n. A1, p. 7–20, Jan 1988. Citado na página 19.

TU, C. Y.; PU, Z. Y.; WEI, F. S. The power spectrum of interplanetary Alfvénic fluctuations: Derivation of the governing equation and its solution. *J. Geophys. Res.*, v. 89, n. A11, p. 9695–9702, Nov 1984. Citado na página 19.

WEBBER, C. L.; ZBILUT, L. P. Dynamical assessment of physiological systems and state using recurrence plot strategies. *Journal of Applied Physiology*, v. 76, p. 965–973, 1994. Disponível em: <<http://jap.physiology.org/content/76/2/965.abstract>>. Citado 4 vezes nas páginas 22, 28, 29 e 45.

ZBILUT, L. P.; WEBBER, C. L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics Letters A*, v. 171, n. 3-4, p. 199–203, 1992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037596019290426M>>. Citado 3 vezes nas páginas 22, 28 e 45.

ZIRKER, J. B. Coronal holes and high-speed wind streams. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 15, p. 257–269, Aug 1977. Citado na página 19.

## **Apêndices**

**APÊNDICE A – Tabelas de Eventos Alfvênicos e não-Alfvênicos, ICMEs e CIRs**

Tabela 3 – Intervalos de tempo Alfvênicos identificados neste trabalho no período de 1999 até 2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados em ordem cronológica em cada um dos anos. As colunas 2 e 3 correspondem as datas de inicio e fim dos intervalos de tempo Alfvênicos.

<b>EVENTO</b>	<b>INICIO D/M/A (UT)</b>	<b>FIM D/M/A (UT)</b>
1999		
01	01/01/99 (10:00)	03/01/99 (18:00)
02	04/02/99 (22:00)	08/02/99 (02:00)
03	16/03/99 (10:00)	18/03/99 (14:00)
04	13/04/99 (14:00)	15/04/99 (10:00)
05	27/08/99 (14:00)	30/08/99 (02:00)
06	16/09/99 (22:00)	18/09/99 (18:00)
07	27/09/99 (22:00)	29/09/99 (22:00)
08	15/12/99 (22:00)	18/12/99 (22:00)
2000		
01	06/01/00 (18:00)	08/01/00 (18:00)
02	31/01/00 (02:00)	01/02/00 (22:00)
03	02/02/00 (06:00)	04/02/00 (18:00)
04	25/03/00 (02:00)	27/03/00 (10:00)
05	03/08/00 (02:00)	05/08/00 (02:00)
06	22/09/00 (06:00)	24/09/00 (02:00)
07	26/09/00 (06:00)	28/09/00 (06:00)
08	17/10/00 (18:00)	19/10/00 (22:00)
2001		
01	07/03/01 (10:00)	09/03/01 (22:00)
02	22/11/01 (06:00)	24/11/01 (02:00)

Fonte: O Autor

Tabela 4 – Intervalos de tempo não Alfvênicos identifi-  
cados neste trabalho no período de 1999 até  
2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados  
em ordem cronológica em cada um dos anos.  
As colunas 2 e 3 correspondem as datas de  
início e fim dos intervalos de tempo alfvêni-  
cos.

<b>EVENTO</b>	<b>INICIO D/M/A (UT)</b>	<b>FIM D/M/A (UT)</b>
1999		
01	11/03/99 (06:00)	13/03/99 (06:00)
02	16/05/99 (02:00)	18/05/99 (10:00)
03	22/12/99 (02:00)	24/12/99 (02:00)
2000		
01	17/01/00 (22:00)	20/01/00 (02:00)
02	22/01/00 (18:00)	24/01/00 (14:00)
03	11/07/00 (02:00)	13/07/00 (02:00)
04	08/09/00 (10:00)	10/09/00 (22:00)
05	15/09/00 (02:00)	17/09/00 (02:00)
06	22/11/00 (18:00)	28/11/00 (06:00)
07	22/12/00 (02:00)	24/12/00 (18:00)
2001		
01	24/01/01 (10:00)	16/01/01 (14:00)
02	06/02/01 (14:00)	08/02/01 (14:00)
03	11/03/01 (22:00)	14/03/01 (06:00)
04	29/03/01 (02:00)	01/04/01 (06:00)
05	01/04/01 (18:00)	03/04/01 (14:00)
06	13/07/01 (14:00)	15/07/01 (10:00)
07	24/07/01 (18:00)	26/07/01 (18:00)
08	02/10/01 (06:00)	04/10/01 (18:00)
09	25/10/01 (02:00)	27/10/01 (06:00)
10	01/11/01 (06:00)	03/11/01 (18:00)

