

ESTUDO DAS IMAGENS DIGITAIS DAS EJEÇÕES DE MASSAS CORONAIS

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

Giuliano Damião (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: gdamiao@lacesm.ufsm.br

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

Julho de 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) pelos recursos financeiros e a possibilidade de exercer essa tarefa de pesquisa, sendo meu processo o número 144888/2010-6.

RESUMO

Este trabalho, iniciado em agosto de 2010, teve como objetivo estudar as Ejeções de Massa Coronal, do inglês Coronal Mass Ejections (CMEs), nas proximidades do Sol, através da análise de imagens digitais do coronógrafo Large Angle and Spectroscopic Coronagraph (LASCO) C3 a bordo do satélite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), para determinar a dinâmica das CMEs entre 2 a 32 raios solares. Inicialmente foi feita a seleção das imagens, para 1997, em que elas estivessem adequadas para o tratamento digital. Após esse procedimento foi feito o tratamento digital das imagens, que consta em filtrar as imagens uma a uma, de forma a preservar unicamente os eventos de CMEs. Como etapa seguinte foi feita a análise da dinâmica das CMEs. Os resultados obtidos para as dinâmicas dos eventos de CMEs foram comparados com os resultados gerados pelo SOHO Catalog, da National Aeronautics and Space Administration (NASA). Para dar continuidade ao projeto serão feitas as análises de imagens de outros anos, como 1998 e 1999.

STUDY OF THE DIGITAL IMAGES OF THE CORONAL MASS EJECTIONS

ABSTRACT

This project, started on August 2010, aimed at study the Coronal Mass Ejections (CMEs) in vicinity of the Sun, through digital images analysis obtained by *Large Angle and Spectroscopic Coronagraph*(LASCO) C3 onboard the satellite *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO),to establish the dynamics between 2 and 32 solar radii. Initially, we made the selections of images for 1997, such that be suitable for digital processing. After this procedure was the treatment of digital images, which consists of filtering the images one by one, to preserve only the CMEs event. As next step was the analysis of the dynamics of CMEs. The results for the dynamics were compared with results generated by SOHO Catalog, belonging to *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). To give continuity of the project will be make the analysis of images from other years, like 1998 and 1999.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1–Estrutura Solar.....	02
Figura 2.2 – Imagem Tirada pelo Coronógrafo.....	05
Figura 3.1– Programa de Tratamento Digital - MenuFIT.....	06
Figura 3.2(A) –Imagem original obtida pelo SOHO/LASCO C3.....	07
Figura 3.2(B)– Imagem tratada tratamento digitalmente.....	07
Figura 3.2(C)–Mostrando o anel de detecção da CME utilizado no tratamento.....	07
Figura 3.2(D) –As bordas da CME determinadas pelo programa MenuFIT.....	07
Figura 3.3 –Programa da Dinâmica.....	08
Figura 4.1– (A) Imagem Inicial da CME (B), (C) e (D) são continuações da imagem (A).....	09
Figura 4.2 – Gráfico da Velocidade de Expansão.....	11
Figura 4.3 – Gráfico da Velocidade Radial.....	11
Figura 4.4 –Gráfico da Aceleração de Expansão.....	11
Figura 4.5 – Gráfico da Aceleração Radial.....	11

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 -Relação Porcentual das etapas do trabalho.....	09
Tabela 4.2 – Essa tabela mostra os valores calculados pela Dinâmica do evento do dia 14/12/1997 com valores medidos de 90° a 102°	10

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	02
	2.1 <i>O Sol</i>	02
	2.1.1 <i>Núcleo</i>	03
	2.1.2 <i>Zona Radiativa</i>	03
	2.1.3 <i>Zona de Convecção</i>	03
	2.1.4 <i>Atmosfera Solar</i>	03
	2.1.4.1 <i>Fotosfera</i>	03
	2.1.4.2 <i>Cromosfera</i>	03
	2.1.4.3 <i>Coroa</i>	04
	2.2 <i>Fenômenos Solares</i>	04
	2.2.1 <i>Ejeções de Massa Coronal</i>	04
	2.3 <i>Coronógrafo</i>	05
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	06
	3.1 <i>O Programa</i>	06
	3.1.1 <i>Tratamento da Imagem</i>	07
	3.1.2 <i>Dinâmica da CME</i>	07
4	RESULTADOS.....	09
5	ETAPAS A SEGUIR.....	13
	REFERÊNCIAS.....	14

