

## **ESTUDO DAS IMAGENS DIGITAIS DAS EJEÇÕES DE MASSAS CORONAIS**

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

Ricardo Luiz Paul (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [rpaul@inf.ufsm.br](mailto:rpaul@inf.ufsm.br)

Nivaor Rodolfo Rigozo (MCTI/CRS/INPE, Orientador)  
E-mail: [nivaor.rigozo@crs.inpe.br](mailto:nivaor.rigozo@crs.inpe.br)

Junho de 2012

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC), agradeço pelo auxílio financeiro para desenvolver o projeto de pesquisa, sendo o meu processo número 110236/2012-2.



## **RESUMO**

No estudo das Ejeções de Massa Coronal, do inglês Coronal Mass Ejections (CMEs), foram feitas as análises de aproximadamente 4450 imagens digitais do ano de 1999. O estudo das imagens digitais de Ejeções de Massa Coronal tem o objetivo de identificar esse fenômeno ocorrido na atmosfera solar através de imagens digitais, do tipo C3, obtidas pelo coronógrafo Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO), que está a bordo do satélite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). O estudo inicial consiste em coletar as imagens e selecioná-las para o tratamento digital. Após o procedimento inicial, deve ser detectada a CME na imagem, analisada e se for possível, iniciar a filtragem da imagem conservando somente a CME para estudo de sua dinâmica. Neste processo, foram analisados aproximadamente 910 eventos contendo imagens de possíveis ejeções de massa coronal. Por fim, são comparados os resultados obtidos das dinâmicas das CMEs com os resultados gerados pelo SOHO Catalog, da National Aeronautics and Space Administration (NASA).



# **STUDY OF THE DIGITAL IMAGES OF THE CORONAL MASS EJECTIONS**

## **ABSTRACT**

In the study of Coronal Mass Ejection, analyzes were performed from digital images of 1999. The study of digital images of Coronal Mass Ejection aims to identify this phenomenon occurred in the solar atmosphere by means of digital images, type C3 coronagraph obtained by the Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO), which is aboard the satellite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). The initial study is to collect the images and select them for the digital treatment. After the initial procedure, the CME must be detected in the image, analyzed and if possible, start filtering the image retaining only the CME to study its dynamics. Finally, we compared the results of the dynamics of CMEs with the results generated by the SOHO Catalog of the National Aeronautics and Space Administration (NASA).



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Estrutura interna solar.....  | 5  |
| Figura 3.1 - Imagem da câmara do LASCO C3 e suas características visíveis destacadas.... | 7  |
| Figura 3.1 A - Identificada a CME .....  | 9  |
| Figura 3.1 B - Identificada a CME .....  | 9  |
| Figura 3.1 C - Identificada a CME .....  | 9  |
| Figura 3.1 D - Identificada a CME.....   | 9  |
| Figura 3.1 E - Identificada a CME.....   | 9  |
| Figura 3.2 A - Destacada a CME .....   | 10 |
| Figura 3.2 B - Destacada a CME .....   | 10 |
| Figura 3.2 C - Destacada a CME .....   | 10 |
| Figura 3.2 D - Destacada a CME .....   | 10 |
| Figura 3.2 E - Destacada a CME.....  | 10 |
| Figura 3.3 A - Destacada a CME no anel angular.....                                      | 10 |
| Figura 3.3 B - Destacada a CME no anel angular.....                                      | 10 |
| Figura 3.3 C - Destacada a CME no anel angular.....                                      | 10 |
| Figura 3.3 D - Destacada a CME no anel angular.....                                      | 10 |
| Figura 3.3 E - Destacada a CME no anel angular.....                                      | 10 |
| Figura 3.4 A - Borda da CME na imagem inicial.....                                       | 11 |
| Figura 3.4 B - Borda da CME na imagem inicial.....                                       | 11 |
| Figura 3.4 C - Borda da CME na imagem inicial.....                                       | 11 |
| Figura 3.4 D - Borda da CME na imagem inicial.....                                       | 11 |
| Figura 3.4 E - Borda da CME na imagem inicial.....                                       | 11 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.1 Mostra a relação das pastas analisadas com o total de pastas disponíveis para estudo .....                    | 12 |
| Tabela 4.2 Mostra os valores de velocidade inicial, velocidade final, velocidade média e aceleração da borda da CME..... | 13 |