Fonte: O Autor

Tabela 5 – Intervalos de tempo dos ICMEs identificados por Richardson e Cane (2010) (RC2010) no período de 1999 até 2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados cronologicamente em cada um dos anos. A coluna 2 informa dos ICMEs com: nuvem magnética (MC2), candidato a nuvem (MC1) ou sem nuvem (MC0). As colunas 3 e 4 correspondem as datas de início e fim dos ICMEs segundo RC2010.

<b>EVENTO</b>	<b>NUVEM?</b>	<b>INICIO D/M/A (UT)</b>	<b>FIM D/M/A (UT)</b>
1999			
01	MC0	04/01/99 (00:00)	04/01/99 (22:00)
02	MC0	13/01/99 (15:00)	13/01/99 (22:00)
03	MC0	23/01/99 (09:00)	23/01/99 (23:00)
04	MC0	13/02/99 (19:00)	14/02/99 (15:00)
05	MC1	16/02/99 (15:00)	17/02/99 (11:00)
06	MC0	17/02/99 (06:00)	18/02/99 (10:00)
07	MC2	18/02/99 (10:00)	20/02/99 (17:00)
08	MC0	10/03/99 (17:00)	12/03/99 (02:00)
09	MC1	19/03/99 (17:00)	20/03/99 (12:00)
10	MC2	16/04/99 (18:00)	17/04/99 (19:00)
11	MC2	21/04/99 (04:00)	22/04/99 (14:00)
12	MC0	15/05/99 (16:00)	18/05/99 (00:00)
13	MC1	02/06/99 (23:00)	03/06/99 (22:00)
14	MC0	27/06/99 (22:00)	29/06/99 (04:00)
15	MC0	03/07/99 (05:00)	06/07/99 (06:00)
16	MC1	06/07/99 (21:00)	07/07/99 (02:00)
17	MC0	07/07/99 (07:00)	08/07/99 (04:00)
18	MC0	27/07/99 (17:00)	29/07/99 (12:00)
19	MC0	30/07/99 (19:00)	30/07/99 (08:00)
20	MC1	31/07/99 (19:00)	02/08/99 (06:00)
21	MC0	02/08/99 (15:00)	03/08/99 (15:00)
22	MC2	08/08/99 (20:00)	10/08/99 (17:00)
23	MC0	12/08/99 (03:00)	14/08/99 (00:00)
24	MC1	20/08/99 (23:00)	23/08/99 (23:00)
25	MC2	21/09/99 (12:00)	22/09/99 (12:00)
26	MC0	22/09/99 (19:00)	24/09/99 (03:00)
27	MC0	21/10/99 (08:00)	22/10/99 (07:00)