1 – Introdução

Atualmente a área do clima espacial vem tendo um grande crescimento nos últimos anos no mundo inteiro. Na tentativa de se conhecer melhor os fenômenos físicos gerados no 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 no fluxo de partículas e energia que ocorrem no Sol e suas consequências na atmosfera e clima da Terra (HoytandSchatten, 1997). A preocupação do estudo do clima espacial é de coleta 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, 1991). Estas ejeções lançam enormes quantidades de matéria do Sol para o meio interplanetário (Hundhausen, 1997 e referências daquele texto), as quais possuem características bastante distintas do Vento Solar normal quando observadas nas proximidades da Terra, como por exemplo, menor temperatura de prótons, campo magnético mais intenso e suave, entre outras. 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-o eficiente para causar tempestades geomagnéticas intensas (Tsurutani et al., 1988, Tsurutani et al., 1992). Portanto, se quisermos prever a ocorrência e a intensidade de tempestades geomagnéticas, temos que prever basicamente esses dois parâmetros interplanetários. O primeiro passo nesse sentido é estudar a dinâmica das ejeções de massa coronal, desde sua origem solar até sua chegada na Terra, de modo que possamos entender sua evolução.

Assim, o objetivo deste projeto de pesquisa é estudar a propagação e as características dinâmicas, tais como velocidade, aceleração e expansão destas estruturas nas proximidades do Sol (de 1.05 até 32 raios solares), das ejeções de massa coronal solares desde o Sol até a Terra através de imagens digitais fornecidas pelo SOHO. No decorrer desse trabalho será feita uma revisão bibliográfica acerca do Sol, do fenômeno em questão analisado (Ejeções de Massa Coronal) e dos instrumentos utilizados na captação das imagens (coronógrafos). Em seguida são apresentados em detalhes os materiais e os métodos utilizados no projeto, no caso os programas desenvolvidos por Rigozo(2010). Após isso serão relatados os resultados com uma demonstração dos métodos utilizados. E por fim, as considerações finais sobre o trabalho e os passos que devem ser tomados para dar continuidade a esse projeto de pesquisa.

2 –Revisão Bibliográfica

No presente trabalho o interesse de estudo são as Ejeções de Massa Coronal, do inglês Coronal Mass Ejections (CMEs). Para entender esse fenômeno é necessário compreender outros componentes das relações de interação Sol-Terra, e é nesse fato que esse capítulo se baseia.

2.1 – Sol

A estrutura interna do Sol é basicamente dividida em quatro regiões (Kivelson e Russel, 1995): núcleo, zona radioativa, zona de convecção e a atmosfera solar (Rigozo, 2010). A Figura 2.1 mostra um desenho esquemático das regiões do Sol.