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| 1 - INTRODUÇÃO .....                        | 1         |
| 2 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....             | 3         |
| 2.1 O Sol.....                              | 3         |
| 2.1.1 Núcleo .....                          | 3         |
| 2.1.2 Zona Radiativa .....                  | 3         |
| 2.1.3 Zona de Convecção .....               | 4         |
| 2.1.4 Atmosfera Solar .....                 | 4         |
| 2.1.4.1 Fotosfera .....                     | 4         |
| 2.1.4.2 Cromosfera .....                    | 4         |
| 2.1.4.3 Coroa .....                         | 4         |
| 2.2 Fenômenos Solares.....                  | 5         |
| 2.2.1 Ejeções de Massa Coronal .....        | 6         |
| <b>3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>        | <b>7</b>  |
| 3.1 Coronógrafo .....                       | 7         |
| 3.2 Detecção da CME .....                   | 8         |
| 3.2.1 Tratamento das Imagens Digitais ..... | 8         |
| 3.2.2 Dinâmica da CME .....                 | 11        |
| <b>4 – RESULTADOS .....</b>                 | <b>12</b> |
| <b>5 – ETAPAS A SEGUIR .....</b>            | <b>15</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                    | <b>16</b> |





## **1 – Introdução**

Atualmente a área do clima espacial ganhou grande importância em estudos mundialmente realizados. Na tentativa de aprofundar conhecimentos de fenômenos físicos gerados nas proximidades da estrela central do Sistema Solar, o Sol, e suas consequências no meio interplanetário e principalmente no planeta Terra. Fenômenos como a interação do vento solar com o campo magnético da Terra, as variações do fluxo de partículas e energias que ocorrem no Sol e suas consequências na atmosfera e clima da Terra (Hoyt and Schatten, 1997). O estudo do clima espacial consiste na coleta de dados de fenômenos provenientes do Sol e da magnetosfera da Terra, para que se possa fazer uma previsão desses fenômenos antes que eles ocorram.

Dentre os principais fenômenos solares, as ejeções de massa coronal são as principais causadoras de tempestades magnéticas intensas na Terra (Gosling et al., 1990). Estas ejeções lançam enormes quantidades de matéria do Sol para o meio interplanetário (Hundhausen, 1997), as quais possuem características distintas do Vento Solar podendo interromper o fluxo de partículas do vento solar e produzir distúrbios que atingem a Terra.

É bastante comum observar essas ejeções de massa coronal se propagando desde o Sol até a Terra com velocidade superior a velocidade magnetossônica do vento solar normal, produzindo uma onda de choque, a qual pode produzir efeitos de compressão e intensificação do campo magnético do vento solar, tornando-a eficiente para causar tempestades geomagnéticas intensas (Tsurutani et al., 1988, Tsurutani et al., 1992). Para prever esses fenômenos é necessário estudar a dinâmica das ejeções de massa coronal, desde sua origem solar até sua chegada na Terra, de modo que possamos entender sua evolução.

Portanto, este projeto de pesquisa tem o objetivo de estudar as características dinâmicas das ejeções de massa coronal, detectando a ocorrência da aceleração, desaceleração ou velocidade constante, através da análise de imagens digitais das observações do coronógrafo LASCO C3 a bordo do satélite SOHO, capaz de observar de 2 a 32 raios solares. No capítulo de revisão bibliográfica é apresentada a estrutura solar e o fenômeno físico das ejeções de massa coronal. Em materiais e métodos é apresentada uma breve descrição sobre coronógrafo LASCO C3 e como são captadas as imagens usadas para detectar o fenômeno, bem como uma descrição de como é feita a detecção das CME e a determinação de sua dinâmica, desenvolvido por Rigozo (2010). Em resultados são apresentados às dinâmicas das ejeções de massa coronal obtidos das imagens estudadas, bem como a sua comparação com os resultados gerados pelo SOHO Catalog, da National Aeronautics and Space Administration (NASA). Por fim, é apresentado os próximos passos para dar continuidade ao projeto.