continuará na próxima página

Tabela 5 – continuação da página anterior

EVENTO	NUVEM	INICIO D/M/A (UT)	FIM D/M/A (UT)
28	MC0	12/11/99 (10:00)	13/11/99 (18:00)
29	MC2	13/11/99 (20:00)	15/11/99 (00:00)
30	MC0	22/11/99 (00:00)	24/11/99 (03:00)
31	MC0	12/12/99 (19:00)	13/12/99 (06:00)
32	MC0	14/12/99 (04:00)	14/12/99 (20:00)
33	MC1	27/12/99 (11:00)	28/12/99 (04:00)
2000			
01	MC1	22/01/00 (17:00)	23/01/00 (02:00)
02	MC0	11/02/00 (16:00)	11/02/00 (20:00)
03	MC2	12/02/00 (12:00)	13/02/00 (00:00)
04	MC0	14/02/00 (12:00)	16/02/00 (08:00)
05	MC2	21/02/00 (05:00)	22/02/00 (12:00)
06	MC0	01/03/00 (00:00)	02/03/00 (00:00)
07	MC0	19/03/00 (02:00)	19/03/00 (12:00)
08	MC0	29/03/00 (19:00)	01/04/00 (00:00)
09	MC1	07/04/00 (06:00)	08/04/00 (06:00)
10	MC1	18/04/00 (20:00)	19/04/00 (14:00)
11	MC0	24/04/00 (04:00)	24/04/00 (13:00)
12	MC0	02/05/00 (00:00)	05/05/00 (10:00)
13	MC0	07/05/00 (00:00)	08/05/00 (00:00)
14	MC0	13/05/00 (17:00)	14/05/00 (18:00)
15	MC0	15/05/00 (19:00)	16/05/00 (14:00)
16	MC1	16/05/00 (23:00)	17/05/00 (07:00)
17	MC0	23/05/00 (09:00)	23/05/00 (21:00)
18	MC1	24/05/00 (00:00)	27/05/00 (10:00)
19	MC1	04/06/00 (22:00)	06/06/00 (22:00)
20	MC0	08/06/00 (12:00)	10/06/00 (17:00)
21	MC0	11/06/00 (09:00)	11/06/00 (18:00)
22	MC0	13/06/00 (12:00)	14/06/00 (06:00)
23	MC1	18/06/00 (09:00)	18/06/00 (17:00)
24	MC2	24/06/00 (00:00)	26/06/00 (08:00)
25	MC0	26/06/00 (10:00)	27/06/00 (00:00)
26	MC2	01/07/00 (19:00)	03/07/00 (17:00)
27	MC0	11/07/00 (02:00)	11/07/00 (14:00)
28	MC2	11/07/00 (22:00)	13/07/00 (03:00)
29	MC2	13/07/00 (13:00)	14/07/00 (15:00)

continuará na próxima página

Tabela 5 – continuação da página anterior

EVENTO	NUVEM	INICIO D/M/A (UT)	FIM D/M/A (UT)
30	MC2	14/07/00 (17:00)	15/07/00 (14:00)
31	MC2	15/07/00 (19:00)	17/07/00 (08:00)
32	MC0	20/07/00 (01:00)	21/07/00 (08:00)
33	MC0	23/07/00 (15:00)	26/07/00 (05:00)
34	MC1	27/07/00 (2:00)	28/07/00 (02:00)
35	MC2	28/07/00 (12:00)	30/07/00 (13:00)
36	MC2	10/08/00 (19:00)	11/08/00 (21:00)
37	MC2	12/08/00 (5:00)	13/08/00 (22:00)
38	MC0	02/09/00 (22:00)	03/09/00 (13:00)
39	MC0	08/09/00 (12:00)	10/09/00 (10:00)
40	MC2	17/09/00 (21:00)	21/09/00 (00:00)
41	MC2	03/10/00 (10:00)	05/10/00 (00:00)
42	MC1	05/10/00 (13:00)	07/10/00 (11h:00)
43	MC2	13/10/00 (16:00)	14/10/00 (17:00)
44	MC2	28/10/00 (21:00)	29/10/00 (22:00)
45	MC2	06/11/00 (17:00)	08/11/00 (03:00)
46	MC1	08/11/00 (13:00)	09/11/00 (15:00)
47	MC0	11/11/00 (08:00)	12/11/00 (03:00)
48	MC0	27/11/00 (08:00)	28/11/00 (03:00)
49	MC1	28/11/00 (11:00)	29/11/00 (22:00)
50	MC0	22/12/00 (03:00)	22/12/00 (20:00)
51	MC0	23/12/00 (00:00)	23/12/00 (12:00)
2001			
01	MC1	24/01/01 (09:00)	26/01/01 (07:00)
02	MC2	04/03/01 (00:00)	05/03/01 (02:00)
03	MC2	19/03/01 (17:00)	22/03/01 (22:00)
04	MC2	27/03/01 (20:00)	28/03/01 (17:00)
05	MC0	28/03/01 (17:00)	30/03/01 (18:00)
06	MC1	31/03/01 (05:00)	31/03/01 (22:00)
07	MC1	01/04/01 (04:00)	03/04/01 (15:00)
08	MC2	04/04/01 (18:00)	05/04/01 (12:00)
09	MC0	08/04/01 (14:00)	09/04/01 (04:00)
10	MC2	11/04/01 (22:00)	13/04/01 (07:00)
11	MC0	13/04/01 (09:00)	14/04/01 (12:00)
12	MC0	15/04/01 (17:00)	16/04/01 (01:00)
13	MC0	18/04/01 (12:00)	20/04/01 (11:00)