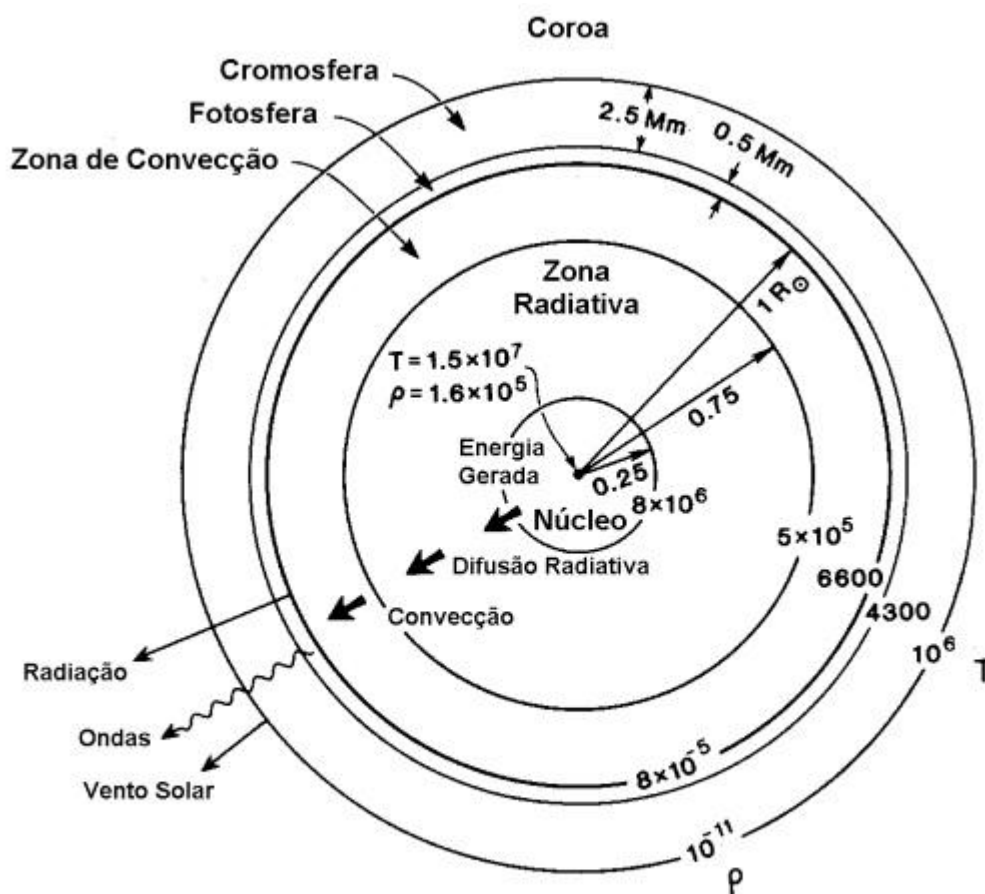


Figura 2.1- Estrutura Solar

FONTE:Kivelson e Russel (1995, p.61)

2.1.1 – Núcleo

Ele apresenta uma raio de 0,25 Raios Solares (Rs), sua energia é gerada por processos de fusão nuclear, sua temperatura pode chegar a ordem de $1,5 \times 10^7 K$ e é extremamente denso (Rigozo, 2010).

2.1.2 – Zona Radiativa

Surge após o Núcleo e se estende até 0,75 Rs, sua temperatura varia de $8 \times 10^6 K$ a $5 \times 10^5 K$

2.1.3 – Zona de Convecção

Surge após a Zona Radiativa se estendendo de 0,75 Rs a 1,00 Rs e sua temperatura varia entre $5 \times 10^5 K$ e $6600 K$.

2.1.4 – Atmosfera Solar

Por causa dos fenômenos físicos envolvidos e à suas características morfológicas, dividimos a atmosfera solar em três partes: fotosfera, cromosfera e coroa.

2.1.4.1 – Fotosfera

Possui uma espessura de $0,5 \times 10^6 m$. Sua temperatura diminui à medida que se afasta do núcleo, podendo ter uma variação de $2300 K$.

2.1.4.2 – Cromosfera

Ela tem uma espessura de $2,5 \times 10^6 m$. A temperatura na Cromosfera aumenta à medida que se afasta do Núcleo, podendo varia de $4300 K$ até $10^6 K$.

2.1.4.3 – Coroa

Ela se estende do limite da Cromosfera, e se confunde com o meio interplanetário.

“A coroa é a região da atmosfera solar de maior importância para os fenômenos físicos do meio interplanetário, pois seu material se dissipa formando o vento solar (fluxo de partículas carregadas), que arrasta o campo magnético solar através do meio interplanetário aos confins do sistema solar.

Na coroa ainda ocorrem às ejeções de material do Sol, chamadas de Ejeções de Massa Coronal a altas velocidades, da ordem de 2000 km/s, nos quais estão relacionadas fenômenos geomagnéticos, tais como as tempestades geomagnéticas e a variabilidade do clima espacial. O grande aumento da temperatura que ocorre da fotosfera (6600K) até a coroa (milhões de K) ainda não é bem compreendida.” (Rigozo, 2010)

2.2 – Fenômenos Solares

A fonte motivacional no estudo de fenômenos solares está na relação direta entre eles e suas consequências no meio interplanetário e, principalmente, na Terra. Com o objetivo maior desse trabalho são as Ejeções de Massa Coronal seguiremos para a explicação do dado fenômeno.