## **2 – Revisão Bibliográfica**

Para entender melhor o estudo das Ejeções de Massa Coronais (CMEs), é preciso conhecer melhor o Sol, sua estrutura e como ocorrem as Ejeções de Massa Coronais no Sol, sendo esse o objetivo deste capítulo.

### **2.1 O Sol**

O sol apresenta uma estrutura interna dividida em basicamente quatro regiões (Kivelson e Russell, 1995). No centro está o núcleo, após o núcleo encontramos a Zona Radiativa, depois da Zona Radiativa surge a Zona de Convecção e na parte mais externa temos a Atmosfera Solar, onde podemos observar as Ejeções de Massa Coronal.

#### **2.1.1 Núcleo**

É a parte central do Sol, estende-se do centro até aproximadamente 0,2 a 0,25 raios solares. Única região do Sol que produz energia em quantidade significativa que é gerada através de fusão nuclear e sua temperatura pode chegar a 15000000 K , sendo extremamente denso.

#### **2.1.2 Zona Radiativa**

Fica entre 0,25 a 0,7 raio solar do centro do Sol, sua energia é gerada no núcleo e dissipada através do processo de difusão radioativa, sua temperatura pode chegar a 8000000 K (Rigozo, 2010).

### **2.1.3 Zona de Convecção**

Esta situada logo após a Zona Radiativa, iniciando em 0,7 raio solar e chegando até a superfície. Sua temperatura varia de 500000 K a 6600 K e sua energia é dissipada sob forma de convecção.

### **2.1.4 Atmosfera Solar**

Acima da superfície do Sol, existe a Atmosfera Solar, composta por ter partes principais: a Fotosfera, a Cromosfera e a Coroa.

#### **2.1.4.1 Fotosfera**

É a superfície visível do Sol, muito fina comparada com o raio solar. Sua temperatura diminui a medida que se afasta do centro, podendo chegar a 6000 K.

#### **2.1.4.2 Cromosfera**

Situa-se acima da Fotosfera e com espessura de aproximadamente 10000 Km. Só pode ser observada quando ocorre um obscurecimento do disco solar. Sua temperatura aumenta conforme sua altura, ao contrário do que ocorre na Fotosfera, variando de 4300 até 100000 K.

#### **2.1.4.3 Coroa**

É a camada mais externa da Atmosfera Solar e não tem um limite superior definido. Pode ser observado quando ocorre um eclipse total do Sol, tornando visível para observações e estudos.

Sua temperatura chega na grandeza de milhões de graus, e a esta temperatura, forma-se o vento solar (partículas carregadas em fluxo) que se dispersa ao longo do Sistema Solar. É na coroa que ocorrem as Ejeções de Massa Coronal com velocidade de aproximadamente 2000 km/s.

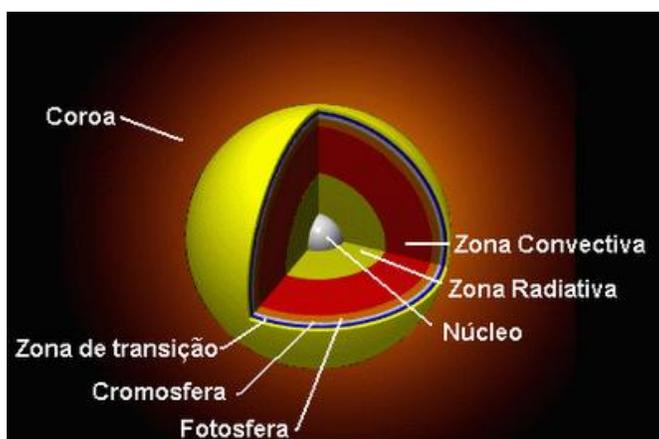


Figura 2.1. Estrutura interna solar.

## 2.2 Fenômenos Solares

Atualmente o estudo dos fenômenos solares tem grande importância, pois um fenômeno solar pode interagir com o planeta Terra, podendo gerar outros fenômenos que afetam o mesmo. Com isso, uma alteração solar pode gerar vários outros fenômenos que interagem com o meio interplanetário.

Nosso estudo concentra-se nas ejeções de massa coronal, um tipo de fenômeno solar que pode causar alterações em nosso planeta.