continuará na próxima página

Tabela 5 – continuação da página anterior

EVENTO	NUVEM	INICIO D/M/A (UT)	FIM D/M/A (UT)
14	MC2	21/04/01 (23:00)	23/04/01 (03:00)
15	MC2	28/04/01 (14:00)	01/05/01 (02:00)
16	MC0	03/05/01 (11:00)	04/05/01 (10:00)
17	MC1	07/05/01 (19:00)	08/05/01 (07:00)
18	MC1	09/05/01 (12:00)	10/05/01 (22:00)
19	MC0	11/05/01 (13:00)	12/05/01 (00:00)
20	MC2	28/05/01 (03:00)	31/05/01 (14:00)
21	MC1	07/06/01 (18:00)	08/06/01 (00:00)
22	MC1	27/06/01 (03:00)	28/06/01 (17:00)
23	MC2	09/07/01 (02:00)	11/07/01 (04:00)
24	MC1	13/07/01 (17:00)	14/07/01 (01:00)
25	MC0	03/08/01 (11:00)	03/08/01 (14:00)
26	MC0	15/08/01 (05:00)	16/08/01 (14:00)
27	MC0	17/08/01 (20:00)	19/08/01 (16:00)
28	MC1	30/08/01 (17:00)	31/08/01 (10:00)
29	MC1	01/09/01 (13:00)	02/09/01 (22:00)
30	MC1	13/09/01 (18:00)	14/09/01 (22:00)
31	MC1	24/09/01 (00:00)	24/09/01 (22:00)
32	MC0	25/09/01 (06:00)	25/09/01 (20:00)
33	MC1	29/09/01 (11:00)	01/10/01 (00:00)
34	MC0	01/10/01 (08:00)	02/10/01 (00:00)
35	MC2	02/10/01 (04:00)	02/10/01 (12:00)
36	MC0	02/10/01 (14:00)	03/10/01 (16:00)
37	MC0	04/10/01 (14:00)	05/10/01 (19:00)
38	MC1	12/10/01 (04:00)	12/10/01 (09:00)
39	MC0	21/10/01 (20:00)	25/10/01 (10:00)
40	MC0	27/10/01 (03:00)	28/10/01 (12:00)
41	MC0	29/10/01 (22:00)	31/10/01 (13:00)
42	MC2	31/10/01 (20:00)	02/11/01 (12:00)
43	MC1	05/11/01 (19:00)	06/11/01 (06:00)
44	MC1	06/11/01 (12:00)	09/11/01 (03:00)
45	MC1	19/11/01 (22:00)	21/11/01 (13:00)
46	MC2	24/11/01 (14:00)	25/11/01 (20:00)
47	MC0	28/12/01 (00:00)	29/12/01 (12:00)
48	MC1	30/12/01 (00:00)	30/12/01 (18:00)

Tabela 6 – Intervalos de tempo dos CIRs identificados por Jian *et al.* (2006) (Ji2006) no período de 1999 até 2001. Na coluna 1 os eventos são enumerados em ordem cronológica em cada um dos anos. As colunas 2 e 3 correspondem as datas de inicio e fim dos CIRs como informado no artigo de Ji2006.