2.2.1 – Ejeções de Massa Coronal

Consiste em uma grande estrutura contendo plasma e campos magnéticos que são expelidos do Sol para a heliosfera. Recentemente as CMEs têm sido divididas em dois tipos principais (Sheeley et al., 1999):

- (1) CMEs Graduais, aparentemente formadas pela elevação de proeminências e suas cavidade, vindas da baixa coroa, apresentando aceleração gradual até valores máximos da ordem de 400-600 km/s.
- (2) CMEs Impulsivas, que 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.

2.3 – Coronógrafo

Um coronógrafo é o instrumento que registra a radiação da fotosfera espalhada por elétrons no plasma coronal ionizado (Bruckneretal.,1995). O coronógrafo utilizado para o presente trabalho é o LASCO que é composto por três partes C1, C2 e C3. Nesse trabalho são usadas imagens do LASCO C3 por causa do seu amplo raio de detecção (de 4 a 32 Raios Solares).

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 completamente bloqueando assim a sua luz direta permitindo observar a atmosfera Solar externa chamada de coroasolar (<http://lasco-www.nrl.navy.mil>).

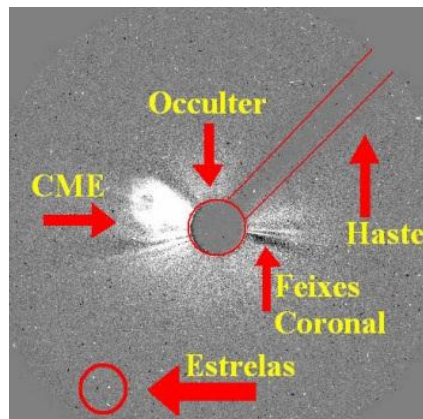


Figura 2.2- Imagem Tirada pelo Coronógrafo

FONTE: Rigozo (2010)

Na Figura 2.2 temos uma imagem tirada pelo coronógrafo LASCO C3, onde foi sinalizado os pontos de maior importância da imagem. No centro da imagem há um círculo indicando a posição no occulter (que serve para gerar um eclipse artificial do Sol). Ao occulter está presa uma haste, que serve para posicionar o occulter na posição correta. À esquerda da imagem vê-se uma Ejeção de Massa Coronal, e à direita feixes, ou jatos, coronais. No fundo estão presentes estrelas e corpos celestes.

3 – Materiais e Métodos

Este trabalho apresenta um estudo das imagens digitais do Sol obtidas pelo coronógrafo LASCO C3 a bordo do satélite SOHO. Os estudos dessas imagens foram feitos no ambiente do *Matlab 7.0*, desenvolvido por Rigozo(2010), no qual consiste em ler as imagens em formato FIT, ler o cabeçalho das imagens e executar o tratamento digital de forma que:

- 1) Elimine ou reduzam substancialmente os ruídos, ou sujeiras, nas imagens que dificultam a visualização clara de uma CME;
- 2) Com as informações contidas no cabeçalho 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 atravésda 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.

3.1 – O Programa

O programa utilizado no tratamento digital das imagens foi feito seguindo os parâmetros acima descritos. Ele foi desenvolvido por Rigozo(2010) no ambiente do *Matlab 7.0*. A Figura 3.1 mostra uma imagem do programa utilizado na limpeza das imagens digitais.