### **2.2.1 Ejeções de Massa Coronal**

São grandes estruturas contendo plasma e campos magnéticos que são expelidos do Sol para a heliosfera. Recentemente as CMEs são divididas em dois tipos principais (Sheeley et al., 1999), as Graduais e as Impulsivas.

As CMEs Graduais são aparentemente formadas pela elevação gradual até valores máximos da ordem de 400-600 km/s.

As CMEs Impulsivas são associadas a explosões solares e a ondas observadas no comprimento de onda do ultravioleta, não apresenta aceleração e com velocidade iniciais maiores que 750 km/s.

### 3 - Materiais e Métodos

O trabalho de pesquisa consiste em um estudo de imagens digitais obtidas através do coronógrafo Lasco a bordo do satélite SOHO. Após a obtenção das imagens é feito o tratamento das mesmas com o ambiente Matlab 7.0, desenvolvido por Rigozo(2010). Também é feito o cálculo da dinâmica das CMEs e por fim, os resultados obtidos são comparados com os dados do SOHO Catalog ([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

#### 3.1 Coronógrafo

Um coronógrafo é um tipo especial de telescópio que usa um disco sólido (chamado de occulter ou disco de ocultação) para cobrir o disco solar totalmente, bloqueando a luz direta para poder ser observada a atmosfera solar e seus fenômenos físicos. O LASCO é um conjunto de três coronógrafos, mas neste estudo, só usaremos imagens do LASCO C3, devido ao seu amplo raio de detecção.

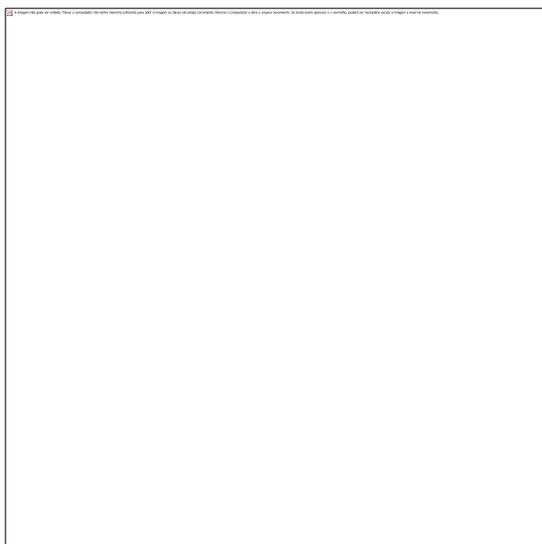


Figura 3.2 Imagem da câmera do LASCO C3 e suas características visíveis destacadas.

Com a figura 3.1, percebemos as características do coronógrafo usado para estudo. Nota-se que o disco de ocultação da luz visível do Sol é posicionado da maneira correta através de uma Haste, tendo assim a atmosfera solar e seus fenômenos recorrentes visíveis para estudo.

### **3.2 Detecção da CME**

Para analisar as ejeções de massa coronal, é feito um tratamento das imagens no ambiente Matlab 7.0 desenvolvido por Rigozo (2010), que consiste em:

- 1) Eliminar ou reduzir substancialmente os ruídos ou sujeiras nas imagens que dificultam a visualização clara de uma CME.
- 2) Com as informações contidas nos cabeçalhos das imagens FIT, desenvolver um algoritmo que possibilite a visualização e detecção clara de uma CME;
- 3) Desenvolver um algoritmo que determine as características dinâmicas (velocidade radial, aceleração radial, velocidade de expansão e aceleração de expansão) de uma CME através da análise digital de suas imagens;
- 4) Um algoritmo que gere um produto de saída desse sistema, produto esse na forma de gráficos, vídeos e arquivos que armazenem os resultados obtidos.

#### **3.2.1 Tratamento das Imagens Digitais**

No primeiro momento, são selecionadas as imagens para filtragem de modo que fique evidenciado somente o evento da CME, para isso, sempre tomamos como referência a primeira imagem do evento, e as próximas imagens são sobrepostas a primeira uma a uma.

Após a filtragem, é detectado o anel da CME, feito de grau em grau, de 0 a 360, e é determinada a borda neste anel. Também é destacado na imagem inicial a borda da CME .