<b>EVENTO</b>	<b>INICIO D/M/A (UT)</b>	<b>FIM D/M/A (UT)</b>
1999		
01	05/01/99 (18:00)	07/01/99 (14:00)
02	13/01/99 (08:00)	15/01/99 (07:00)
03	26/01/99 (16:00)	30/01/99 (12:00)
04	11/02/99 (07:00)	12/02/99 (07:10)
05	14/02/99 (13:00)	15/02/99 (18:00)
06	28/02/99 (21:44)	02/03/99 (03:00)
07	03/03/99 (19:00)	04/03/99 (20:00)
08	28/03/99 (1:00)	30/03/99 (19:48)
09	10/04/99 (02:00)	10/04/99 (22:30)
10	20/04/99 (13:00)	20/04/99 (23:10)
11	28/04/99 (10:00)	30/04/99 (11:00)
12	12/05/99 (22:00)	13/05/99 (20:00)
13	18/05/99 (00:32)	18/05/99 (19:48)
14	23/05/99 (00:30)	23/05/99 (19:30)
15	24/05/99 (09:00)	25/05/99 (10:30)
16	08/06/99 (00:00)	09/06/99 (05:30)
17	15/06/99 (06:00)	18/06/99 (00:00)
18	26/06/99 (02:00)	28/06/99 (10:00)
19	14/07/99 (12:00)	15/07/99 (22:30)
20	21/07/99 (13:00)	22/07/99 (22:00)
21	30/07/99 (06:00)	31/07/99 (00:00)
22	06/08/99 (05:00)	06/08/99 (22:00)
23	09/08/99 (21:30)	12/08/99 (02:00)
24	15/08/99 (10:33)	17/08/99 (02:16)
25	23/08/99 (06:00)	24/08/99 (20:00)
26	07/09/99 (01:00)	08/09/99 (00:00)
27	12/09/99 (03:58)	13/09/99 (19:00)
28	26/09/99 (08:00)	27/09/99 (18:00)

continuará na próxima página

Tabela 6 – continuação da página anterior

EVENTO	INICIO D/M/A (UT)	FIM D/M/A (UT)
29	09/10/99 (16:00)	11/10/99 (07:00)
30	21/10/99 (02:21)	22/10/99 (13:00)
31	31/10/99 (00:00)	01/11/99 (09:00)
32	05/11/99 (20:03)	09/11/99 (00:00)
33	21/11/99 (14:00)	24/11/99 (06:40)
34	02/12/99 (06:00)	05/12/99 (00:00)
35	23/12/99 (11:42)	25/12/99 (06:00)
36	30/12/99 (10:30)	31/12/99 (16:00)
2000		
01	10/01/00 (12:00)	12/01/00 (10:00)
02	27/01/00 (05:00)	28/01/00 (09:00)
03	05/02/00 (15:27)	07/02/00 (00:00)
04	23/02/00 (04:00)	24/02/00 (14:15)
05	05/03/00 (13:00)	07/03/00 (06:00)
06	11/03/00 (23:00)	12/03/00 (23:00)
07	16/03/00 (10:52)	18/03/00 (00:00)
08	22/03/00 (01:00)	22/03/00 (19:00)
09	23/03/00 (22:00)	24/03/00 (19:30)
10	31/03/00 (01:00)	02/04/00 (13:00)
11	15/04/00 (14:00)	17/04/00 (10:15)
12	18/04/00 (16:00)	20/04/00 (02:00)
13	01/05/00 (13:45)	02/05/00 (22:00)
14	12/05/00 (15:00)	13/05/00 (23:00)
15	17/05/00 (20:00)	18/05/00 (12:00)
16	23/05/00 (14:00)	24/05/00 (14:00)
17	29/05/00 (07:00)	30/05/00 (03:00)
18	14/06/00 (08:00)	15/06/00 (17:00)
19	03/07/00 (10:00)	05/07/00 (00:00)
20	31/07/00 (15:00)	02/08/00 (02:00)
21	23/08/00 (22:00)	25/08/00 (06:00)
22	27/08/00 (14:00)	29/08/00 (05:00)
23	11/09/00 (10:00)	13/09/00 (12:00)
24	16/09/00 (18:30)	17/09/00 (11:00)
25	24/09/00 (12:00)	25/09/00 (04:00)
26	25/09/00 (06:00)	25/09/00 (04:00)
27	15/10/00 (18:00)	16/10/00 (12:00)