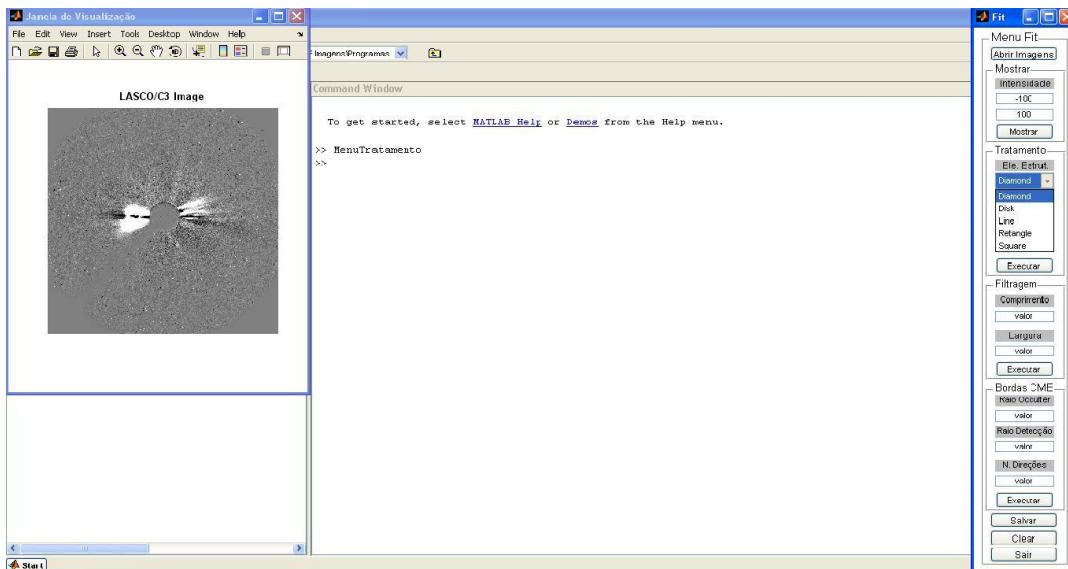


Figura 3.1– Programa de Tratamento Digital - MenuFIT

3.1.1 – Tratamento da imagem

O programa faz a limpeza na imagem de forma que fique ressaltado apenas o evento em si. A sequência de imagens a seguir mostra detalhes da limpeza da imagem.

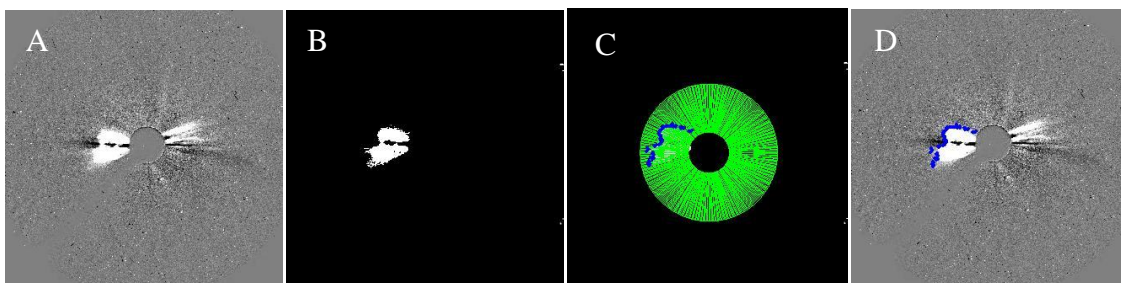


Figura 3.2 – (A) Imagem original obtida pelo SOHO/LASCO C3. (B) Imagem tratada digitalmente. (C) Mostrando o anel de detecção da CME utilizado no tratamento. (D) As bordas da CME determinadas pelo programa MenuFIT.

A Figura 3.2A mostra a imagem da CME, da forma como ela é vista originalmente pelo programa. A Figura 3.2B mostra como fica a imagem após ter sido feito o tratamento, ou limpeza, nota-se que apenas o evento ficou em evidência. Na Figura 3.2C a imagem mostra o anel de detecção da imagem (em verde), que é responsável pela detecção da borda da ejeção (em azul). No caso a detecção é feita de grau em grau, cobrindo todos os 360 graus em torno do occulter. E a Figura 3.2D é semelhante à Figura 3.2A, com exceção da borda marcada, que é feita ao mesmo tempo em que é feita a borda da Figura 3.2C, essa marcação é feita para que se possa ter certeza de que nenhuma parte do evento foi deixada de fora. Esse passo do tratamento é repetido para todas as imagens que possuam esse mesmo evento, de forma que a sequência de imagens está preparada para o cálculo da dinâmica da CME.