Para exemplificar os métodos, usaremos uma pasta do dia 10 de março de 1999, para demonstração da pesquisa. Nesta etapa inicial identificamos a ejeção de massa coronal, se ela é adequada para estudo. Nas figuras 3.1 A, 3.1 B, 3.1 C, 3.1 D, 3.1 E, nota-se que a CME evolui de imagem para imagem. Para conseguirmos visualizar desta forma, a primeira imagem do evento foi tomada como referência para as próximas imagens, sendo subtraído pelo programa as diferenças das imagens. Nota-se que no centro esta o occulter, tapando o disco solar.

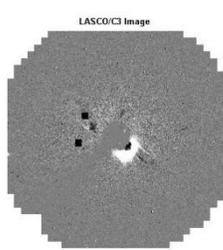


Figura 3.1 A

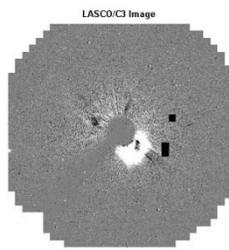


Figura 3.1 B

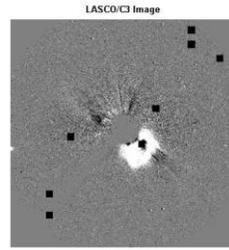


Figura 3.1 C

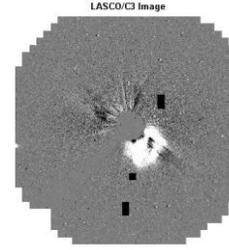


Figura 3.1 D

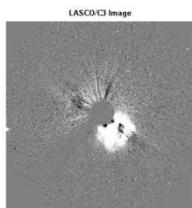


Figura 3.1 E

Após observado isso, precisamos destacar somente a CME, seguindo os passos pelo programa desenvolvido por Rigozo (2010). As imagens acima ficarão conforme as figuras 3.2 A, 3.2 B, 3.2 C, 3.2 D, 3.2 E.

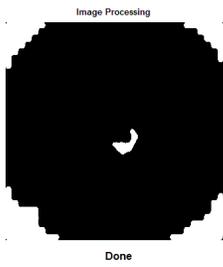


Figura 3.2 A

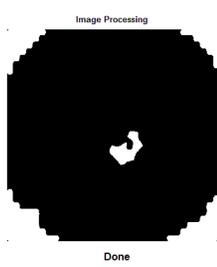


Figura 3.2 B

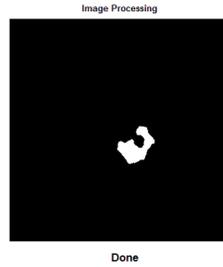


Figura 3.2 C

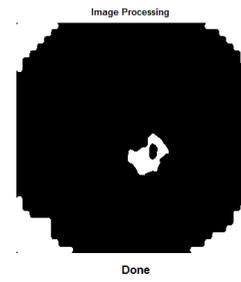


Figura 3.2 D

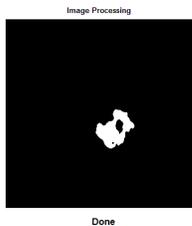


Figura 3.2 E

Nesta primeira etapa faltam ainda desenhar a borda da CME no anel angular ao redor do sol (figuras 3.3 A, 3.3 B, 3.3 C, 3.3 D, 3.3 E) .

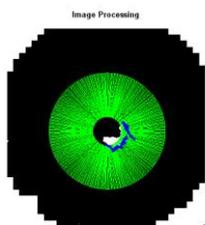


Figura 3.3 A

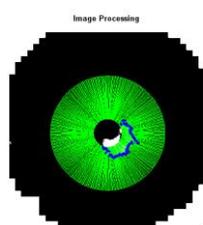


Figura 3.3 B

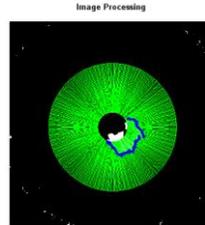


Figura 3.3 C

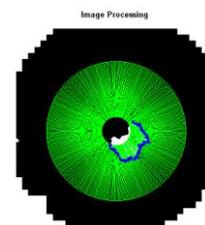


Figura 3.3 D

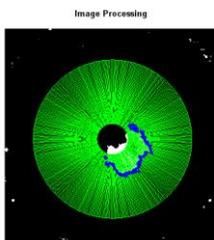


Figura 3.3 E

E na imagem inicial também é contornada a borda da CME (figuras 3.4 A, 3.4 B, 3.4 C, 3.4 D, 3.4 E).