continuará na próxima página

Tabela 6 – continuação da página anterior

EVENTO	INICIO D/M/A (UT)	FIM D/M/A (UT)
28	22/10/00 (05:00)	23/10/00 (08:00)
29	03/11/00 (20:00)	05/11/00 (18:00)
30	23/11/00 (22:00)	25/11/00 (00:00)
31	06/12/00 (15:00)	09/12/00 (04:00)
32	24/12/00 (08:00)	26/12/00 (12:00)
2001		
01	02/01/01 (13:05)	05/01/01 (04:00)
02	10/01/01 (16:09)	11/01/01 (10:00)
03	21/01/01 (06:00)	22/01/01 (18:00)
04	28/01/01 (10:30)	29/01/01 (20:00)
05	05/02/01 (20:00)	07/02/01 (10:00)
06	12/02/01 (21:00)	14/02/01 (00:00)
07	26/02/01 (04:00)	27/02/01 (18:00)
08	28/02/01 (04:00)	28/02/01 (16:00)
09	03/03/01 (09:00)	06/03/01 (00:00)
10	08/05/01 (06:00)	09/05/01 (20:25)
11	12/05/01 (04:00)	12/05/01 (22:00)
12	13/05/01 (11:00)	14/05/01 (05:00)
13	22/05/01 (00:00)	25/05/01 (20:00)
14	01/06/01 (07:00)	02/06/01 (14:00)
15	08/06/01 (12:00)	10/06/01 (04:00)
16	18/06/01 (18:00)	20/06/01 (05:00)
17	13/07/01 (21:00)	14/07/01 (07:00)
18	16/07/01 (05:00)	17/07/01 (09:00)
19	24/07/01 (00:00)	26/07/01 (00:00)
20	30/07/01 (16:00)	31/07/01 (23:00)
21	09/08/01 (18:00)	10/08/01 (14:00)
22	21/08/01 (00:00)	22/08/01 (12:00)
23	25/08/01 (06:00)	27/08/01 (01:00)
24	02/09/01 (16:00)	04/09/01 (04:00)
25	14/09/01 (18:00)	15/09/01 (19:00)
26	23/09/01 (03:00)	24/09/01 (07:00)
27	08/10/01 (04:00)	09/10/01 (16:00)
28	11/10/01 (16:20)	12/10/01 (12:09)
29	02/12/01 (08:00)	04/12/01 (18:00)
30	14/12/01 (21:00)	16/12/01 (12:12)

continuará na próxima página

**Tabela 6 – continuação da página anterior**

<b>EVENTO</b>	<b>INICIO D/M/A (UT)</b>	<b>FIM D/M/A (UT)</b>
31	21/12/01 (10:00)	22/12/01 (06:00)
32	23/12/01 (23:30)	24/12/01 (13:00)

Fonte: Adaptado de Jian *et al.* (2006)