3.1.2 – Dinâmica da CME

Após a conclusão da etapa do Tratamento, é utilizado um segundo programa que é responsável pelo cálculo da Dinâmica da CME. A Dinâmica nada mais é do que o cálculo de velocidade constante, aceleração ou desaceleração da Ejeção de Massa Coronal. A Figura 3.3 mostra a janela do programa da Dinâmica.

A execução do programa ocorre seguindo os seguintes passos:

- I. O usuário seleciona a pasta que contém o evento a ser calculado;
- II. Aplica a opção Radial;
- III. Utiliza a opção vídeo;

IV. Salva os resultados.

Quando os passos são concluídos é possível visualizar, na pasta em que o evento se encontra, os resultados da dinâmica que estão em forma de vídeo e dados, onde os dados formam uma tabela em formato TXT.



Figura 3.3 - Programa da Dinâmica

Para a conclusão do processo da Dinâmica é feita uma comparação entre os dados obtidos e os dados do site do SOHO Catalog (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) da NASA.

4 – Resultados

Foram separadas pastas com eventos de CME, catalogadas por dias do ano de 1997. Com isso foram separadas as pastas cujas imagens o programa conseguia ler e executar os processos. Algumas dessas pastas foram Tratadas e destas algumas receberam a Dinâmica, como informa a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – A tabela em questão mostra a relação porcentual de pastas analisadas e tratadas em relação a quantidade total de pastas.

Total de Pastas	360
Pastas com Imagem para Tratamento	85
Número Aproximado de Imagens	1140
Porcentual de Pastas Tratadas	44%
Porcentual de Pastas Feita a Dinâmica	15%

Para exemplificar os passos do processo e os resultados, segue a sequência de imagens e a tabela de dados do dia 14/12/1997.

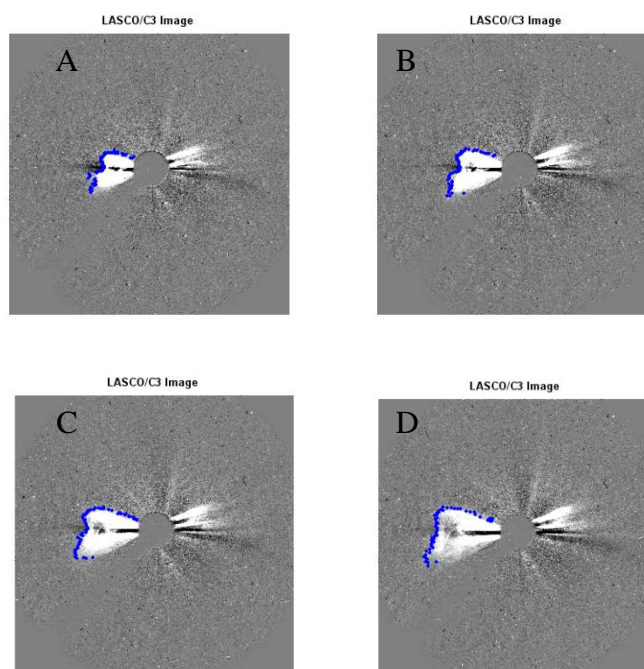


Figura 4.1– (A) Imagem Inicial da CME (B), (C) e (D) são continuações da imagem (A).

A Figura 4.1 mostra uma pequena sequência de imagens de uma Ejeção de Massa Coronal, do dia 14/12/1997. A borda (em azul) determina a distância, em cada posição angular, do

oculter até a borda do evento. Como eu tenho esses valores para imagens diferentes, por exemplo para a imagem A e B, é possível calcular a variação da posição Δs da borda da CME. Como o programa lê o cabeçalho das imagens e nele estão informações como o momento em que a imagem foi tirada, temos então a variação do tempo Δt entre as imagens. Então, de posse dessas informações é possível calcular a velocidade de expansão da CME onde a velocidade $v = \Delta s / \Delta t$.