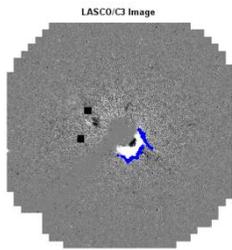


Figura 3.4 A

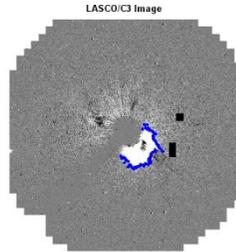


Figura 3.4 B

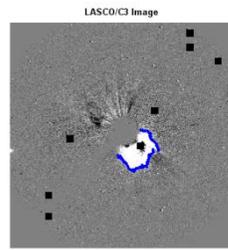


Figura 3.4 C

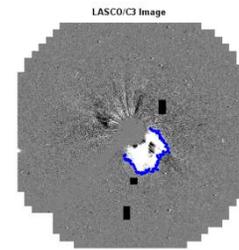


Figura 3.4 D

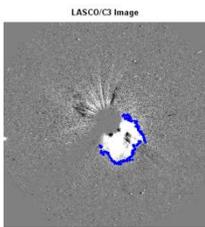


Figura 3.4 E

### 3.2.2 Dinâmica da CME

Com as imagens tratadas, a próxima etapa é definir a dinâmica das ejeções de massa coronal, que consiste em calcular a velocidade, aceleração ou desaceleração da Ejeção de Massa Coronal.

Para o cálculo da dinâmica é usado outro ambiente Matlab desenvolvido por Rigozo(2010), onde são colocados os dados de uma pasta (evento) e os resultados são salvos na mesma pasta, em formato de vídeo e um tabela com dados em formato TXT.

#### 4 - Resultados

Os dados coletados (imagens) foram armazenados em pastas, sendo que cada pasta armazena um evento ocorrido. Destas pastas, foram identificados os eventos em que foi possível reconhecer uma CME e sua evolução. E por fim, aplicada a dinâmica da CME nas pastas em que as imagens estavam tratadas e era possível analisar os resultados da dinâmica corretamente. A Tabela 4.1 mostra o percentual de pastas que receberam a Dinâmica, o total de pastas e imagens estudadas.

|   |      |
|---|------|
| Total de pastas (eventos)                   | 910  |
| Total de imagens (aproximado)               | 4450 |
| Total de pastas com imagens para tratamento | 120  |
| Percentual de pastas tratadas               | 12%  |
| Percentual de pastas feita a dinâmica       | 7%   |

Tabela 4.1 – Mostra a relação das pastas analisadas com o total de pastas disponíveis para estudo.

Com uma sequência de imagens tratadas, podemos identificar a velocidade de expansão da CME com o programa do cálculo da Dinâmica, que lê dados do cabeçalho da imagem no formato FIT. Esses dados localizados no cabeçalho contêm o tempo exato em que a imagem foi tirada, juntando com os dados da variação da distância ( $\Delta s$ ) da borda da CME e com o tempo decorrido entre uma imagem e outra ( $\Delta t$ ), podemos calcular a velocidade de expansão da CME,  $v = \Delta s / \Delta t$ .

Esta velocidade é calculada de grau em grau, dentro anel angular ao redor do sol, para cada imagem. Sendo assim, em uma sequência de imagens podemos determinar a velocidade inicial, a velocidade final, a velocidade média e a aceleração de expansão da CME.

| Ângulo (°) | Velocidade inicial (km/s) | Velocidade Final (km/s) | Velocidade Média (km/s) | Aceleração (km/s) |
|------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|
| 165.0      | 73.1                      | 419,9                   | 328.6                   | 96.3              |
| 166.0      | 0.1                       | 492.9                   | 405.3                   | 136.8             |
| 167.0      | 55.0                      | 547.7                   | 449.2                   | 136.8             |
| 168.0      | 146.4                     | 566.0                   | 515.0                   | 116.5             |
| 169.0      | 164.7                     | 529.4                   | 504.0                   | 101.3             |
| 170.0      | 128.0                     | 547.7                   | 405.3                   | 116.5             |
| 171.0      | 54.9                      | 712.0                   | 349.3                   | 114.1             |
| 172.0      | 65.9                      | 730.3                   | 342.5                   | 115.3             |
| 173.0      | 36.5                      | 346.8                   | 350.6                   | 86.1              |
| 174.0      | 54.8                      | 310.3                   | 339.6                   | 70.9              |
| 175.0      | 256.3                     | 237.8                   | 262.8                   | -5.3              |
| 176.0      | 164.6                     | 273.8                   | 284.8                   | 30.3              |
| 177.0      | 182.8                     | 292.0                   | 273.8                   | 30.3              |
| 178.0      | 91.3                      | 401.5                   | 273.8                   | 86.1              |