A determinação da velocidade é feita para cada posição angular, ou seja, de grau em grau. Assim comparando as velocidades entre diferentes imagens para uma mesma posição angular é possível saber a velocidade inicial e final, a velocidade média e a aceleração da Ejeção de Massa Coronal para a dada posição angular. A tabela 4.2 ilustra resultados obtidos para a CME do dia 14/12/1997 utilizando o programa da Dinâmica.

Tabela 4.2 – Essa tabela mostra os valores calculados pela Dinâmica do evento do dia 14/12/1997 com valores medidos de 90° a 102°.

Ângulo(°)	Velocidade Inicial (km/s)	Velocidade Final (km/s)	Velocidade Média (km/s)	Aceleração (km/s ²)
90.0	567.3	363.7	312.8	-30.0
91.0	589.2	457.5	353.5	-19.4
92.0	425.1	405.4	440.7	-2.9
93.0	468.9	436.6	446.5	-4.7
94.0	556.4	332.4	353.5	-33.0
95.0	446.8	405.3	417.4	-6.1
96.0	501.7	530.4	539.5	4.2
97.0	479.7	321.9	434.9	-23.2
98.0	315.4	499.1	551.1	27.0
99.0	392.0	530.3	556.9	20.4
100.0	370.1	478.2	510.4	15.9
101.0	424.8	478.2	487.1	7.9
102.0	304.4	499.0	586.0	28.6

Quando é executado o programa da Dinâmica, além de gerar tabelas como a Tabela 4.2, gera gráficos da velocidade de expansão, velocidade radial, aceleração de expansão e aceleração radial. Esses gráficos, para o dia 14/12/1997 podem ser conferidos abaixo.

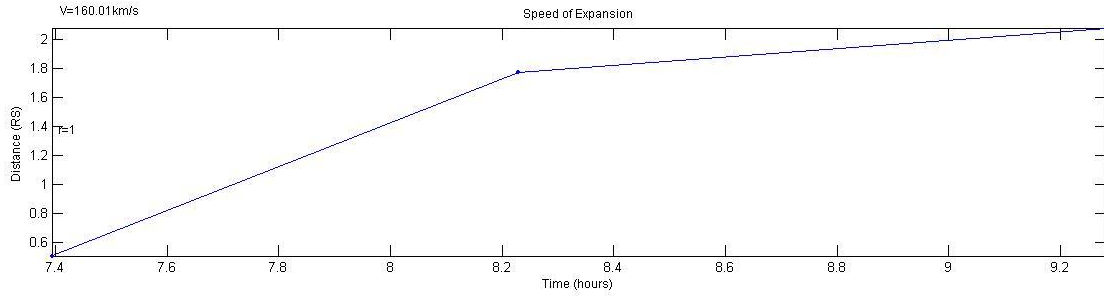


Figura 4.2–Gráfico da Velocidade de Expansão

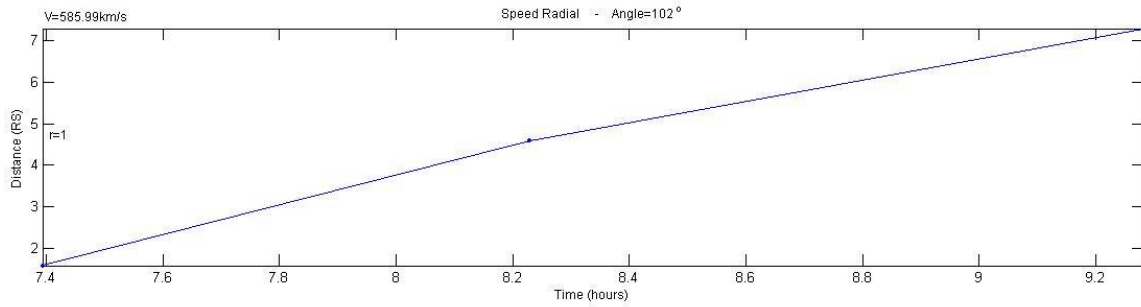


Figura 4.3– Gráfico da Velocidade Radial

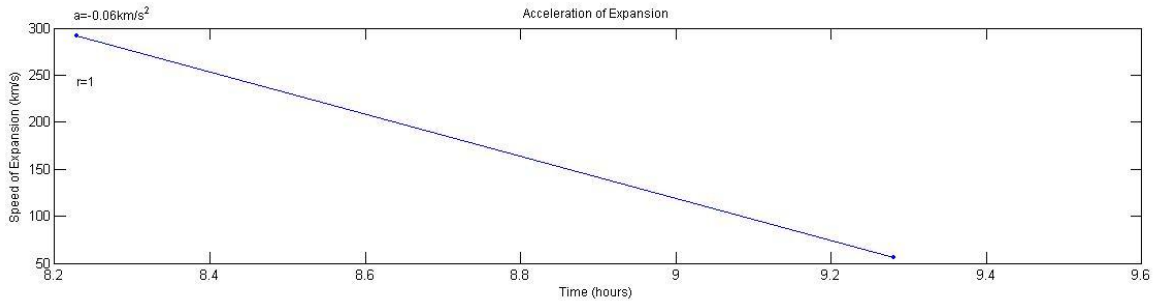


Figura 4.4 – Gráfico da Aceleração de Expansão

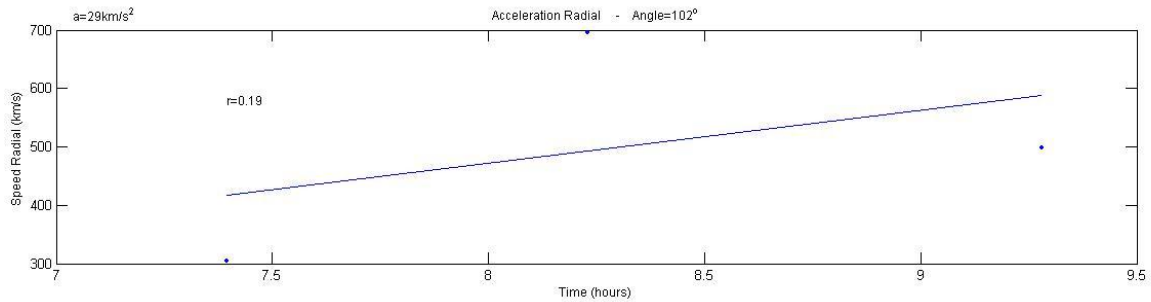


Figura 4.5– Gráfico da Aceleração Radial

A partir da análise dos gráficos é possível ver que a velocidade de expansão de $160,0 \text{ km/s}$ e a aceleração de expansão de $-0,08 \text{ km/s}^2$. Também são gerados gráficos para o cálculo da velocidade e aceleração radiais. No caso esses gráficos são feitos para a posição angular de maior variação, no caso 102° . Onde foi detectada uma velocidade radial de $585,99 \text{ km/s}$ e uma aceleração radial de 29 km/s .

Esses são os resultados para o dia 14/12/1997, mas é importante ressaltar que esse procedimento foi repetido para outros dias do ano de 1997. Esses resultados servem apenas para exemplificar o processo, que foi o mesmo para os outros eventos.

5 –Etapas a Seguir

Conclui-se, a partir de dados obtidos pelos programas, que eles são eficientes na determinação de velocidade constante, aceleração ou desaceleração das CMEs. Porém para se ter maior precisão nos resultados é necessário que o usuário do programa esteja bem familiarizado com ele, para que se reduza ao máximo o erro humano a que o programa está submetido.

Para a continuação desse projeto deverá ser feita a análise das imagens de Ejeções de Massa Coronal de anos posteriores a 1997, onde será determinada a dinâmica de propagação das CMEs. Este estudo será utilizado a mesma metodologia apresentada neste relatório.

Referências

- Brueckner, G. E.; Howard, R. A.; Koomen, M. J.; Korendyke, C. M.; Michels, D. J.; Moses, J. D.; Socker, D. G.; Dere, K. P.; Lamy, P. L.; Llebaria, A.; Bout, M. V.; Simnett, G. M.; Bedford, D. K.; Eyles, C. J. The large angle spectroscopic coronagraph(LASCO). *Solar Phys.* v.162, n. 1-2, p.357-402, 1995
- 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.