Tabela 4.2 – Mostra os valores de velocidade inicial, velocidade final, velocidade média e aceleração da borda da CME.

Na tabela pode-se observar as características dinâmicas da CME para velocidade inicial, velocidade final, velocidade média e aceleração. Nota-se que este evento contém uma CME em aceleração, observado os valores da aceleração de expansão descritos na tabela. Além

dos gráficos o ambiente da Dinâmica desenvolvido por Rigozo(2010) gera gráficos simples da velocidade de expansão, velocidade radial, aceleração de expansão e aceleração radial.

Este é um evento do dia 10 de março de 1999. Lembrando que estes passos são repetidos para os eventos que ocorreram em 1999, de acordo com a possibilidade de visualização e detecção da CME pelos ambientes Matlab.

## **5 – Etapas a Seguir**

A partir de dados coletados, da utilização dos programas e dos resultados comparados, nota-se que são eficientes os ambientes desenvolvidos por Rigozo (2010) na linguagem de programação Matlab. Mas ao longo do estudo, constatou-se a necessidade de melhoria do programa de tratamento digital de imagens das CMEs.

Assim, como etapa seguinte pretende-se entender melhor os códigos do programa de tratamento das imagens de CME para aprimora-lo. Além de continuar as análises das imagens de ejeções de massa coronal para o ano de 2000.

## Referências

Dal Lago, A., R. Schwenn, G. Stenborg, and W. D. Gonzalez, *Coronal Mass Ejection speeds measured in the solar corona using LASCO C2 and C3 images*, Adv. SpaceRes. Vol.32, No. 12, pp. 2619-2624, 2003.

Dal Lago, A., R. Schwenn, G. Stenborg, W. D. Gonzalez, A. L. C. de Gonzalez, L. E. A. Vieira, E. Ether, F. L. Guarnieri, and N. J. Schuch, *Deceleration observed on the July 25" (1999) coronal mass ejection*, GeofísicaInternacional (2004), Vol. 43, Num. 1, pp. 41-45.

Dal Lago, A., *Estudo de estruturas geofetivas no meio interplanetário e de suas causas solares*, tese de doutorado do curso de pós-graduação em geofísica espacial INPE São José dos Campos, INPE-10298-TDI/917, 2003.

Gosling, J. T., D. J. McComas, J. L. Phillips, and S. J. Bame, Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections, *J. Geophys. Res.*, 96, 7831-7838, 1991.

Gosling, J. T., S. J. Bame, D. J. McComas, and J. L. Phillips, Coronal mass ejections and large geomagnetic storms, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 901-904, 1990.

Hoyt, D. V. and Schatten, K. H.: 1997, *The Role of the Sun in climate change*, Oxford University Press.

Hundhausen, A. J. An introduction. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. *Coronal mass ejections*, Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.1-7.

Kivelson, M. G.; e Russell, C. T. *Introduction to Space Physics*. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995. 568p.

Rigozo, N.R.; *Detecção de CME e determinação de suas características dinâmicas por imagens digitais*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – 2010 (Submetido)

Sheeley, N. R. et al. Continuous tracking of coronal outflows: two kinds of coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.* v.104, n.A11, p.24739-24767, 1999.

Tsurutani, B. T., W. D. Gonzalez, F. Tang, and Y. T. Lee, Great magnetic storms, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1, 73-76, 1992.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Tang, F.; Akasofu, S. I.; Smith, E. J. Origin of interplanetary southward magnetic field responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979). *J. Geophys. Res.*, v.93, n.A8, p.8519-8531, Aug. 1988.